

TC YÜKSEKÖĞRETİM AKADEMİK
DEKÜFANTASYON MERKEZİ

**KİLLİ ZEMİNLERİN ŞİŞME VE EMME
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNDE
BULANIK MODEL (FUZZY LOGIC)
YAKLAŞIMI**

İnş. Yük. Müh. ÖMÜR ÇİMEN

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA, 2002**

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

128349

KİLLİ ZEMİNLERİN ŞİŞME VE EMME ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİNDE BULANIK MODEL (FUZZY LOGIC) YAKLAŞIMI

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İnş. Yük. Müh. ÖMÜR ÇİMEN

128349

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA, 2002

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne

Bu alışma jürimiz tarafından İNşAAT MüHENDİSLİğİ ANABİLİM DALI'nda
DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. S. Nilay KESKİN

ye : Prof. Dr. Ali DOğAN

ye : Prof. Dr. Adil KILIÇ

ye : Doç. Dr. Ayfer ERKEN

ye : Doç. Dr. Hüseyin YILDIRIM

ONAY

Bu tez S.D.. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu 05/06/2002 tarih ve 46-02/a
sayılı kararınca belirlenen yukarıdaki jüri yeleri tarafından 14/06/2002 tarihinde
kabul edilmiştir.


S.D.. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ
Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ.....	v
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konunun Tanıtılması ve Önemi.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol.....	5
2. KAYNAK BİLGİSİ.....	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. Zeminlerin Su Emme Özellikleri İle İlgili Çalışmalar.....	9
2.2.1. Doygun olmayan zeminlerdeki gerilme durumları.....	17
2.2.2. Zemin Cinsinin ve Başlangıç Koşullarının Zemin Emmesine Etkisi.....	20
2.2.3. Diğer Zemin Özelliklerinin Zemin Emmesine Etkisi.....	30
2.3. Zeminlerin Şişme Özellikleri İle İlgili Çalışmalar.....	42
2.3.1. Mineralojinin ve Zemin Başlangıç Koşullarının Şişmeye Etkisi.....	44
2.3.2. Şişme Özelliklerine Etki Eden Diğer Faktörler ve Şişme Özelliklerinin Tahmini İle İlgili Çalışmalar.....	54
2.4. Zemin Parametrelerinin Belirlenmesinde Bulanık Mantığın Kullanıldığı Çalışmalar.....	63
3. MATERYAL VE METOT.....	74
3.1. Giriş.....	74
3.2. Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	75
3.2.1. Kullanılan Zemin Numunelerinin Tanımlanması.....	75
3.2.2. İncelenen Zemin Numunelerinin Minerolojik Yapılarının Belirlenmesi.....	76
3.2.3. Ödometre Yöntemi ile Emme Kapasitesi ve Şişme Değerlerinin Belirlendiği Deneyler.....	85
3.3. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Metodu ve Bu Metodun Emme Kapasitesi ile Şişme Basıncına Uygulanması.....	87
3.3.1. Bulanık Mantık Kavramı.....	88
3.3.2. Bulanık Mantık Kuralları.....	90
3.3.3. Üyelik Fonksiyonları ve Üyelik Dereceleri.....	91
3.3.4. Eğer – İse (If – Then) Kuralları.....	94
3.3.5. Bulanık İşlemler.....	94
3.3.6. Durulaştırma (Yorumlama) Bağlantıları.....	100
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	107
4.1. Giriş.....	107
4.2. Labotatuvar Deney Sonuçları.....	107
4.3. Emme Kapasitesi ve Şişme Basıncının Bulanık Mantık Metodu İle Modellenmesi.....	110
4.3.1. Bulanık Model Kuralları.....	114
4.4. Deney Sonuçları İle Bulanık Model Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	121
5. SONUÇLAR.....	125
KAYNAKLAR.....	128

ÖZGEÇMİŞ.....	140
EKLER.....	141
EK-1.....	143
EK-2.....	147
EK-3.....	160



ÖZET

Geoteknik Mühendisliğinde, özellikle doygun olmayan killi zeminlerde görülebilen yüksek şişme potansiyeli ve onu etkileyen en önemli parametrelerden biri olan emme kapasitesi, önemli bir mühendislik problemidir. Su muhtevasının artmasıyla, büyük hacim değişimi gösterebilen killer, özellikle sıkıştırılmış zeminlerin kullanıldığı mühendislik yapılarında önemli problemlere neden olmaktadır. Bu tür zeminlerle ilgili mühendislik uygulamalarında emme kapasitesi ve şişme basıncının önceden belirlenmesi ve bunlara etkiyen faktörlerin bir arada düşünülmesi gerekmektedir. Böylece gereken önlemlerin alınması, uygun temel sisteminin seçilmesi ve oluşabilecek hasarların en aza indirilmesi mümkün olacaktır. Yapılan çalışmaların çoğunda, arazi ve laboratuvar deneyleri yapılarak emme ve şişme problemi ayrı ayrı incelenmiş, değişik amprik bağıntılar verilmiştir. Belirsizliklerin hakim olduğu problemlerin çözümünde uygulanan bulanık mantık metodu, son yıllarda geoteknik problemlerin çözümünde de kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, sıkıştırılmış killerin emme kapasitelerinin ve şişme basınçlarının bulanık mantık yöntemi kullanılarak tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, çalışmanın ilk kısmında farklı plastisite indisine sahip killer kullanılarak, plastisite indisinin, kuru birim hacim ağırlığın ve başlangıç su muhtevasının emme kapasitesi ve şişme basıncı üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Bu faktörlerin etkilerinin görülebilmesi için çalışmada sıkıştırılmış kil zemin numuneleri kullanılmıştır.

Bu amaçla, farklı plastisite indisine sahip kil numuneleri, farklı kuru birim hacim ağırlıkta, farklı başlangıç su muhtevasında olacak şekilde kompaksiyon yöntemiyle hazırlanmışlardır. Bu numuneler üzerinde ödometre deney sistemi kullanılarak emme kapasitesi, serbest şişme ve sabit deformasyonlu şişme deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamada, emme kapasitesinin ve şişme basıncının bulanık mantık yöntemiyle belirlenmesi hedeflenmiştir. Girdi olarak düşünülen, plastisite indisi, kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevası değerleri bulanık alt kümelerle ayrılmıştır. Çıktı olarak ise, emme kapasitesi ve sabit deformasyonlu şişme basınçları dikkate alınmış ve bulanık alt kümelerle ayrılmıştır. Daha sonra bulanık kurallar oluşturulmuş ve Fortran 5.1 programlama dilinde bu kurallar yazılmıştır. Sonuçta, bulanık mantık metoduyla emme kapasiteleri ve sabit deformasyonlu şişme basınçları tahmin edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlarla, bulanık mantık yönteminden tahmin edilen değerler karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Doygun olmayan zeminler, sıkıştırılmış killer, emme, şişme, bulanık mantık.

ABSTRACT

In geotechnical engineering, high swelling potential and suction capacity affected an important parameter on swelling are an important engineering problem at an unsaturated soils. With increasing water content, clays that is could show high volume change cause important problems at engineering structure that is used compacted soil, essentially. In engineering practice concerned with such soils, it must be needed that suction capacity and swelling pressure are determined at first and effected factors of these are considered together. Thus, it will be possible that taken measures, choose suitable foundation system and reduced damages. In literature, suction capacity and swelling pressure are examined with madding in-situ and laboratory tests and different empirical equations are presented. Fuzzy logic method that used solution of fuzziness problem also has been begun to use in geotechnical problems at recently.

In this study, it is aimed that suction capacity and swelling pressure of compacted clays are predicted with using fuzzy logic method. With this aimed, clay samples with different plasticity index have been used and it has noticed effecting plasticity index, dry density and initial water content in suction capacity and swelling pressure. In order to be appearing these effects, compacted clay samples are also used in this study.

For this aim, clay samples with different plasticity index are prepared by compaction method at different dry density and different initial water content. Suction capacity, free swelling and constant volume swelling tests are made on these samples with using eodometer test equipment. In second stage, it is aimed that suction capacity and swelling pressure can be determined with fuzzy logic method. Plasticity index, dry density and initial water content that determined in inputs are parted fuzzy subsets. Suction capacity and swelling pressure are considered as outputs and parted fuzzy subsets. Then, fuzzy rules are built and these rules are written in Fortran 5.1. Finally, suction capacities and swelling pressure are predicted using Fuzzy logic method. It is shown that there is a good agreement with the result of tests determined and the results of fuzzy logic method.

KEY WORDS: Unsaturated soils, compacted clays, suction, swelling, fuzzy logic.

ÖNSÖZ

Doygun olmayan killi zeminlerin sahip olduğu emme özelliğinin bir sonucu olarak şişme olayı meydana gelmektedir. Yüksek emme kapasitesine ve yüksek şişme potansiyeline sahip olan killi zeminlerde şişmeden dolayı aşırı hacim artışları meydana gelmektedir. Bu hacim artışları özellikle sıkıştırılmış zeminlerin kullanıldığı havaalanı, karayolu gibi hafif yapılarda, su yapılarında ve arkasında şişme potansiyeline sahip zeminleri tutan istinad yapılarında bir mühendislik problemidir. Bu tür zeminlerin emme ve şişme davranışlarının ve bunlara etkiyen faktörlerin önceden belirlenmesi ile meydana gelecek zararlar önlenebilecektir.

Bu çalışma, S.D.Ü. Araştırma Fonu Destekli 310 Nolu Araştırma projesi kapsamında yapılmıştır. Çalışmada, sıkıştırılmış killerin emme kapasitelerinin ve şişme basınçlarının bulanık model kullanılarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Modelin bu amaçla kullanılabilirliğini göstermek için sıkıştırılarak hazırlanan killi numuneler üzerinde, ödometre yöntemi yardımıyla emme kapasitesi ve şişme deneyleri yapılmıştır. Hem deneylerin yapımında ve hem de bulanık mantık modelinin kurulmasında sıkıştırılmış bir kilin emme kapasitesine ve şişme basıncına etki eden faktörlerden olan başlangıç su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisi dikkate alınmıştır. Bu faktörlerin herbirinin bulanık alt kümeleri oluşturulmuştur. Deneysel çalışmaların sonuçları ve literatürden alınan sonuçlar birleştirilerek başlangıç su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisine bağlı olarak emme kapasitesine ve şişme basıncına ait bulanık kurallar hazırlanmıştır. Bu kurallar Fortran 5.1 programlama dilinde yazılmış, emme kapasiteleri ve şişme basınçları tahmin edilmiştir.

Bu çalışmanın konusunu öneren ve çalışmanın her safhasında yardımlarını esirgemeyen Danışman Hocam, Sayın Doç. Dr. S. Nilay KESKİN 'e şükranlarımı sunarım. Çalışmalarım sırasında bana sabır gösteren sevgili eşim Yrd. Doç. Dr. Mesut ÇİMEN 'e teşekkürü bir borç bilirim.

SİMGELER DİZİNİ

ψ	Toplam emme gerilmesi
ψ_e	Hava giriş emme gerilmesi
u_a	Boşluk hava basıncı
u_w	Boşluk suyu basıncı
Ω	Ozmotik emme
$(u_a - u_w)$	Matris emme
h_0	Hidrostatik yük
ρ_s	Çözeltilinin yoğunluğu
g	Yerçekimi ivmesi
R	Üniversal gaz sabiti
T	Ortalama sıcaklık
$[C_s]$	Çözeltilinin molar konsantrasyonu
u ve $u + \Delta u$	Membran üzerindeki basınçlar
R_s	Membranın yarıçapı
T_s	Yüzey gerilmesi
β	Hava-su ara yüzeyinin yatayla yaptığı açı
R_1 ve R_2	İki ortogonal ana düzlemde membranın eğrilik yarıçapları
σ'	Efektif normal gerilme
σ	Toplam normal gerilme
β'	Bağ (tutma) faktörü
χ	Zeminin doygunluk derecesiyle ilgili bir parametre
ψ	0 ile 1 arasında değişen bir parametre
p''	Boşluk suyu basıncı
β	Deneyssel olarak ölçülmesi gereken istatistiksel bir faktör
χ_m	Matris emme için efektif gerilme parametresi
h_m	Matris emme
χ_s	Çözeltilinin emmesi için efektif gerilme parametresi
h_s	Çözelti emmesi

χ^*	Efektif gerilme parametresi
ϕ'	Efektif içsel sürtünme açısı
τ	Kayma mukavemeti
τ_o	Drenajlı kayma mukavemetidir
a	Emme artışıyla kayma mukavemetinde ortaya çıkan artış
b	$(u_a - u_w) \tan \phi'$
θ_w	Hacimsel su muhtevası
θ_s	Doygun durumdaki su muhtevası
ω	Su muhtevası
k_w	Permeabilite katsayısı
r	Boşluk yarıçapı
N_c	Kapiler kuvvet
r	Menisküsün eğrilik yarıçapı
T_s	Yüzey gerilmesi
E	Deformasyon modülü
E_{maks}	Maksimum deformasyon modülü
q	Deviatör gerilme
M_a	Toplam gerilme oranı
M_w	Emme oranı
S	Doygunluk derecesi
S_r	Kritik durum-gerilme oranlarının değişimini
M_s	Tam doygunluk oranına
W_L	Likit limit
PL	Plastik limit
SI	Rötre limiti
PI	Plastisite indisi
λ	Tabakalar arası ayrılma
P	İki paralel plaka arasındaki birim alana düşen kuvvet
f_r	İki paralel plaka arasındaki birim alandaki itki kuvveti
f_a	İki paralel plaka arasındaki birim alandaki çekim kuvveti

ϵ_{sv}^*	Montmorillonitin hacimsel şişme yüzdesini
V_v	Sıkıştırılmış bentonitteki boşlukların hacmi
V_m	Sıkıştırılmış bentonitteki montmorillonit hacmi
V_{sv}	Sabit düşey basınçta sıkıştırılmış montmorillonitin maksimum şişme deformasyonu
ϵ_{smaks}	Sıkıştırılmış bentonitin maksimum şişme deformasyonu
ρ_s	Bentonitin birim hacim ağırlığı,
ρ_{d0}	Sıkıştırılmış bentonitin başlangıç kuru birim hacim ağırlığı
C_m	Bentonitteki montmorillonit miktarı
γ_k	Kuru birim hacim ağırlık
w_o	Başlangıç su muhtevası
e	Boşluk oranı
$\log P$	Efektif basınç
A	Boşluk suyu parametresi
P_o	Jeolojik basınç
P_s	Düzeltilmemiş şişme basıncı
P_s'	Düzeltilmiş şişme basıncı
S	Şişme potansiyeli
I_s	Şişme indisi
Q_{pre}	Farklı metotlar kullanılarak tahmin edilen nihai taşıma kapasitesi
Q_m	Kazık yükleme deneylerinden ölçülen nihai taşıma kapasitesi
E	Tahmin hata miktarı
τ	Girdi verilerinden tahmin edilen nihai taşıma kapasitesindeki hatayı azaltıcı bir katsayı
Q_u	Nihai kazık taşıma kapasitesi
$Q_{u \min}$	Nihai taşıma kapasitesi kümesinin birinci elemanı
$Q_{u \max}$	Nihai taşıma kapasitesi kümesinin dokuzuncu elemanını
x_i	i. eleman için Q_u değeri
$\bar{U}(x_i)$	x_i 'nin üyelik derecesi

Q_u^*	Kazık kapasitesinin en güvenilir tahmini
A_L	Nihai fuzzy kümesi üyelik fonksiyonunun sol kapalı alanı
A_R	Nihai fuzzy kümesi üyelik fonksiyonunun sağ kapalı alanı
X	Şev göçme potansiyel indeksi
D_r	Relatif sıklık
q_c	Konik penetrasyon uç mukavemeti
P_a	Atmosfer basıncı
σ_v'	Düşey efektif gerilme
Q_F	En küçük kareler regresyonundaki ampirik bir sabit
R_f	Sürtünme oranı
$\bar{U}(R_f)$	Sürtünme oranının üyelik derecesi
f_s	Sürtünme katsayısı
D_{RL}	Düşük sıkışabilirlikli kumlar için tanımlanan korelasyonlardan bulunan relatif sıklık
D_{RM}	Orta sıkışabilirlikli kumlar için tanımlanan korelasyonlardan bulunan relatif sıklık
D_{RH}	Yüksek sıkışabilirlikli kumlar için tanımlanan korelasyonlardan bulunan relatif sıklık
M_L, M_M ve M_H	Bulanık kuralların birleştirilmesinden elde edilen bulanık katsayılar
U	Sınıflandırma indisi
$\bar{U}(U)$	Zemin davranışının üyelik fonksiyonu
$\bar{U}(W_L)$	Bulanık likit limit kümesinin üyelik derecesi
W_{em}	Emme kapasitesi
i, j, k ve z	Ait olduğu bulanık parametrelerin bulunduğu alt küme
$\bar{U}(\gamma_k(i))$	Kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümelerinin üyelik dereceleri
$\bar{U}(w_o(j))$	Başlangıç su muhtevası bulanık alt kümelerinin üyelik dereceleri
$\bar{U}(PI(k))$	Plastisite indisi bulanık alt kümelerinin üyelik dereceleri
$\bar{U}(W_{em}(z))$	Emme kapasitesi bulanık alt kümelerinin üyelik dereceleri
$\bar{U}(P_s(y))$	Şişme basıncı bulanık kümelerinin üyelik dereceleri
$P_s(y)$	Şişme basıncı bulanık alt küme grupları
y	Şişme basıncı bulanık kümesinin ait olduğu alt küme

W_{em}	Yüzde olarak emme kapasitesi
$M_{n\text{ihai}}$	Serbest koşullar altında zemin numunesinin kapiler emme ile ulaştığı ağırlık
M_{kuru}	Zemin numunesinin kuru ağırlık
S_v	Şişme yüzdesi
ΔH	Numunede meydana gelen toplam şişme miktarı
H_0	Numunenin deney başlangıcındaki yüksekliği
P_ϕ	Sabit hacimli şişme basıncı
P'_ϕ	Serbest şişme basıncı
W_{em}^*	Bulanık mantık modelinden elde edilen emme kapasitesi
P_ϕ^*	Bulanık mantık modelinden elde edilen sabit hacimli şişme basıncı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Zeminlerin doygunluk durumları.....	8
Şekil 2.2. Yarı geçirimli bir membran yardımıyla ozmotik basıncın oluşumu.....	11
Şekil 2.3. Zemindeki hava-su ara yüzeyi (Kontraktik skin tabakası).....	12
Şekil 2.4. Hava-su ara yüzeyinde yüzeysel gerilim olayı.....	12
Şekil 2.5. Glacial till için toplam, matris ve osmotik emme.....	16
Şekil 2.6. Hollanda'daki bazı zeminlerin zemin-su karakteristik eğrileri.....	20
Şekil 2.7. Siltli bir kil için zemin su karakteristik eğrisi.....	21
Şekil 2.8. Kumlu, siltli ve killi zeminler için zemin su karakteristik eğrisi.....	21
Şekil 2.9. Likit limit- emme kapasitesi ilişkisi.....	22
Şekil 2.10. Hipotetik bir poroz ortam için doygunluk derecesi-matris emme eğrisi..	23
Şekil 2.11. Zemin-su karakteristik eğrisinin farklı durumlarındaki su alanının muhtemel değişimi.....	24
Şekil 2.12. Buzul kili için başlangıç su muhtevası-toplam emme ilişkisi.....	25
Şekil 2.13. Regina kili için başlangıç su muhtevası-toplam emme ilişkisi.....	26
Şekil 2.14. Sıkıştırılmış siltli kumun zemin su karakteristik eğrileri üzerinde, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının etkisi.....	27
Şekil 2.15. Su muhtevası ile emme arasındaki ilişki.....	28
Şekil 2.16. Laboratuvar da anlık profil metodu kullanılarak elde edilen doygun olmayan permeabilite katsayıları.....	31
Şekil 2.17. Kapiler yükseklik, matris emme ve boşluk yarıçapı arasındaki ilişki.....	32
Şekil 2.18. Kapiler kuvvet ve emme arasındaki ilişki.....	33
Şekil 2.19. Farklı su giriş hızlarıyla ilişkili emme profilleri.....	34
Şekil 2.20. Kiunyu çakılı için doygun ve doygun olmayan koşullar altında, efektif gerilme ile deviatör gerilme ilişkisi.....	39
Şekil 2.21. Doygunluk derecesi ile kritik durum gerilme oranlarının değişimi.....	40
Şekil 2.22. Sabit su muhtevasında doygun olmayan numuneler üzerindeki deneyler için kayma sırasında emme basınçlarındaki değişiklikler.....	41
Şekil 2.23. Sabit başlangıç kuru birim hacim ağırlıklı numuneler için başlangıç su muhtevası değişiminin toplam kabarmaya etkisi.....	51
Şekil 2.24. Sabit başlangıç su muhtevalı numuneler için başlangıç kuru birim hacim ağırlığının toplam kabarmaya etkisi.....	51

Şekil 2.25. Düşey şişme basıncına kuru birim hacim ağırlığının etkisi.....	52
Şekil 2.26. Düşey basıncın düşük olduğu deneyler için kuru birim hacim ağırlık ile maksimum şişme yüzdesi ilişkisi.....	53
Şekil 2.27. Düşey basıncın yüksek olduğu deneyler için kuru birim hacim ağırlık ile maksimum şişme yüzdesi ilişkisi.....	54
Şekil 2.28. Şişme potansiyeli için sınıflandırma kartı.....	60
Şekil 2.29. Şişme indisi – likit limit ilişkisi.....	62
Şekil 2.30. Şişen zeminlerin tanımlanması için farklı çalışmaların karşılaştırılması.....	62
Şekil 2.31. Taşıma kapasitesi tahminleri kümesini gösteren bulanık küme.....	66
Şekil 2.32. Şev göçme potansiyeli indeksi.....	68
Şekil 2.33. Sıkışabilirliğin çeşitli seviyelerini gösteren fuzzy sayıları.....	70
Şekil 2.34. Üç genel grup için ampirik CPT zemin sınıflandırması.....	71
Şekil 2.35. CPT bulanık zemin sınıflandırma şeması.....	72
Şekil 3.1. 1 No'lu numunenin tüm kayaç çekimi.....	79
Şekil 3.2. 1 No'lu numunenin oryantasyonu.....	79
Şekil 3.3. 1 No'lu numunenin etilen glikol ile muameleli analizi.....	80
Şekil 3.4. 1 No'lu numunenin 550 °/1 saat ısıya tabi analizi.....	80
Şekil 3.5. 2 No'lu numunenin tüm kayaç çekimi.....	81
Şekil 3.6. 2 No'lu numunenin oryantasyonu.....	81
Şekil 3.7. 2 No'lu numunenin etilen glikol ile muameleli analizi.....	82
Şekil 3.8. 2 No'lu numunenin 550 °/1 saat ısıya tabi analizi.....	82
Şekil 3.9. 3 No'lu numunenin tüm kayaç çekimi.....	83
Şekil 3.10. 3 No'lu numunenin oryantasyonu.....	83
Şekil 3.11. 3 No'lu numunenin etilen glikol ile muameleli analizi.....	84
Şekil 3.12. 3 No'lu numunenin 550 °/1 saat ısıya tabi analizi.....	84
Şekil 3.13. Bulanık likit limit alt kümesi.....	92
Şekil 3.14. Likit limit bulanık alt kümeleri.....	93
Şekil 3.15. Mamdani en büyük-en küçük (EB-EK) çıkarımı.....	99
Şekil 3.16. Tipik bulanık küme çıktısı.....	101
Şekil 3.17. En büyük üyelik derecesi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması.....	102

Şekil 3.18. Sentroid yöntemi ile durulaştırmanın emme kapasitesinin belirlenmesine uygulanması.....	102
Şekil 3.19. Ağırlıklı ortalama yöntemi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması.....	103
Şekil 3.20. Ortalama en büyük üyelik durulaştırmasının emme kapasitesinin belirlenmesine uygulanması.....	104
Şekil 3.21. Toplamların merkezi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması.....	104
Şekil 3.22. En büyük alan merkezi ile durulaştırmanın emme kapasitesinin belirlenmesine uygulanması.....	105
Şekil 3.23. İlk ve son en büyük üyelik dereceleri ile durulaştırma.....	106
Şekil 4.1. Sabit deformasyonlu şişme basıncı ile serbest şişme basıncı ilişkisi.....	109
Şekil 4.2. Kuru birim hacim ağırlık alt kümeleri.....	111
Şekil 4.3. Başlangıç su muhtevası alt kümeleri.....	111
Şekil 4.4. Plastisite indisi alt kümeleri.....	111
Şekil 4.5. Emme kapasitesi alt kümeleri.....	112
Şekil 4.6. Şişme basıncı alt kümeleri.....	113
Şekil 4.7. Sıkıştırılmış killi zeminlerin emme kapasitesi ve şişme basınçlarının tahmini için Fortran 5.1 dilinde yazılmış programların akış şeması.....	120
Şekil 4.8. Deneylerden elde edilen emme kapasitesi değerleri ile bulanık mantık modelinden elde edilen emme kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması...	123
Şekil 4.9. Deneylerden elde edilen şişme basıncı değerleri ile bulanık mantık modelinden elde edilen şişme basıncı değerlerinin karşılaştırılması.....	124

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Yaygın olarak kullanılan emme ölçüm metotlarının karşılaştırılması....	14
Çizelge 2.2. Bazı kil minerallerin özellikleri.....	45
Çizelge 2.3. Değişik adsorbe katyonlu kil minerallerinin kıvam limitleri değerleri..	46
Çizelge 2.4. Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numuneler için A değerine karşı zemin davranışı.....	56
Çizelge 2.5. Lineer rötre veya rötre limitine bağlı olarak şişen zeminlerin sınıflandırılması.....	58
Çizelge 2.6. Rötre limiti, plastisite indisi ve kil miktarına bağlı olarak şişen zeminlerin sınıflandırılması.....	58
Çizelge 2.7. Rötre limiti ve plastisite indisine bağlı şişen zemin sınıflandırılması....	59
Çizelge 2.8. Plastisite indisi, şişme potansiyeli ve toplam şişme arasındaki yaklaşık ilişki.....	59
Çizelge 2.9. Rocky dağı zeminleri için standart penetrasyon dayanımları, likit limit ve No.200 elek altına geçen malzeme miktarına bağlı olarak şişen zeminlerin sınıflandırılması.....	60
Çizelge 2.10. Şişen killerde muhtemel hacim değişiklikleri için veriler.....	61
Çizelge 2.11. Hacim değişikliği, şişme basıncı ve muhtemel hasar arasındaki ilişki.....	61
Çizelge 2.12. Arazi emmesi, plastisite indisi ve likit limite bağlı şişen zemin sınıflandırılması.....	63
Çizelge 2.13. Şev göçme potansiyelinin değerlendirilmesi için gerekli faktörler ve ağırlıkları.....	67
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan numunelerin tanımlanması.....	76
Çizelge 4.1. Sıkıştırılmış numunelerin ödometre deney yöntemi ile ölçülmüş emme kapasitesi ve şişme deney sonuçları.....	108
Çizelge 4.2. Emme kapasitesi tahmini için oluşturulmuş bulanık model kuralları..	115
Çizelge 4.3. Şişme basıncı tahmini için oluşturulmuş bulanık model kuralları.....	118
Çizelge 4.4. Deney sonuçları, bulanık modelden tahmin edilen sonuçlar ve hata miktarları.....	122

1. GİRİŞ

Geoteknik Mühendisliğinde, yüksek şişme potansiyeli ve onu etkileyen en önemli parametrelerden biri olan emme kapasitesi, özellikle doygun olmayan zeminlerde karşılaşılan bir mühendislik problemidir. Su muhtevasında meydana gelen bir değişiklik, büyük hacim değişimi gösterebilen killer, özellikle havaalanı, karayolu vb. hafif yapıların altında ve su yapılarında önemli problemlere neden olmaktadır.

Jones ve Holtz (1973), A.B.D.'de şişen zeminlerin yol açtığı hasar nedeniyle yapılan harcamaların, tüm doğal felaketlerin yol açtığı hasar nedeniyle yapılanın iki katı olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum, problemin maddi boyutunun göz ardı edilemeyecek ölçüde büyük olduğunu göstermektedir.

Dünyada pek çok ülke şişen zemin problemleriyle karşı karşıyadır. Bu ülkelerden bazıları; Avustralya, Arjantin, A.B.D., Burma, Çin, Küba, Etiyopya, Gana, İngiltere, Hindistan, İran, İsrail, Kenya, Meksika, Güney Afrika, İspanya, Venezuela ve Türkiye olarak sıralanmaktadır. Dünyanın bir çok bölgesini etkileyen bir problem olması nedeniyle; emme kapasitesinin ve gerilmesinin belirlenmesi, şişme potansiyelinin belirlenmesi ve kabarma miktarının tahmini ile ilgili teorik ve deneysel birçok çalışma yapılmış ve yapılmaktadır.

1.1. Konunun Tanıtılması ve Önemi

Zeminlerin su emme kapasitesi, yer altı su seviyesinin üzerinde kalan kesimlerinde ve atmosfer basıncının altında bir basınçta su tutma yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Zemin içerisindeki suyu çıkartabilmek için zemine uygulanması gereken basınç ise zemin su emme basıncı olarak adlandırılmaktadır. Zemin su emme basıncı zeminin fiziksel davranışını ve kil mineralleri ile su arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

Zemin emmesi, matris ve ozmotik emme bileşenlerinden oluşmaktadır. Ozmotik emme, zeminin kimyasal aktivitesinden dolayı, su molekülleri üzerindeki kuvvetlerin bir sonucudur. Ozmotik emme gerilmesi; zemin suyu içerisinde çözünmüş, zemin

suyunun termodinamik özelliklerini etkileyen ve potansiyel enerjisini düşüren kanyonlar tarafından oluşturulmaktadır. Matris emme gerilmesi ise, zemindeki boşluk büyüklüklerine bağlı olan kılcallık emme gerilmesinden ve kil danelerinin yüzeylerinde bulunan elektriksel çekim kuvvetlerinden oluşur.

Geoteknik mühendisliğindeki pek çok pratik uygulama için, toplam emmedeki değişikliklerin matris emme değişiminden kaynaklandığı, ozmotik emmede ise önemli değişikliklerin oluşmadığı ifade edilmiştir. Zeminin mekanik davranışının matris emme tarafından kontrol edildiği belirtilmiştir.

Zeminin emmesine etki eden faktörler; zemin cinsi, kuru birim hacim ağırlık, boşluk çapı, başlangıç su muhtevası, danelerin yapısı ve büyüklüğü, zeminin permeabilitesi, su muhtevası, zemindeki su akımının hızı, kuruma ve ıslanma tarihçesi, tabii veya sıkıştırılmış zemin olması olarak sıralanabilir. Zeminin su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı zeminin emme kapasitesini etkileyen önemli faktörlerdendir. Kuru birim hacim ağırlık arttıkça boşluk oranı azalacağı için emme kapasitesi de azalmaktadır. Aynı başlangıç su muhtevasında ve aynı kuru birim hacim ağırlıktaki zeminlerin emme kapasiteleri farklı minerolojik yapıya sahip olmaları sebebiyle birbirinden farklıdır. Kil fraksiyonu, plastisite indisi ve likit limit arttıkça emme kapasitesi artmaktadır.

Matris emme ile su muhtevası arasında çizilen ilişkilere, zemin-su karakteristik eğrileri denilmekte ve bu eğrilerin şekli emmeye etki eden faktörlerden etkilenmektedir. Zemin-su karakteristik eğrisi, zeminin bazı mühendislik parametrelerinin (kayma mukavemeti parametreleri, permeabilite v.b.) tahmininde kullanıldığı için bu eğrilerin çok iyi karakterize edilmesi gerekmektedir. Zemin emmesinin belirlenmesi için, laboratuvar ve arazide yapılabilen birçok deney mevcuttur. Tensiyometreler, basınç plakaları, termal matris potansiyel ölçerler, filtre kağıdı metotları, ödometre metotları v.b. ile zemin emmesi belirlenebilmektedir.

Killi zeminlerin, su emerek hacimlerinin artması ya da hacim artışının engellenmesi durumunda, aşırı basınç göstermeleri zeminlerin şişme karakteristikleri olarak bilinir.

Şişme karakteristikleri denildiğinde şişme basıncı ve şişme yüzdesi akla gelir. Tabii haldeki veya laboratuarda sıkıştırılmış bir zemin numunesinin, belirli bir yük altında suya doygun hale gelene kadar oluşan hacim artışının başlangıç hacmine oranına şişme potansiyeli denilmektedir. Şişme potansiyeline sahip bir zeminde meydana gelecek hacim değişikliğine engel olabilecek basınç ise şişme basıncıdır.

Bir zeminin şişme potansiyeline etki eden bir çok faktör vardır. Zeminin ihtiva ettiği kil yüzdesi ve minerolojik yapısı, arazideki gerilme şartları, kuru birim hacim ağırlık ve danelerin yerleşim biçimi, başlangıç su muhtevası ve doygunluk derecesi, emme basıncı, permeabilite, şişen zemin tabakasının kalınlığı ve derinliği, dış yükler, iklim şartları ve sıkıştırılmış zeminler için kompaksiyon metodu v.b. bunlar arasında sayılabilir.

Killi bir zeminin plastisitesi, kil fraksiyonu, şişen tabakanın kalınlığı ve kuru birim hacim ağırlığı, zeminin şişme potansiyelini etkilemektedir. Başlangıç su muhtevası arttığında ise şişme potansiyeli azalmaktadır. Zemin suyunun kimyasal yapısı şişmeyi oldukça etkilemektedir. Zemin suyunun katyon konsantrasyonu ve katyon valansının artması ile şişme artmaktadır. Uygulanan sürşarj yükü arttığında şişme yüzdesi azalmakta, şişme basıncı ise çok fazla etkilenmemektedir.

Zeminin şişme potansiyeli; minerolojik metotlar, kıvam limitleri, PVC yöntemi, aktivite yöntemi, emme basıncı yöntemi gibi dolaylı metotlar ve en yaygın olarak kullanılan doğrudan ölçüm tekniği olan bir boyutlu konsolidasyon yöntemi ile belirlenebilir.

Zeminler, çok fazlı olmaları, davranışlarının lineer olmaması, özelliklerinin hem yatay hem de düşey yönde değişmesi, farklı noktalarda özelliklerinin değişmesi ve mühendislik davranışları üzerinde bünyesel özellikler (porozite, kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası vb.), sismik geçmiş ve gerilme geçmişi gibi birçok faktörün etkili olması nedeniyle, mühendislik özelliklerinin tanımlanması oldukça zor malzemelerdir. Bu nedenlerle, zeminin mühendislik parametrelerinin

tanımlanmasında ortaya çıkan belirsizlikler nedeniyle bulanık mantık kullanılabilmektedir.

Günlük hayatta kesin olarak bilinemeyen çeşitli durumlar ve problemlerle karşılaşılır. Belirsiz ve kesin olmayan konular hakkındaki yorumlamaların belirsiz (bulanık) olduğu söylenebilir. Bir konu hakkında ne kadar çok bilgi olursa, bulanıklık da o derece azalır. Mühendislik araştırmaları ve modellemelerinde, çeşitli kavramlara kesinlik kazandırmak için değişik kabuller ve varsayımlar yapılmaktadır. Bu kabuller ve varsayımlar; problemin çözülmesini kolay ve uygulanabilir yapar. Sonuçta, problemin çözümü ideal şartlar için gerçekleştirilmiş yaklaşık çözümler olmaktadır.

Bir problemin çözümünde, bulanık olan ve olmayan bütün girdi ve çıktı bilgileri, sistem çözümüne dahil edilmelidir. Zadeh (1965), belirsizliklerle dolu olan bir sistemin çözümünde Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) isimli bir modelleme tekniğini geliştirmiştir. Zadeh 'in geliştirdiği bulanık mantık modellemesinde, belirsizliklerin bile güvenilir olarak ele alınması bu tekniğin ana fikrini oluşturmaktadır.

Bir elemanın herhangi bir kümeye ait olup olmaması, o kümenin karakteristik değeri ile ilgilidir. Klasik küme teorisinde, karakteristik değer, her elemanın $(0,1)$ kümesine ait olmamasını açıklar. Yani, o kümenin elemanı olanlar (1) , olmayanlar ise (0) üyelik derecelerine sahiptir. Eğer sistemin sınırları ve kriterleri iyi tanımlanmış ve elemanları da soyut olursa, klasik mantık iyi bir yaklaşım olur. Ancak, daha karışık ve belirsiz bir kümeyi belirgin kümelerle oluşturmak mümkün olmayacaktır. Bu karışık ve belirsiz olan kümede, her bir elemanın herhangi bir kümeye aitliği $(0,1)$ sürekli aralığındaki karakteristik değer ile belirtilir. Aitlik derecesini gösteren bu karakteristik değer, bulanık küme tanımında üyelik fonksiyonu olarak ifade edilir. Üyelik fonksiyonu, yeni tanımlanan, bulanık küme adı verilen kümeyi, belirgin kümelerden ayırmaktadır.

Bulanık sistemler, teorik ve matematik aksiyomlu yaklaşımlardan bağımsız bir çözüm algoritması temsil ettiğinden, bir sistemin modellenmesinde yaklaşık ve kolay

özölürlük verirler. Ayrıca, elde edilebilen tüm sayısal ve sözel bilgiler de çözüm algoritmasına katılarak daha kolay ve daha anlamlı özömlere varılabilmektedir. Bu bakımdan, bulanık mantık yöntemi uzman kişilerin de vereceği sözel bilgileri işleyerek toptan özöme gitmeye yarayan bir modelleme yöntemidir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Zemin üç fazlı, homojen ve izotrop olmayan bir yapıya sahiptir. Bu özelliğinden dolayı zeminler, birçok belirsizlikler taşımaktadır. Zeminin emme ve şişme davranışı diğer zemin davranışlarında da (gerilme-şekil değıştirme, konsolidasyon) görüldüğü gibi lineer olmama özelliğine sahiptir ve birçok faktöre bağılıdır. Zeminlerin emme ve şişme davranışları, etki eden faktörlerin çok olması ve zeminin özelliklerinden dolayı aynı belirsizlikleri taşımaktadır.

Belirsizliklerin hakim olduğı problemlerin çözümünde, bulanık mantık modelleme tekniğı kullanılmaktadır. Sözel belirsizlikleri içeren bulanık kurallar, farklı sahalarda geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bulanık model uygulama alanları; hesaplama, tahmin, kontrol, öğretilbilir sistemlerin dizaynı ve optimizasyonun kullanıldığı inşaat, kimya, endüstri mühendislikleri gibi mühendislik dalları olarak sayılabilir. Belirsizliklerin hakim olduğı zemin özelliklerinin, bulanık kurallar kullanılarak irdelenmesi ile ilgili çalışmalara son yıllarda sıkça rastlanılmaktadır.

Bu çalışmada, sıkıştırılmış killerin emme kapasitelerinin ve şişme basınçlarının bulanık mantık yöntemi kullanılarak tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, çalışmanın ilk kısmında farklı plastisite indisine sahip killer üzerinde ödometre yöntemiyle emme kapasitesi ve şişme deneyleri yapılarak, plastisite indisinin, kuru birim hacim ağırlığın ve başlangıç su muhtevasının etkisi dikkate alınmıştır. Bu çalışmada sıkıştırılmış killi zemin numuneleri kullanılmıştır. Bu amaçla, farklı plastisite indisine sahip kil numuneleri, farklı kuru birim hacim ağırlıkta, farklı başlangıç su muhtevasında olacak şekilde kompaksiyonla hazırlanmışlardır. Bu numuneler üzerinde ödometre deney sistemi kullanılarak emme kapasitesi, serbest şişme ve sabit deformasyonlu şişme deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamada, emme kapasitesinin ve şişme basıncının bulanık mantık yöntemiyle belirlenmesi

hedeflenmiştir. Girdi olarak düşünölen, plastisite indisi, kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevası değeri bulanık alt kümelere ayrılmıştır. Çıktı olarak ise, emme kapasitesi ve şişme basıncı düşünölmüş ve bulanık alt kümelere ayrılmıştır. Daha sonra oluşturulan bulanık kurallar Fortran 5.1 programlama dilinde yazılmıştır. Sonuçta emme kapasiteleri ve şişme basınçları tahmin edilmiştir. Bulanık modelden elde edilen emme kapasitesi ve şişme basınçları ile deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümde, zeminlerin emme ve şişme özelliklerinin belirlenmesiyle ilgili daha önceden yapılan çalışmalara, geoteknik mühendisliğinde bulanık mantık kullanılarak yapılan araştırmalara yer verilmiştir.

Üçüncü bölüm materyal ve metot olarak düzenlenmiştir. Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmalar ve bulanık modelin uygulanması sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, deneysel sonuçlar, bulanık kuralların yazılmasından oluşturulmuş programın akış şeması ve modelin sonuçları verilmiştir.

Beşinci bölümde, deney sonuçları ile model sonuçları, çalışmanın amacına uygun olarak karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

2. KAYNAK BİLGİSİ

2.1. Giriş

Dünyanın bir çok bölgesinde, özellikle kurak ve yarı kurak alanlarda, şişen killi zeminlere rastlanılmaktadır. Bu tür zeminlerde, su muhtevsındaki yükselmeye bağlı olarak önemli hacim artışları meydana gelmekte bu da çeşitli mühendislik yapılarında önemli hasarlara neden olmaktadır. Jones ve Holtz (1973), Amerika Birleşik Devletlerinde zeminlerin şişme ve büzülme problemlerinden dolayı az katlı bina, yol ve su borusu gibi yapılarda her yıl $2.3 \cdot 10^6$ dolar hasar olduğunu, bu zararın taşkın, kasırga, deprem gibi tabii afetlerden 2 kat daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, Snethen (1986) şişen zeminleri gizli hastalık olarak adlandırmış ve şişmeden dolayı ortaya çıkan hacim artışının mühendislik yapılarında ekonomik olarak çok pahalı zararlara neden olduğunu ifade etmiştir.

Homojen ve izotrop olmayan bir malzeme olan zemin, bünyesinde farklı oranlarda su bulundurmaktadır. Bu da zeminin mühendislik özelliklerini etkileyen çok önemli bir faktördür. Bear (1979), zeminin suya doygunluk durumlarını pandüler, füniküler ve insüler doygun olarak üç bölgeye ayırmıştır (Şekil 2.1). Zeminin pandüler doygun durumdayken, çok düşük doygunluk derecesine sahip olduğunu ve suyun, yalnızca dane çevresinde oluşmuş menisküslerde tutulduğunu, ancak bunun sürekli bir su fazını teşkil etmediğini belirtmiştir. Zeminde su doygunluğunun artmasıyla, sürekli bir su fazının meydana geldiğini, böylelikle hem su ve hem de hava fazının sürekli olduğunu belirterek bu doygunluğa füniküler doygunluk denildiğini ifade etmiştir. Ayrıca, pandüler ve füniküler doygunluk durumlarında zeminin mekanik davranışının kapiler kuvvetler tarafından kontrol edildiğini belirtmiştir. Su muhtevasının iyice artması ile boşluklardaki havanın azalacağını ve bazı hava parçacıklarının su ile çevrili olarak kalacağını ifade ederek, bu durumu insüler doygunluk durumu olarak adlandırmıştır. İnsüler doygunluk durumunda, zemin davranışının tam doygunluk için geçerli olan Terzaghi efektif gerilme prensibi ile açıklanabileceğini de belirtmiştir.

gerilme durumunun büyüklüğünü de etkilemektedir. Düşük birim hacim ağırlıklarda ve yüksek su muhtevalarında optimumun ıslak tarafında kalacak şekilde sıkıştırılmış zemin numuneleri, optimumun kuru tarafında sıkıştırılan zemin numunelerine göre, daha düşük matris emmeye sahip olmaktadır (Fredlund ve Rahardjio, 1993). Zeminin plastisitesi ve kuru birim hacim ağırlığı gibi ölçülmesi kolay olan özelliklerinin zeminin şişme potansiyelini yansıtmakta olduğu belirtilmektedir (Nelson ve Miller, 1992).

Su ile temas etmeleri durumunda önemli hacim değişimi gösterebilen zeminler üzerine inşa edilen, özellikle az katlı hafif yapılarda, karayolu ve havaalanı kaplamalarında, sulama kanallarında, boru hatlarında veya arkasında bu tür zeminleri tutan istinad yapılarında, zemindeki hacim değişikliği nedeniyle çok önemli boyutlarda hasarlar meydana gelebilmektedir. Karayolu ve havaalanı kaplamaları altında genellikle tabii zemin yerine, sıkıştırılmış zeminler yer almaktadır. Sıkıştırılmış zeminlerin şişme davranışları ise başlangıç su muhtevasına ve kuru birim hacim ağırlığına, sıkıştırma metoduna, sürdsarj basıncına, tabaka kalınlığına ve zamana bağlı olarak değişmektedir. Lambe (1958), sıkıştırılmış zemin numunelerinin hazırlanması sırasında farklı kompaksiyon enerjisi uygulandığı için numunelerin yapısının aynı olmadığını belirtmiştir. Farklı derinliklerde ve değişik kompaksiyon dereceleri ile sıkıştırılmış dolguların kullanıldığı yapılardaki zeminin davranışını belirlemek için yapılan deneylerde, sıkıştırılmış zemin numuneleri kullanılması gerektiğini ifade etmiştir.

Önemli bir zemin problemi olan şişmenin ve şişmeye neden olan emmenin önceden belirlenmesi gerekmektedir. Bu şekilde, gerekli önlemler önceden alınabilecektir. Aşağıdaki bölümde, zeminlerin su emme ve şişme problemleriyle ilgili yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. Ayrıca, geoteknik mühendisliğindeki problemlerin çözümünde uygulanmış olan ve literatürde yer alan bulanık mantık modeli ile ilgili çalışmalar ile diğer teorik modelleme çalışmalarına yer verilmiştir.

2.2. Zeminlerin Su Emme Özellikleri İle İlgili Çalışmalar

Zeminin su emme teorisi, 1900 'lü yılların başında zemin fiziğinde zemin-su-bitki sisteminin incelenmesine bağlı olarak gelişmiştir (Buckingham, 1907; Gardner ve Widtsoe, 1921). Edlefsen ve Anderson (1943) zemin emmesini, zemindeki suyun serbest enerji hali olarak tanımlamışlardır. Richards (1965), zemin suyundaki serbest enerjinin zemin suyunun kısmi buhar basıncına bağlı olarak ölçülebildiğini ifade etmiştir.

Aitchison (1965), toplam emmeyi, zemin-su karışımındaki su buharı kısmi basıncının ölçümünden elde edilen emme olarak tanımlamıştır. Toplam emmeyi (ψ) aşağıdaki gibi ifade etmiştir:

$$\psi = (u_a - u_w) + \Omega \quad (2.1)$$

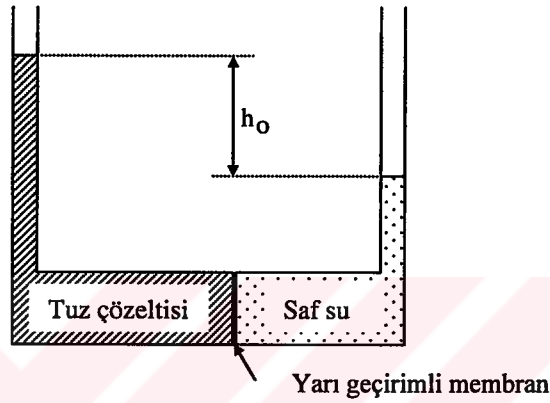
Burada, $(u_a - u_w)$ matris emmeyi; u_a boşluk hava basıncını; u_w boşluk suyu basıncını ve Ω ise, ozmotik emmeyi göstermektedir.

Toplam emmenin bileşenlerinden olan ozmotik emme, zeminin kimyasal aktivitesinden dolayı, su molekülleri üzerindeki kuvvetlerin bir sonucudur. Ozmotik emme, zemin suyu ile karışmış durumdaki bir solüsyonla dengedeki su buharının kısmi basıncının ölçülmesinden elde edilen emme olarak tanımlanmıştır (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Nelson ve Miller (1992), ozmotik basıncın oluşumunu Şekil 2.2 'deki gibi göstermişlerdir. Burada, iç içe girmiş iki kabın arasında saf su ile tuz çözeltisi birbirinden yarı geçirimli bir membran ile ayrılmıştır. Çözeltinin konsantrasyonu, saf su moleküllerinin çekilmesine neden olmakta ve böylece, yarı geçirimli membrandan çözeltiye doğru bir saf su akımı başlamaktadır. Çözeltideki ozmotik kuvvetler dengede olduğu zaman, çözelti ile saf su arasında bir hidrostatik yük (h_0), oluşmaktadır. Bu yükten dolayı oluşan basınca da ozmotik basınç (Ω) denilmekte ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$\Omega = \rho_s g h_0 = RT[C_s] \quad (2.2)$$

Burada, ρ_s çözeltinin yoğunluğu, g yerçekimi ivmesi, R universal gaz sabiti, T ortalama sıcaklık ve $[C_s]$ çözeltinin molar konsantrasyonu'dur. Nelson ve Miller, (1992), killi zemin- su davranışındaki bu konunun yayımlı çift tabaka teorisi ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir.

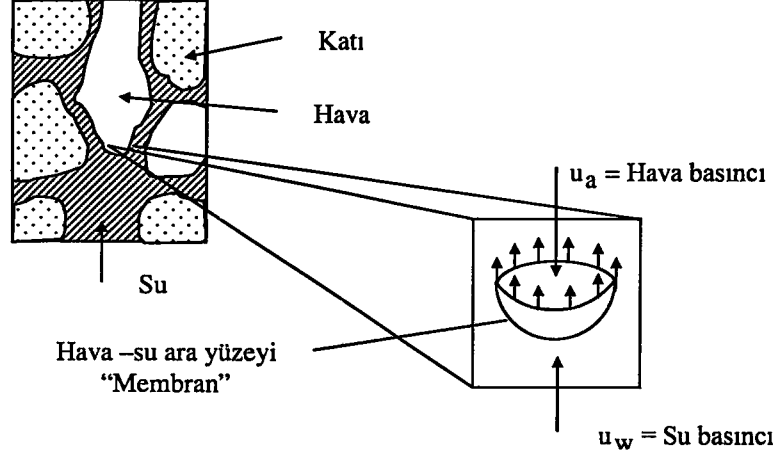


Şekil 2.2. Yarı geçirimli bir membran yardımıyla ozmotik basıncın oluşumu
(Nelson ve Miller, 1992)

Toplam emmenin diğer bir bileşeni olan matris emme, zemin-su solüsyonuna batırılmış kapiler bir tüpte dengeye ulaşmış boşluk hava basıncı ile boşluk suyu basıncı arasındaki farka eşittir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Zemin emmesinin matris emme bileşeni, genellikle kapilerite olayı ile ilgilidir. Zeminlerde emme ve kapiler kuvvetler arasındaki ilişkiyi anlamak için, öncelikle doymun olmayan bir zeminde meydana gelen su-hava ara yüzeyinin (kontraktıl skin tabakası) davranışının bilinmesi gerekmektedir. Doymun olmayan bir zeminde oluşan su-hava ara yüzeyi Şekil 2.3 'de görülmektedir.

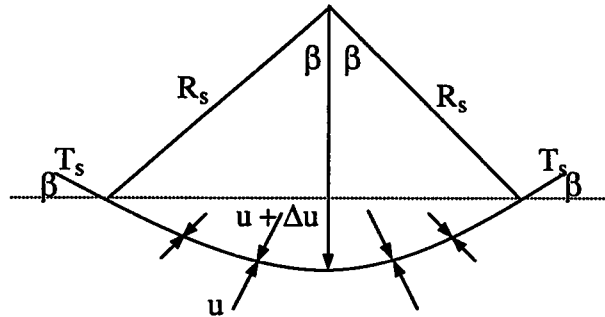
Hava fazı sürekli olduğu zaman, kontraktıl skin zemin daneleri ile ilişki halindedir bu da zeminin mekanik davranışını etkilemektedir. Kontraktıl skinin yoğunluğu az, ısı iletkenliği fazladır. Kontraktıl skinin en belirleyici özelliği, onun çekme gerilmesine sahip olması ve zemindeki bir gerilme altında elastik bir membran gibi

davranmasıdır. Kontraktıl skinin pek çok özelliği sürekli su fazına göre farklılık gösterir. Bu tabaka, kalınlığı az olduğu için birleştirilmiş faz diyagramında su fazının bir parçası olarak düşünülür (Davies ve Rideal, 1963).



Şekil 2.3. Zemindeki hava-su ara yüzeyi (Kontraktıl skin tabakası)
(Nelson ve Miller, 1992)

Fredlund ve Rahardjio (1993), kontraktıl skindeki yüzeysel gerilimi Şekil 2.4 'deki gibi göstermişler ve kontraktıl skindeki yüzeysel gerilmelerinin elastik bir membran gibi davrandığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.4. Hava-su ara yüzeyinde yüzeysel gerilim olayı
(Fredlund ve Rahardjio, 1993)

Bu şekilde, u ve $u + \Delta u$ membran üzerindeki basınçlar, R_s membranın yarıçapı, T_s yüzey gerilmesi ve β hava-su ara yüzeyinin yatayla yaptığı açıdır. Membran üzerindeki yatay kuvvetler birbirini dengelemekte, buna karşın düşey yöndeki kuvvetlerin dengesi ise aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$2T_s \sin \beta = 2\Delta u R_s \sin \beta \quad (2.3)$$

Burada, $2R_s \sin \beta$ yatay düzlem üzerinde maruz kalınan membranın uzunluğudur. Denklem 2.3 yeniden düzenlenirse, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4, R_s yarıçaplı ve T_s yüzey gerilmeli iki boyutlu eğrisel bir yüzeyde (kontraktil skin tabakasında) basınç farkını verir. Üç boyutlu membran için, Denklem 2.4 aşağıdaki gibi genişletilebilir.

$$\Delta u = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.5)$$

Burada R_1 ve R_2 iki ortogonal ana düzlemde membranın eğrilik yarıçaplarıdır. Eğrilik yarıçapı bütün yönlerde aynı olduğunda, ($R_1 = R_2 = R_s$), Denklem 2.5 aşağıdaki bağıntıya dönüşür.

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.6)$$

Doygun olmayan bir zeminde kontraktil skin, boşluk su basıncından (u_w), daha büyük bir hava basıncına (u_a), maruz kalır. Bu basınç farkı ($u_a - u_w$), matris emme olarak adlandırılır ve matris emme aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.7)$$

Zemin emme basıncının ölçümünde yaygın olarak kullanılan metotlar, ölçülebilen emme bileşenleri, basınç aralıkları, bu metotların avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1 'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yaygın olarak kullanılan emme ölçüm metotlarının karşılaştırılması (Fredlund ve Rahardjo, 1993)

Deney metodu	Emme bileşeni	Basınç aralığı (kPa)	Avantajları	Dezavantajları
Tensiyometre	Matris	0-80	Ticari olarak uygun	Düşük emme aralığı
Eksenel geçiş Tekniği (Basınç plakaları)	Matris	0-15000	Ticari olarak uygun	Deney için 2-10 gün gereklidir. Pahalıdır. Kaba daneli zeminler için daha uygundur. Islanma-kuruma aşamaları belirsiz.
Filtre kağıdı sensörleri	Toplam	0-10 ⁶	Bütün basınç aralıklarında ölçüm yapılabilir. Ucuzdur. Özel alet gerektirmez. Basittir.	Deney için 7 gün gerekir. Çok hassasiyet gereklidir.
Thermocouple Saykrometreler(TCP)	Toplam	0-10 ⁶	Arazi ve laboratuvarında uygulanabilir. Bütün zeminler için uygundur. Ticari olarak uygun ve ucuzdur.	Sıcaklık kalibrasyonu gereklidir. Çok ıslak zeminde uygulanamaz. Deney için 2-7 gün gereklidir.
Termal	Matris	0-200	Ticari olarak uygun ve kolaydır.	Düşük emme aralığı

Basınç plakası ile yapılan deneylerde, zemin numuneleri yüksek hava giriş basıncı plakasının üzerine yerleştirilir ve boşluk hava basıncı u_a , ve boşluk suyu basıncı u_w , değerleri belirlenir. Filtre kağıdı metodunda ise, kalibre edilmiş filtre kağıdına sarılmış bir zemin numunesi paslanmaz malzemeden yapılmış kapalı bir kap içerisine yerleştirilir. Filtre kağıdı zemin ile direk temasta olmamalıdır. Zemin numunesi ve filtre kağıdı sabit sıcaklıkta en az 7 gün bekletildikten sonra, filtre kağıdı alınır ve su muhtevası belirlenir. Bu metodun prensibi, kap içerisindeki relatif nemliliğin, zeminin su muhtevası ve emme tarafından kontrol edilmesine dayanmaktadır. Filtre kağıdı, kap içerisindeki relatif nemlilik dengeye ulaşmaya kadar, suyu adsorbe edecektir. Kaptaki relatif nemlilik, filtre kağıdı ve zemin suyu arasında denge oluştuktan sonra, filtre kağıdındaki emme, zemindeki ile aynı olacaktır. Bu durumda

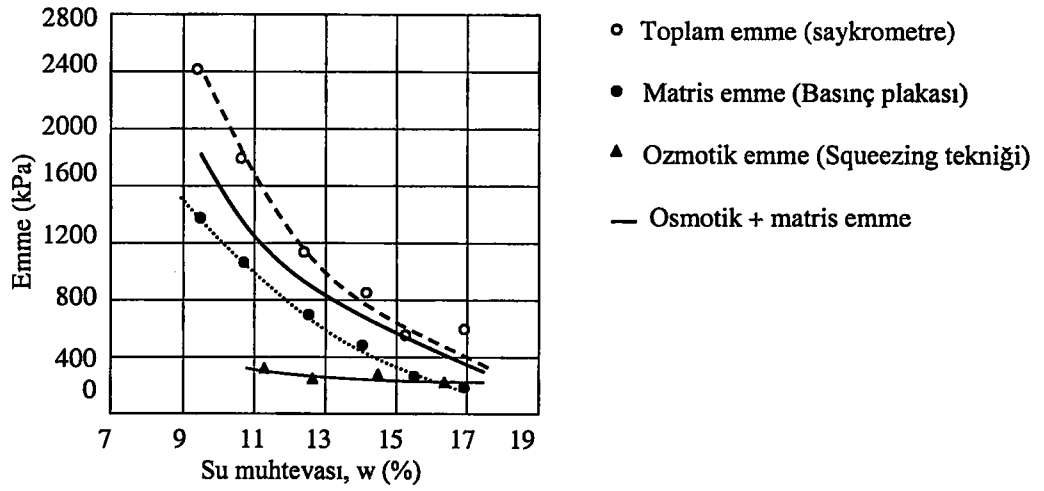
nemlilik, zemin emmesinin matris ve ozmotik bileşenleri tarafından kontrol edilmektedir. Filtre kağıdı tekniği ile toplam emme ölçülebilmektedir. Kullanılan bazı filtre kağıtları için kalibrasyon eğrileri literatürde mevcuttur (Nelson ve Miller, 1992).

Saykrometreler, zemin boşluklarındaki hava fazının relatif nemliliğini ölçerek, zeminin toplam emmesini belirlemekte kullanılırlar. Wet-loop tipi ve Peltier tipi olmak üzere iki çeşidi vardır. Her ikisinin de çalışma prensibi, buharlaşan yüzey ve buharlaşmayan yüzey arasındaki sıcaklık farkına dayanmaktadır. Bu yüzeyler arasındaki sıcaklıkların farkı relatif nemlilikle ilgilidir. Saykrometrelerin bilinen emme değerleri kullanılarak kalibre edilmesi gerekmektedir. Saykrometreler genellikle zemindeki yüksek emmeleri ölçmek için kullanılmaktadır. Saykrometre ile laboratuvarında ölçüm yapılabilir, arazi ölçümleri ise yeterli güvenilirliğe sahip değildir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Termal matris potansiyel ölçerler ise, poroz bir seramik malzeme üzerine yerleştirilen zeminin hacimsel su muhtevası değişimiyle doğrudan ilişkili bu seramik malzemenin termal kondüktivitesinin belirlenmesi prensibine dayanır. Poroz bir seramikten ısı dağılımının hızı ölçülerek, seramiğin su muhtevası belirlenebilir. Seramiğin su muhtevası, matris emmenin bir fonksiyonudur. Bu alet, emme- su muhtevası ilişkisini belirlemek için basınç plakası aleti kullanılarak kalibre edilebilir. Termal matris potansiyel ölçerler; zemin tipinden, çözünmüş tuzlardan ve sıcaklıktan bağımsız olarak ölçüm yapabilirler (Nelson ve Miller, 1992).

Krahn ve Fredlund (1972), geoteknik mühendisliğindeki pek çok pratik uygulama için, toplam emmedeki değişikliklerin matris emme değişiminden kaynaklandığını, ozmotik emmede ise önemli değişikliklerin oluşmadığı ifade etmişlerdir. Bu durum, farklı ölçme teknikleriyle araştırılıp Şekil 2.5 'deki gibi verilmiştir.

Yazarlar bunu, pratikteki su muhtevası aralığında adsorbe katyonların hidrate olmuş olması ve bu su muhtevasında ozmotik kuvvetlerin neredeyse sabit kalması şeklinde açıklamışlardır.



Şekil 2.5. Glacial till için toplam, matris ve osmotik emme
(Krahn ve Fredlund, 1972)

Sattler ve Fredlund (1989), laboratuvarında matris emme ölçümü için termal kondüktivite aletlerinin kullanımını açıklamışlar ve matris emme ölçümlerini analiz etmişlerdir. Ridley ve Burland (1993), zemin emmesinin ölçülmesi için, tensiyometre ve basınç plakası aletlerinden farklı olarak, daha az miktarda suyun kullanıldığı bir basınç transduseri geliştirmişlerdir. Bu aletle, 1500 kPa 'a varan zemin emmelerinin 5 dak. gibi kısa bir zamana direkt olarak ölçülebildiğini belirtmişlerdir.

Conciani vd. (1996) çalışmalarında, matris emme ölçümleri için Time Domain Reflectometre (TDR) kullanmışlardır. TDR de zemin ortamındaki su miktarının, yüksek sıklıklı elektromagnetik ışınların yayılma hızına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Dielektrik sabiti ile, kütleli su muhtevası ve matris emme ilişkilerini incelemişler, dielektrik sabiti arttıkça su muhtevasının arttığını, matris potansiyelinin ise azaldığını kaydetmişlerdir. Arazide tensiyometre ölçümleri ile belirlenen emme değerleriyle, TDR ile yaptıkları emme ölçümü sonuçlarını karşılaştırmışlar ve yapılan ölçümlerin uyuştuğunu göstermişlerdir.

Guan ve Fredlund (1997), yüksek zemin emme gerilmesinin direkt olarak ölçümü için, suyun gerilme direncinin kullanımını araştırmışlardır. Suyun gerilme direncinin, yüksek zemin emme gerilmelerini direkt olarak belirlemede kullanılabileceğini

belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada geliştirilen emme probu ile hem doygun hem de doygun olmayan zeminlerdeki 1250 kPa 'ın üzerindeki matris emmelerin ölçülebileceğini ifade etmişlerdir.

2.2.1. Doygun olmayan zeminlerdeki gerilme durumları

Doygun zemin mekaniği davranışının açıklanmasında, tek bir gerilme durum değişikliği yeterli olurken, doygun olmayan zemin davranışını belirlemek daha karmaşıktır. Doygun zeminlerin davranışında, efektif gerilme kabulü kullanılmaktadır. Doygun bir zemin için gerilme durum değişikliği aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2.8)$$

Burada σ' efektif normal gerilme, σ toplam normal gerilme ve u_w ise boşluk suyu basıncıdır.

Croney vd (1958) çalışmalarında, doygun olmayan zeminler için aşağıdaki efektif gerilme denklemini önermişlerdir.

$$\sigma' = \sigma - \beta' u_w \quad (2.9)$$

Burada β' zeminin kayma mukavemetinin etkili olduğu gerilme altında, bağ sayılarının ölçümünü gösteren bir katsayıdır.

Bishop (1959) ise, doygun olmayan zeminler için aşağıdaki denklemi önermiştir.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.10)$$

Burada, χ zeminin doygunluk derecesiyle ilgili bir parametredir. χ doygun zeminde 1, kuru zeminde 0 olarak alınır. Blight (1961), sıkıştırılmış zeminler için χ ile

doymunluk derecesinin değişimini incelemiş ve bu parametrenin, zemin tipinden oldukça fazla etkilendiğini belirtmiştir.

Aitchison (1961) ise aşağıdaki efektif gerilme denklemini önermiştir.

$$\sigma' = \sigma + \psi p'' \quad (2.11)$$

Burada, ψ , 0 ile 1 arasında değişen bir parametre; p'' boşluk suyu basıncı tanımlayıcısıdır.

Jennings (1961) de, doymun olmayan zeminler için aşağıdaki denklemi vermiştir.

$$\sigma' = \sigma + \beta p'' \quad (2.12)$$

β , deneysel olarak ölçülmesi gereken istatistiksel bir faktördür. Yukarıdaki denklemlerin hepsinde, β' , χ , ψ ve β katsayıları eşit olduğu zaman aynı değer elde edilmektedir.

Pek çok araştırmacı, doymun olmayan zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerinin açıklanması için iki gerilme değişkeninin tanımlanması, $((\sigma - u_a)$ ve $(u_a - u_w))$, gerektiğini öne sürmüşler ve buna yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bishop ve Blight (1963), Denklem 2.10 'u yeniden ele alarak matris emme değişikliklerine dikkati çekmişlerdir. Efektif gerilmenin; net normal gerilmedeki bir değişimle aynı oranda değişirken, matris emmedeki değişiklikten aynı oranda etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Richards (1966), efektif gerilme denklemindeki emme bileşenlerini dikkate alarak aşağıdaki denklemi önermiştir.

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m (h_m + u_a) + \chi_s (h_s + u_a) \quad (2.13)$$

Burada, h_m matris emme, χ_m matris emme için efektif gerilme parametresi, χ_s çözeltinin matris emmesi için efektif gerilme parametresi ve h_s çözelti emmesi 'dir.

Khalili ve Khabbaz (1998), doymun olmayan zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesi için emme oranı ile efektif gerilme parametresi, χ^* , arasında tek bir ilişki vermeyi amaçlamış ve aşağıdaki denklemi önermişlerdir:

$$\chi^* = \frac{\tau - \tau_0}{(u_a - u_w) \tan \phi'} \quad (2.14)$$

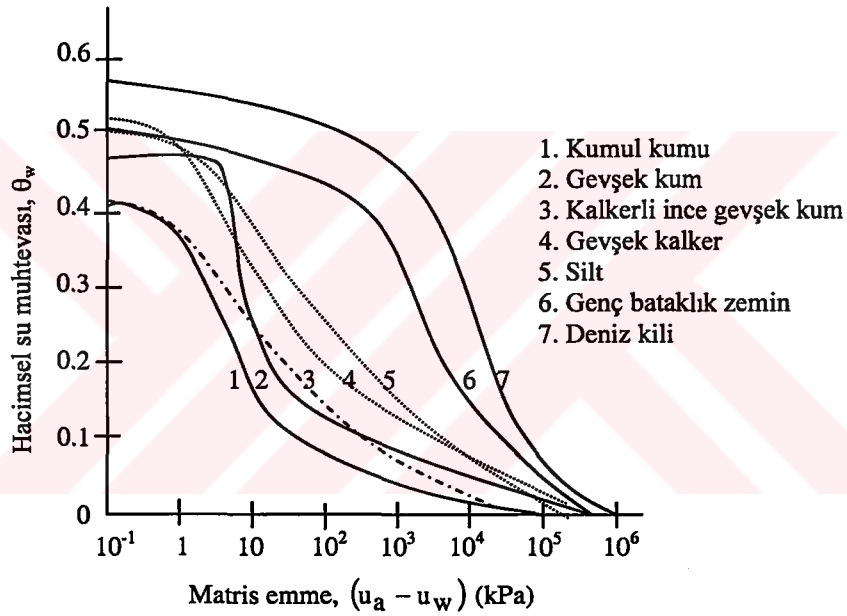
Burada, ϕ' efektif içsel sürtünme açısı, τ kayma mukavemeti ve τ_0 drenajlı kayma mukavemetidir. Khalili ve Khabbaz (1998), literatürden elde ettikleri matris emmeli kayma mukavemeti parametreleri verilerinden, χ^* 'nın değişimini araştırmışlar ve emmenin herhangi bir seviyesi için $\chi^* = a / b$ olduğunu belirtmişlerdir. Burada a , emme artışına bağlı olarak kayma mukavemetindeki artışı ve b ise $(u_a - u_w) \tan \phi'$ değerini göstermektedir. Buna göre Denklem 2.15 'i önermişlerdir.

$$\chi^* = \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right]^{-0.55} \quad (2.15)$$

Fredlund ve Morgenstern (1977), çok fazlı sürekli ortamlar mekaniğinde, doymun olmayan bir zeminin teorik olarak gerilme analizlerini vermişlerdir. Doymun olmayan zemin 4 fazlı bir sistem olarak düşünülmüş ve 1) $(\sigma - u_a)$ ve $(u_a - u_w)$, 2) $(\sigma - u_w)$ ve $(u_a - u_w)$, 3) $(\sigma - u_a)$ ve $(\sigma - u_w)$ şeklinde muhtemel 3 gerilme durum değişikliği önerilmiştir. Lloret vd (1980), Alonso vd. (1990), Bolzon vd. (1996), Tarantino vd. (2000) doymun olmayan zeminlerdeki gerilme durumları ile ilgili diğer çalışmalardır. Bu çalışmalarda da yine üç gerilme değişikliği önerilmiştir.

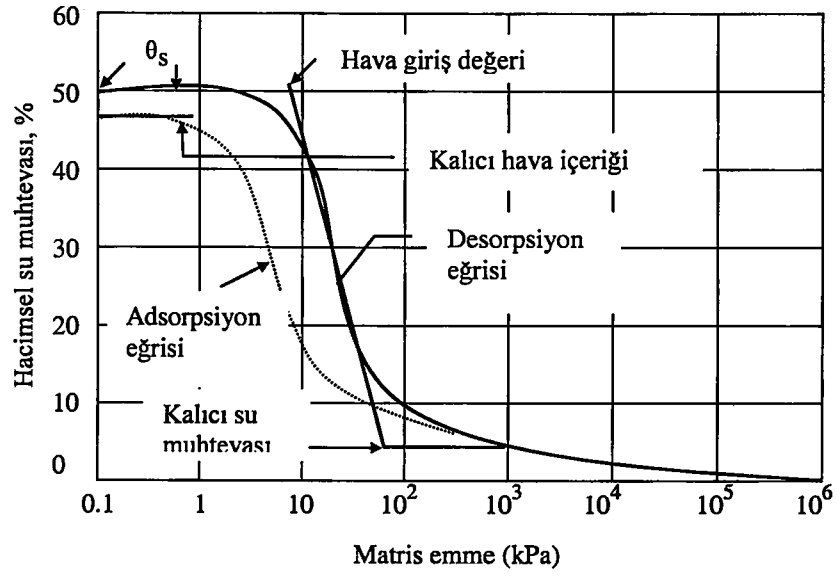
2.2.2. Zemin Cinsinin ve Başlangıç Koşullarının Zemin Emmesine Etkisi

Koorevaar vd. (1983), matris emme ile su muhtevası arasındaki ilişkilerin, yani zemin-su karakteristik eğrilerinin, zemin cinsine bağlı olarak değiştiğini göstermişlerdir. Şekil 2.8 'den de görüleceği üzere, aynı hacimsel su muhtevastaki farklı zeminlerin matris emmeleri birbirinden oldukça farklılık göstermektedir. Örneğin, %20 oranında hacimsel su muhtevasına sahip, gevşek siltli bir zeminin matris emme basıncı 10^3 kPa iken, aynı hacimsel su muhtevasına sahip deniz kilinin matris emme basıncı değeri 10^5 kPa 'a çıkmaktadır.



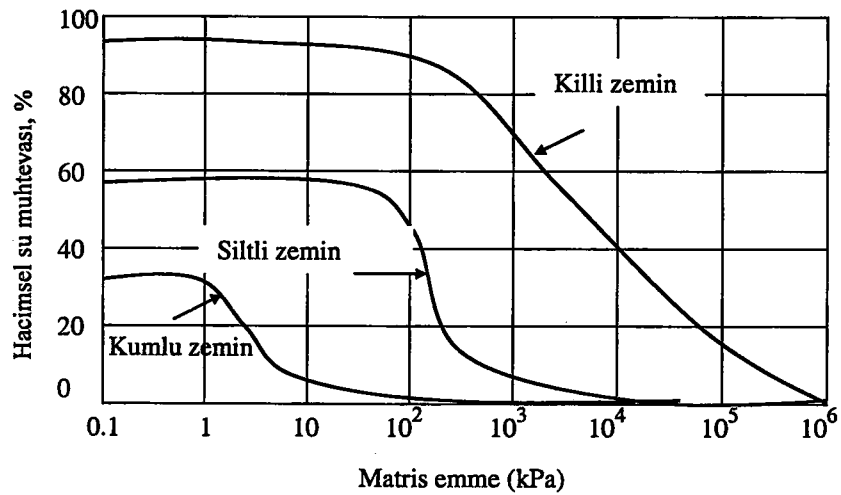
Şekil 2.6. Hollanda'daki bazı zeminlerin zemin- su karakteristik eğrileri
(Koorevaar vd., 1983)

Fredlund ve Xing (1994), zemin-su karakteristik eğrilerinin, doymun olmayan zeminlerdeki mühendislik parametrelerinin tahmininde temel olarak kullanıldığını ve bu eğrinin doğru bir şekilde karakterize edilmesinin önemini vurgulamışlardır. Siltli bir zemin için zemin-su karakteristik eğrisini Şekil 2.7'deki gibi göstermişlerdir.



Şekil 2.7. Siltli bir kil için zemin su karakteristik eğrisi (Fredlund ve Xing, 1994)

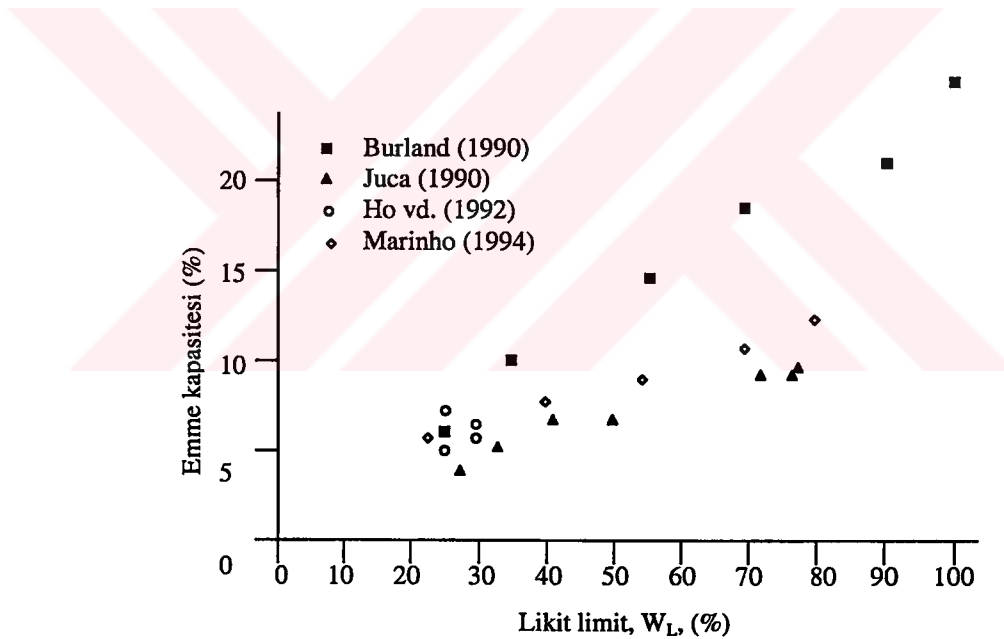
Şekil 2.7 'de gösterilen zeminin, hava giriş değeri, zemindeki en büyük boşluğa havanın girmeye başladığı matris emme değeridir. Kalıcı su muhtevası ise, zemindeki su muhtevasının uzaklaştırılması için büyük bir emme değişiminin gerektiği su muhtevası değeridir. Burada, θ_s zeminin doymuş durumdaki su muhtevasını göstermektedir. Yazarlar, zemin-su karakteristik eğrileri üzerinde zemin cinsinin çok büyük bir etkisi olduğunu vurgulayarak, farklı zemin tipleri için zemin-su karakteristik eğrilerini Şekil 2.8 'de göstermişlerdir.



Şekil 2.8. Kumlu, siltli ve killi zeminler için zemin su karakteristik eğrisi (Fredlund ve Xing, 1994)

Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8 ‘deki bütün zemin tipleri için, sıfır su muhtevasında toplam emme basıncının aynı olduğu (10^6 kPa), doymun durumdaki su muhtevasının ve hava giriş değerinin ise, zeminin plastisitesi ile arttığı görülmektedir.

Juca ve Frydman (1996), emme kapasitesi değerinin, zeminin özelliklerine (doku, kıvam limitleri v.b.) ve su muhtevasına bağlı olduğunu ve pratik amaçlar için belirlenmiş bir emme aralığının, kuruma yada ıslanma davranışını tanımlayan bir sabit olarak alınabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, emme kapasitesinin kil fraksiyonu ve plastisite indisi ile de arttığını belirtmişlerdir. Emme kapasitesi ile likit limit arasındaki ilişkiyi elde etmek için, teknik raporlardan aldıkları verileri kullanmışlardır. Bir zeminde likit limitin artmasıyla emme kapasitesinin arttığını göstermişlerdir (Şekil 2.9).

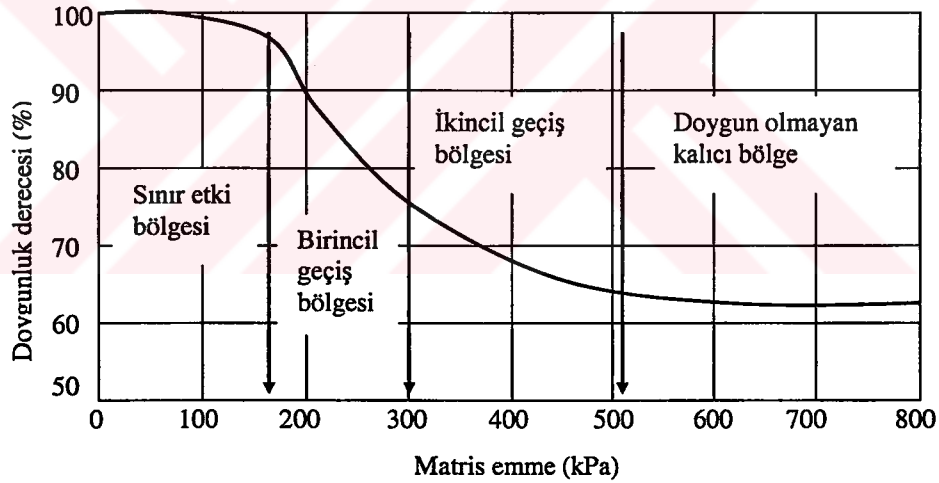


Şekil 2.9.Likit limit- emme kapasitesi ilişkisi (Juca ve Frydman, 1996)

Keskin vd. (1998a), Yıldırım vd. (1999), Keskin vd. (2000), Keskin ve Çimen (2000) çalışmalarında killerdeki emme kapasitesinin kilin plastisite indisine, likit limite ve plastik limite bağlı olarak değiştiğini göstermişlerdir. Emme kapasitesinin likit limit, plastik limit ve plastisite indisindeki artışla birlikte arttığını belirtmişlerdir.

Rao ve Revanasiddappa (2000), sabit bir kuru birim hacim ağırlıkta, su muhtevası değişikliğinin ve sabit su muhtevasında ise kuru birim hacim ağırlık değişikliğinin kil zemin numunelerinin matris emmesini etkilediğini belirtmişlerdir. Sabit bir su muhtevasında, likit limit değeri yüksek olan zeminin daha yüksek matris emmeye sahip olduğunu göstermişlerdir.

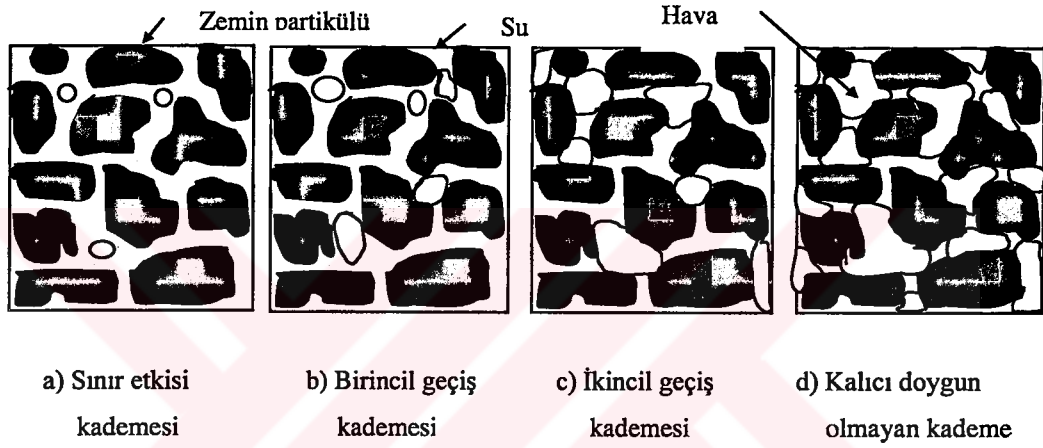
White vd. (1970), suya doymun olmayan bir zeminde, doymunluk derecesi ile matris emme ilişkisini incelemişlerdir. Matris emme ile doymunluk derecesi arasındaki ilişkiyi fiziksel bir model üzerinde göstererek, zemin-su karakteristik eğrisini dört farklı bölgeye ayırmışlardır. Şekil 2.10 'dan, bir zeminin suya doymunluk derecesi ile matris emme arasında ters bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Bir zeminin doymunluk derecesi yaklaşık %60 seviyesine düştüğünde matris emmenin oldukça yüksek değer aldığı gözlenmektedir.



Şekil 2.10. Hipotetik bir poroz ortam için doymunluk derecesi-matris emme eğrisi (White vd., 1970)

Benzer şekilde, Vanapalli (1994), Şekil 2.10'da verilen zemin-su karakteristik eğrisinin dört farklı bölgesi için, su alanının değişimini göstermiştir (Şekil 2.11). Birinci bölgede, zeminin bütün boşluklarının su ile dolu olduğunu belirtmiştir. Zeminin bu durumda doymun olduğunu ifade etmiştir. Bu şartlar altında tek bir gerilme durumunun ($\sigma - u_w$), zeminin davranışını tanımladığını belirtmiştir.

Zemin-su karakteristik eğrisinde hava giriş değerinin (ψ_e), önemli bir nokta olduğunu vurgulamış ve hava giriş değeri, zemindeki en büyük boşluğa hava girişinin olduğu, emme değeri olarak ifade edilmiştir. Geçiş. bölgesinde zeminin doygunluğunun azalmaya başladığını, bu durumda artan emme gerilmeleri ile zemindeki su muhtevasının önemli ölçüde azaldığını belirtmiştir. Zeminin doygun olmayan durumu kalıcı hale geldiğinde ise, su muhtevasında oldukça küçük bir değişimin emmede büyük bir artışa neden olduğunu ve zemindeki su muhtevasının kalıcı su muhtevası olarak tanımlandığını belirtmiştir.

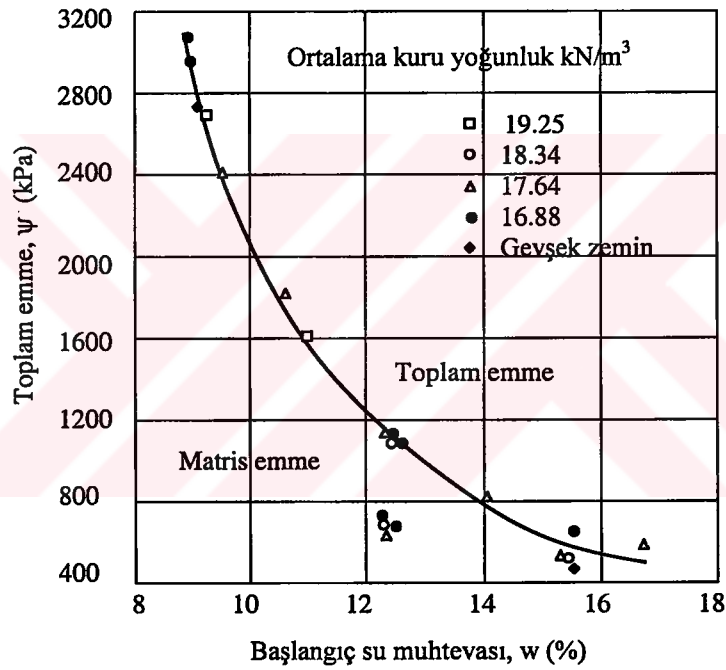


Şekil 2.11. Zemin-su karakteristik eğrisinin farklı durumlarındaki su alanının muhtemel değişimi (Vanapalli, 1994)

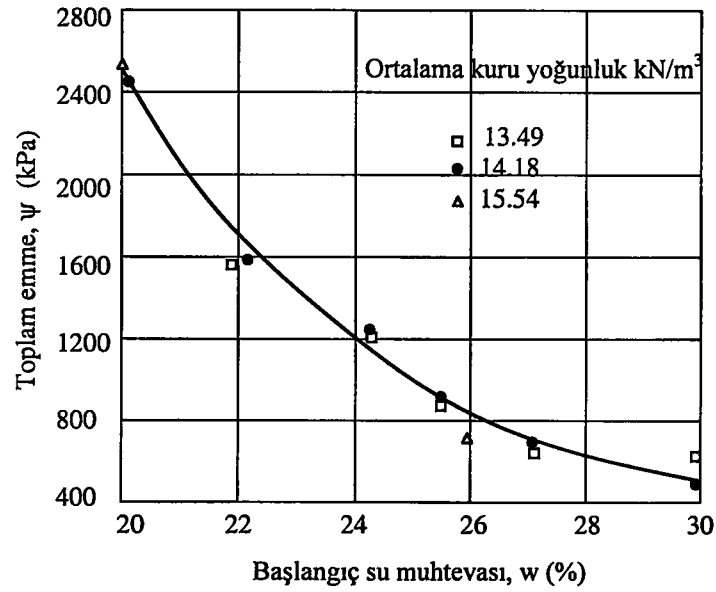
Croney ve Coleman (1954) ve Croney (1977), yüksek plastisiteli zeminler için su muhtevası ile emme davranışı arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Farklı killeri üzerinde deneyler yaparak su muhtevasının artmasıyla zemin emmesinin azaldığını belirtmişlerdir.

Krahn ve Fredlund (1972) çalışmalarında, likit limiti %78, plastik limiti %31 olan Regina kili ile, likit limiti %34 ve plastik limiti %17 olan buzul kilini kullanarak, farklı başlangıç su muhtevasında sıkıştırılmış zeminlerdeki matris, ozmotik ve toplam emme değişimlerini incelemişlerdir. Su muhtevasının artmasıyla matris ve ozmotik emmenin ve dolayısıyla, toplam emmenin azaldığını vurgulamıştır. Ayrıca, çalışmalarında başlangıç su muhtevası-toplam emme ilişkilerini incelemişler, bu

amaçla, farklı su muhtevalarında ve farklı birim hacim ağırlıklarda sıkıştırılmış çeşitli zeminler kullanarak elde ettikleri eğrilerin (Şekil 2.12 ve Şekil 2.13), zemin-su karakteristik eğrisinden farklı olduğunu belirtmişlerdir. Zemin-su karakteristik eğrisinin, tek bir zemin numunesi için emme-su muhtevası ilişkisini gösterdiğinin unutulmaması gerektiğini vurgulamışlardır. Şekil 2.12 ve Şekil 2.13 'e bakılacak olursa, zeminin kuru birim hacim ağırlığı ne olursa olsun, sıkıştırılmış bir zemin için başlangıç su muhtevası ile zemin emmesi arasında tek bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Krahn ve Fredlund (1972), sonucun arazideki sıkıştırma şartlarında geçerli olduğunu, laboratuvarında incelemediklerini ifade etmişlerdir.



Şekil 2.12. Buzul kili için başlangıç su muhtevası-toplam emme ilişkisi
(Krahn ve Fredlund, 1972)



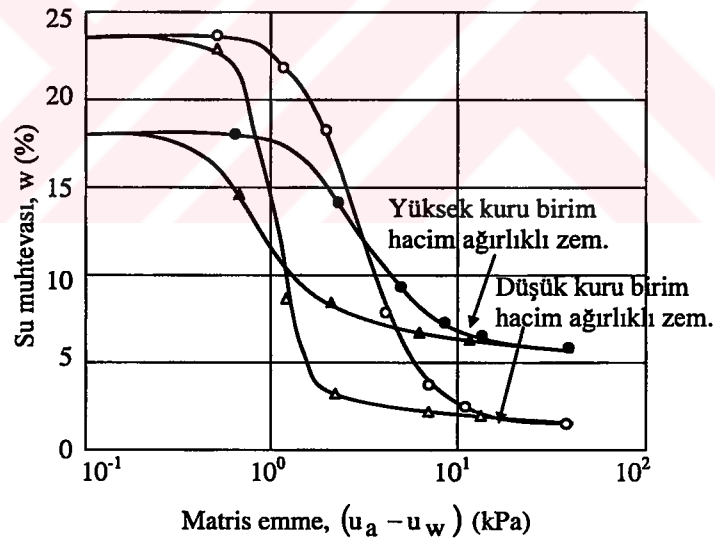
Şekil 2.13. Regina kili için başlangıç su muhtevası-toplam emme ilişkisi
(Krahn ve Fredlund, 1972)

Jimenez-Salas (1996), zeminin su muhtevastaki değişikliğin farklı nedenlerden dolayı meydana geldiğini ve emmenin, zeminin mekanik davranışını tanımlayan bir büyüklük olduğunu belirtmiştir. Şişen zeminlerde karşılaşılan problemin; zeminin mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan, su muhtevası transferinin hesaplanması olduğuna dikkat çekmiştir. Ancak, her bir noktada difüzyonun detaylı bir şekilde belirlenmesini gerektirdiğinden, su muhtevası transferinin hesaplanmasının zor olduğunu ifade etmiştir. Su transferinin toplam emme tarafından, zeminin mekanik davranışının da matris emme tarafından kontrol edildiğini belirtmiştir.

Vanapalli vd. (1999), optimum su muhtevasının ıslak ve kuru taraftaki su muhtevalarında sıkıştırılmış numunelerin, zemin-su karakteristik eğrilerini incelemişlerdir. Kuru tarafta sıkıştırılmış numunelerin matris emme - su muhtevası değişim hızının, ıslak tarafta sıkıştırılmış numuneye göre daha yüksek olduğunu göstermişlerdir.

Fredlund ve Rahardjio (1993) ve Ng ve Pang (2000b) su muhtevalarında meydana gelen bir artış ile matris emmede meydana gelen azalmanın sebebini, yüksek su muhtevalı karışımlarda boşluk çaplarının büyümesi ile açıklamışlardır. Zeminin başlangıç su muhtevalarındaki bir artışın, hava giriş değerinde (zemindeki en büyük boşluğa havanın girmeye başladığı matris emme değeri) azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Düşük başlangıç su muhtevalı ya da küçük boşluklu zeminlerin daha yüksek matris emme değerine sahip olduklarını, dolayısıyla boşluklarda suyun drenaj hızının daha yavaş olduğunu söylemişlerdir.

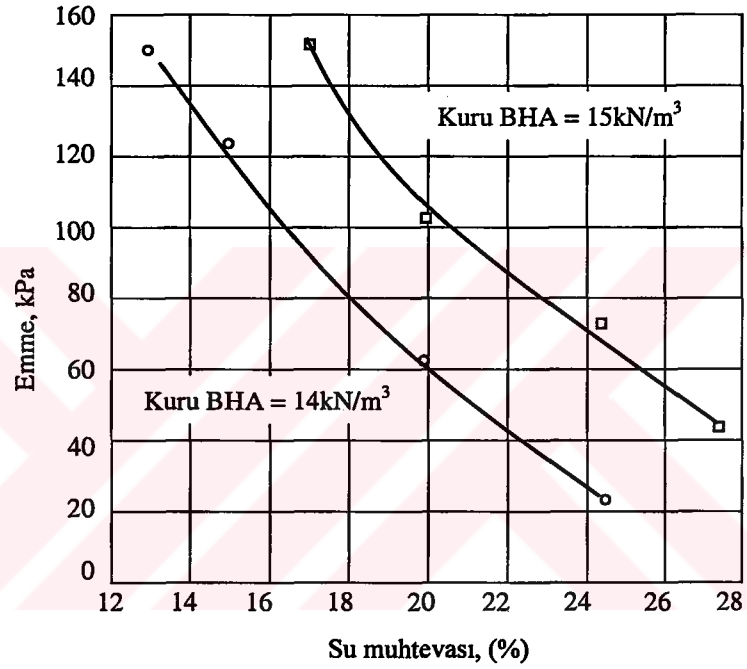
Croney ve Coleman (1954), başlangıç kuru birim hacim ağırlığa bağlı olarak verdikleri zemin-su karakteristik eğrilerini Şekil 2.14' de göstermişlerdir. Yüksek başlangıç kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış numunenin düşük başlangıç kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış numuneden daha yüksek hava giriş değerine sahip olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.14. Sıkıştırılmış siltli kumun zemin su karakteristik eğrileri üzerinde, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının etkisi (Croney ve Coleman, 1954)

Xie vd. (1996), doymun olmayan zemin koşulları için modifiye edilmiş üç eksenli bir deney aletini tanıtmışlar ve bu alet ile yapılan deney sonuçlarını vermişlerdir.

Doygun olmayan zeminler üzerinde yapılan deneysel araştırmaların odak noktasının farklı su muhtevası ve farklı kuru birim hacim ağırlık şartları olduğunu belirtmişlerdir. Deneylerde kullandıkları siltli zemin numunesini, farklı kuru birim hacim ağırlıklarda olacak şekilde sıkıştırarak hazırlamışlardır. Sonra, bu sıkıştırılmış numunelerin su muhtevası ile emme basıncı arasındaki ilişkisini göstermişlerdir (Şekil 2.15). Zeminin emme basıncının kuru birim hacim ağırlığındaki artışla artarken, su muhtevasındaki artışla azaldığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.15. Su muhtevası ile emme arasındaki ilişki (Xie vd., 1996)

Kandemir ve Erol (1996), emme basıncı ile şişme parametreleri arasındaki ilişkiyi araştırdıkları çalışmalarında, emme basınçlarının belirlenmesinde saykrometre tekniğini, şişme basınçları ile şişme yüzdelерinin belirlenmesinde de ödometre tekniğini kullanmışlardır. Deneylerde likit limiti %108, plastik limiti %28 olan kil numunesini kullanarak, 36 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde olacak şekilde, silindirik numuneleri statik olarak sıkıştırarak hazırlamışlardır. Çalışmalarında, su miktarının artmasıyla emme basıncının azaldığını, buna karşın kuru birim hacim ağırlığın artmasıyla da şişme ve emme basınçlarının arttığını belirtmişlerdir. Ödometre yöntemiyle belirlenen şişme yüzdesi ile saykrometre tekniğiyle belirlenen

emme ölçümlerinden tahmin edilen şişme yüzdesini karşılaştırmışlardır. Emme basıncı değerlerini kullanarak, tahmin edilen şişme yüzdesi değerlerinin, ödometre deneylerinden elde edilen nihai şişme yüzdesi değerlerinden daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Numunelerin kontrollü olarak ısıtılmasıyla elde edilen ödometre ara şişme (yarı doygunluk) yüzdesi değerlerinin, önerdikleri metotla tahmin edilen şişme miktarıyla uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

Keskin vd. (1997), Keskin vd. (1998a), Keskin vd. (1999), Yıldırım vd. (1999), Keskin ve Çimen (2000), Yıldırım vd. (2000) ve Keskin vd. (2000) farklı özelliklere sahip killi zeminlerin farklı başlangıç koşullarındaki emme kapasitelerinin ödometre yöntemi ile araştırıldığı çalışmalardır. Keskin vd. (1997), başlangıç su muhtevasının artması ile şişme basıncının, şişme potansiyelinin ve emme kapasitesinin azaldığını, bununla birlikte, emme kapasitesinin artmasıyla şişme basıncının arttığını belirtmişlerdir. Keskin vd. (1998a), plastisite indisi arttıkça su emme kapasitesinin arttığını, buna karşın hem başlangıç su muhtevası hem de kuru birim hacim ağırlık arttıkça su emme kapasitesinin azaldığını belirtmişlerdir. Keskin vd (1999), başlangıç su muhtevası–emme kapasitesi ilişkisinin doğrusal olarak elde edildiğini ve bu doğruların, killerin plastisite indisine bağlı olarak ötelendiğini göstermişlerdir. Farklı birim hacim ağırlıklar için elde ettikleri kartlar yardımıyla, başlangıç su muhtevası, plastisite indisi ve kuru birim hacim ağırlık bilindiği takdirde sıkıştırılmış killi zeminin emme kapasitesinin tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Ancak, aynı kart yardımı ile şişme basınçlarını tahmin etmenin mümkün olmadığını da ifade etmişlerdir. Yıldırım vd. (1999), sabit su muhtevasında, kuru birim hacim ağırlığın artmasıyla şişme basıncının arttığını, emme kapasitesinin ise, azaldığını belirtmişlerdir.

Keskin ve Çimen (2000), sabit başlangıç su muhtevası ve farklı kuru birim hacim ağırlıklarda sıkıştırarak hazırladıkları numuneler üzerinde emme ve şişme deneyleri yapmışlardır. Kıvam limitleri değerlerinin artması ile emme kapasitesi ve şişme basıncının arttığını göstermişlerdir. Emme kapasitesinin plastik limit, likit limit, plastisite indisi, kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak

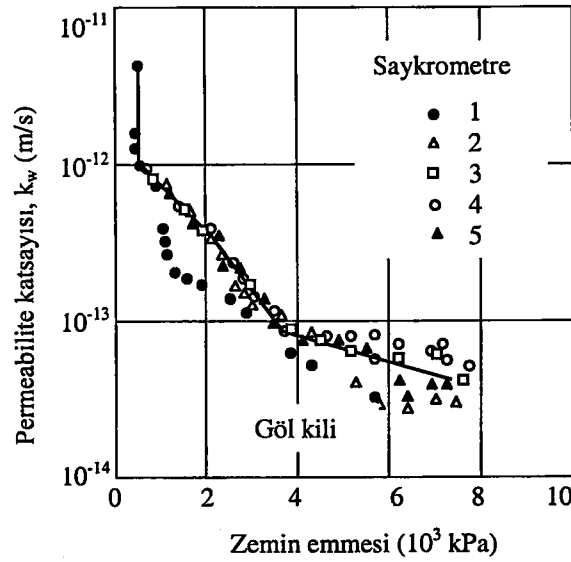
bulunabileceği farklı bağıntılar vermişler ve zeminin emme kapasitesinin plastik limit değerinden çok fazla etkilendiğini belirtmişlerdir.

Yıldırım vd. (2000), farklı üç numune üzerinde ampirik bağıntılardan tahmin edilen değerler ile deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Emme kapasitesinin verdikleri bağıntılarla belirlenebildiğini ancak şişme basıncının, emme kapasitesi kadar yaklaşık bir şekilde tahmin edilemediğini belirtmişlerdir. Keskin vd. (2000), sıkıştırılmış zeminlerin başlangıç su muhtevasına, kuru birim hacim ağırlığına ve plastik limitine bağlı olarak emme kapasitesinin belirlenebildiği ampirik bir bağıntı vermişlerdir.

Sivakumar ve Wheeler (2000a) ve (2000b), doymun olmayan sıkıştırılmış kil zemin numuneleri üzerinde emme kontrollü üç eksenli basınç deneyleri yapmışlar, su muhtevasının ve kompaksiyon yönteminin etkilerini incelemişlerdir. Kompaksiyon enerjisinin numunenin başlangıç yapısını, su muhtevasının da zemin emme özelliğini çok fazla etkilediğini belirtmişlerdir. Zeminin kompaksiyon su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı değişmediği sürece kompaksiyon enerjisinin statik veya dinamik olmasının ise zeminin davranışı üzerindeki etkisinin önemli olmadığını ifade etmişlerdir.

2.2.3. Diğer Zemin Özelliklerinin Zemin Emmesine Etkisi

Hamilton vd. (1981) ve Pachepsky ve Scherbakov (1984), çalışmalarında saykrometre tekniği ile belirledikleri emme gerilmeleri ile permeabilite katsayısı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Şekil 2.16'dan görüldüğü gibi, permeabilite katsayısı azalırken emme gerilmesinin arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.16. Laboratuvar ortamında anlık profil yöntemi kullanılarak elde edilen doygun olmayan permeabilite katsayıları (Hamilton vd. 1981)

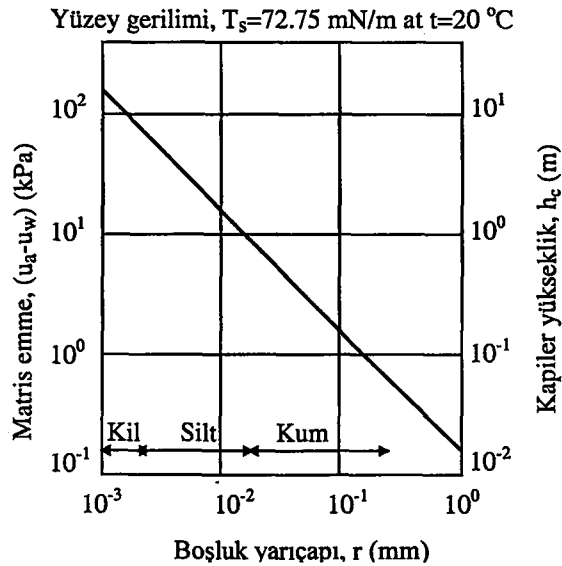
Wang ve Benson (1995) ve Lim vd. (1996), zemin emmesi ile permeabilite ilişkisinin araştırıldığı diğer çalışmalardır. Wang ve Benson (1995) çalışmalarında, likit limiti %26, plastisite indisi %11 olan CL sınıfı ve likit limiti %61 ve plastisite indisi %35 olan CH sınıfı zemin numunelerini kullanmışlardır. Başlangıç su muhtevası ile doygun hidrolik kondaktivite arasındaki ilişkileri belirlemek için standart kompaksiyon ve permeabilite deneyleri yapmışlardır. Aynı şartlarda sıkıştırılmış numunelerin matris emme değerleri ile hacimsel su muhtevası arasındaki ilişkilerini (zemin-su karakteristik eğrileri) basınç plakası deneyleri ile belirlemişlerdir.

Wang ve Benson (1995), ıslanma sırasındaki emme gerilmesini belirlenmesinde, permeabilite verilerinin analiz edildiği bir yöntem sunmuşlardır. Islanma aşamasının bir su yayılması olduğu ve ıslanma çizgisinin zeminde daha derine indikçe yayılmanın daha büyük olacağı belirtilmiştir. Dağılma oranının zeminin tipine ve başlangıç su muhtevasına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Düşük plastisiteli killer için ıslanma sırasındaki başlangıç emme basıncının en büyük olduğunu ve optimuma yakın başlangıç su muhtevalarında hazırlandığı zaman, emme basıncının hızlı bir şekilde azaldığını belirtmişlerdir. Yüksek plastisiteli killer için optimumun

yakınında, ıslak ve kuru taraftaki su muhtevallarında benzer başlangıç emmelerin ölçüldüğünü ifade etmişlerdir. Ayrıca, çalışmada kullandıkları zeminler için, ıslanma sırasındaki emme değerlerinin hava giriş basınçları kullanılarak hesaplanabildiğini belirtmişlerdir.

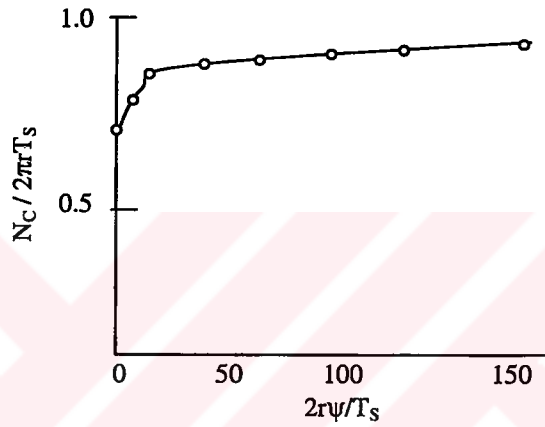
Lim vd. (1996), tabii şevlerdeki matris emmeler üzerinde yağışın etkisini araştırmışlardır. Şevdeki zeminlerin likit limitlerinin %30 ile %60 arasında ve plastik limitlerinin %15 ile %30 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Arazide değişik noktalara tensiyometreler ve piyezometreler yerleştirerek boşluk suyu basınçlarını ölçmüşlerdir. Matris emmedeki ve matris emme profilindeki değişiklikler 3 farklı yüzey altında (üzeri çadır ile kaplanmış çimli yüzey, çimlendirilmiş yüzey ve çıplak zemin yüzeyi) incelemişlerdir. İklim koşullarındaki farklılıklardan dolayı meydana gelen matris emmedeki değişikliklerin, derinlikle hızla azaldığını belirtmişlerdir. Çıplak yüzey altında, derinlik boyunca matris emmedeki değişimin diğerlerinden daha önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Fredlund ve Rahardjio (1993), kapiler yükseklik, matris emme ve boşluk çapı ilişkisini Şekil 2.17' deki gibi göstermişler ve zeminin boşluk çapı küçüldükçe, kapiler yüksekliğin ve matris emmenin arttığını belirtmişlerdir.



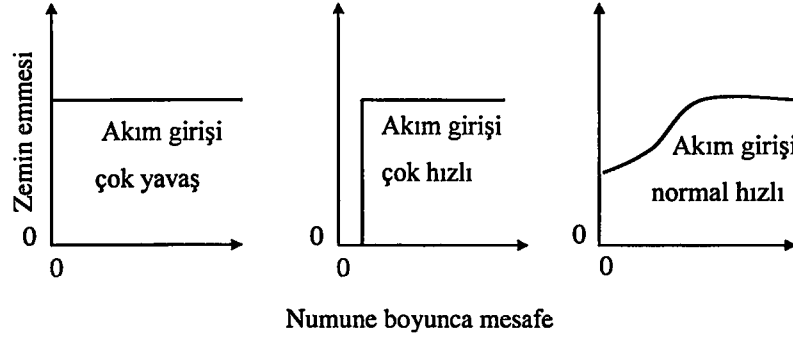
Şekil 2.17. Kapiler yükseklik, matris emme ve boşluk yarıçapı arasındaki ilişki
(Fredlund ve Rahardjio, 1993)

Kohgo vd.(1993a), matris emme ile kapiler kuvvet arasındaki ilişkiyi açıklamışlardır. Matris emme ve kapiler kuvvet arasındaki ilişkiyi Şekil 2.18 'de göstermişlerdir. Bu şekle göre, emmenin artmasıyla kapiler kuvvetin arttığı, emme değeri küçük bir değer olduğu zaman ise, kapiler kuvvetteki artış oranının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Emmedeki artışla kapiler kuvvette artış olacağını ve bunun zemin daneleri arasındaki kayma dayanımını arttıracaklarını ifade etmişlerdir. Burada, N_c kapiler kuvvet, r menisküsün eğrilik yarıçapı, ψ emme ve T_s yüzey gerilmesidir.



Şekil 2.18. Kapiler kuvvet ve emme arasındaki ilişki (Kohgo vd, 1993a)

Daniel (1983), zemin emmesi üzerinde suyun zemine giriş hızının etkisini Şekil 2.19 'daki gibi göstermiştir. Şekil 2.19 'da üç farklı su giriş hızına bağlı olarak numunelerdeki emme profilinin değişimi görülmektedir. Su giriş hızı çok yavaş iken emme profilinde değişim olmamakta, su giriş hızı çok hızlı olduğunda emme profilinde ani bir artış olmakta, daha sonra ise sabitlenmektedir.



Şekil 2.19. Farklı su giriş hızlarıyla ilişkili emme profilleri (Daniel, 1983)

Zemin emmesini etkileyen bir diğer faktör de, zemin boşluklarındaki suyun özellikleridir. Zemindeki boşluk suyunun elektriksel iletkenliğinin zeminin pek çok özelliğini etkilediği bilinmektedir. Krahn ve Fredlund (1972) yaptıkları çalışmada, zemin suyunun elektriksel iletkenliğinin ozmotik basınca olan etkisini araştırmışlardır. Aralarında doğrusal bir ilişkinin olduğunu ve zemin suyunun elektriksel iletkenliğinin artmasıyla ozmotik emmenin lineer olarak arttığını göstermişlerdir. Bunun sebebi; boşluk suyuna eklenen çözünmüş tuzların elektriksel iletkenliğini arttırdığı ve elektriksel iletkenliğinin artmasının da, ozmotik emmeyi arttırdığı şeklinde yorumlanmıştır.

Juca ve Escario (1991), emme ile doymun olmayan zeminlerin deformasyon modüllerinin değişimini araştırmışlardır. Deformasyon modülünün efektif gerilmenin ve emmenin bir fonksiyonu olduğunu ve doymun olmayan zeminlerde pek çok geoteknik problemi etkilediğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, emme kontrollü ödometre hücresi kullanarak sıkıştırılmış numunelerde penetrasyon deneyleri yapmışlardır. Kullandıkları 3 farklı numuneyi optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ödometre ringine statik kompaksiyonla sıkıştırmışlardır. Deneyler sonucunda, 3 farklı zemin için, emme ile zemin deformasyonu arasındaki ilişkileri elde etmişlerdir. Deformasyonun maksimum değerine, yüksek plastisiteli kil zemin numuneleri için 10.000-12.000 kPa emme değerinde ulaşıldığını, killi kum zemin numunesinde ise 1000 kPa emme değerinde

ulaşıldığını belirtmişlerdir. Emme gerilmesinin, E_{maks} maksimum deformasyon modülü ve E deformasyon modülü olmak üzere E_{maks} / E oranının killerde kumlara göre daha fazla etkilendiğini belirtmişlerdir.

Fleureau vd. (1993), çalışmalarında, sıfır toplam gerilme altında, doygunluk derecesi ve boşluk oranındaki değişikliklerin negatif basınca etkisini görmek için kuruma ve ıslanma aşamaları üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Bu amaçla, su muhtevası likit limitin 1.5 katı olacak şekilde sıkıştırılmış, 11 farklı kil zemin numunesi kullanmışlardır. Numunelerin emme gerilmelerinin ölçülmesi için tensiyometre, basınç plakası, tuz çözeltileri, ozmosiz ve saykrometre metotlarını kullanmışlardır. Negatif basınç olarak ifade ettikleri emme gerilmeleri ile boşluk oranı arasındaki ilişkiyi, likit limite bağlı olarak grafik halinde göstermişlerdir. Likit limit değeri artarken emme gerilmesinin de arttığını, buna karşılık boşluk oranı arttıkça emme gerilmesinin azaldığını belirtmişlerdir. Bu sonuçların farklı yöntemlerle belirledikleri emme gerilmeleri için benzer şekilde olduğunu ifade etmişlerdir.

Reddi ve Poduri (1997), ince daneli zeminlerin su tutma özelliklerine likit limit durumundaki boşluk oranlarının etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında kaolin, montmorillonit minerallerini içeren kil numunelerine, ağırlıkça farklı oranlarda kum, kaolin ve montmorillonit karıştırmışlardır. Her bir numunenin, likit limit değerlerini ve bu likit limit değerlerinde sahip oldukları boşluk oranlarını ve o boşluk oranındaki hava giriş emme basınçlarını elde etmişlerdir. Numunelerin emme basınçlarını belirlemek için, basınç plakası tekniğini kullanmışlar ve sadece ıslanma aşamasında ölçümler yapmışlardır. Hava giriş emmesi değerleri ile boşluk oranları arasındaki ilişkiyi göstermişler ve ince daneli zeminlerin su tutma karakteristiklerinin belirlenebilmesi için, yalnızca zeminin likit limit durumundaki boşluk oranlarının gözönüne alınmasının yeterli olabileceğini ifade etmişlerdir.

Marinho ve Pinto (2000), Reddi ve Poduri (1997) 'nin çalışmalarına bazı ilavelerde bulunmuşlardır. Su muhtevası ile logaritmik emme arasındaki ilişkinin, zeminin plastisitesine göre değiştiğini belirtmişlerdir. Reddi ve Poduri (1997) 'nin verdiği montmorillonit ve kaolin numunelerinin hava giriş emme basıncı değerlerinin yüksek

olduğunu ve bir yanlışlık olabileceğini belirtmişlerdir. Reddi ve Poduri (2000) bu eleştiriye cevaplarında, hava giriş emme basıncı değerlerinde görülen bu farklılığın, deneysel hatalardan olabileceğini ve Marinho ve Pinto (2000) 'nun zeminin kuruma durumları için de ölçüm aldıklarını ve kendilerinin ise sadece ıslanma aşamasında ölçüm yaptıklarını belirtmişlerdir.

Vanapalli vd. (1999) ve Ng ve Pang (2000b), zeminlerin emme özelliklerine gerilme tarihçesinin etkisinin araştırıldığı çalışmalardır. Vanapalli vd. (1999), sıkıştırılmış bir zeminin zemin-su karakteristikleri üzerinde gerilme tarihçesinin ve zemin yapısının etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları kil numunesini, önceden belirledikleri su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıklarda olacak şekilde, statik olarak sıkıştırarak hazırlamışlardır. Hazırladıkları numunelerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta, optimumun kuru tarafında ve optimumun ıslak tarafında kalmasına dikkat etmişlerdir. Yazarlar, başlangıç su muhtevasının ince daneli zeminlerde, zemin dokusunu önemli ölçüde etkilediğini; ince daneli zeminlerin zemin-su karakteristik eğrilerinin ise zemin dokusu ve gerilme tarihçesinden daha çok başlangıç boşluk oranına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Oldukça düşük emme değerlerinde, optimumun kuru tarafındaki numuneler için zemin-su karakteristik davranışında zemin makro yapısının hakim olduğunu ve bu yapıdan dolayı kaba daneli zemin gibi davrandıklarını belirtmişlerdir. Optimumun kuru tarafında sıkıştırılmış numunelerde denge basıncının artmasıyla hava giriş değerinin ve kalıcı doygunluğun arttığını ifade etmişlerdir. Optimumun ıslak tarafında sıkıştırılmış numunelerin, zemin-su karakteristik davranışında ise mikro yapının hakim olduğunu, bu numunelerin kuru tarafta sıkıştırılmış numunelere göre daha yüksek hava giriş değerine ve daha yüksek kalıcı doygunluğa sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Ng ve Pang (2000b), zemin-su karakteristik eğrileri üzerinde kuruma ve ıslanma tarihçesinin etkisini göstermişlerdir. Eğrilerin ilk kuruma- ıslanma devrinden daha fazla etkilendiğini, bundan sonraki devirlerde kuruma- ıslanma devir sayısından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Kuruma-ıslanma devir sayısı artarken, düşük emme değerlerinde (0.1kPa) doygunluk derecesinin azaldığını ifade etmişlerdir.

Çalışmalarında ayrıca, zemin-su karakteristik eğrileri üzerinde gerilme hızının etkisini ve tabii numune ile sıkıştırılmış numune arasındaki farkları araştırmışlardır. Matris emme değeri 100 kPa 'a ulaşana kadar gerilme hızının kuruma eğrilerinde önemli bir fark oluşturmadığını, ıslanma eğrilerinde ise fark olduğunu göstermişlerdir. Daha yüksek gerilmeye maruz kalan tabii zemin numunesinin daha yüksek hava giriş değerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, tabii numunelerin zemin-su karakteristik eğrileri üzerinde gerilme durumunun etkisinin, sıkıştırılmış numunelerinkinden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Escario (1980), Mashour vd. (1996), Fourie vd. (1999) Rassam ve Williams (1999) ve Ng ve Pang (2000a) zemin emmesinin kayma mukavemeti parametrelerine etkisinin araştırıldığı çalışmalardır. Escario (1980) çalışmasında, farklı emme gerilmeleri altında, zeminlerin kayma mukavemeti ve penetrasyon dayanımlarını belirlemiştir. Emme gerilmelerinin belirlenmesi için saykrometre ve basınç membranı aletlerini kullanmıştır. Emme basıncı arttıkça hem penetrasyon dayanımının hem de zeminin kohezyon değerinin arttığını belirtmiştir. Mashhour vd. (1996), sıkıştırarak hazırladıkları kil numuneler üzerinde emme kontrollü modifiye edilmiş üç eksenli basınç deneyleri yapmışlar ve emme gerilmesinin artması ile efektif kohezyonun ve efektif sürtünme açısının arttığını grafiklerle göstermişlerdir.

Fourie vd. (1999), kuru kül, katı atık deposunun şev stabilitesi üzerinde emmenin etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, kül-çöp yığınının aldıkları numuneleri, arazideki sıkılığında ve su muhtevasında sıkıştırarak hazırlamışlar, üzerlerinde kesme kutusu deneyleri yapmışlardır. Arazide çift ringli infiltrometre yardımıyla hidrolik kondaktivitelerini belirleyerek, 30-40 kPa aralığındaki emme değerlerini tensiyometre ile ölçmüşler daha sonra, infiltrasyon sırasındaki emmeyi de quickdraw tensiyometre ile belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmayla emmenin artmasıyla şev stabilitesindeki emniyet faktörünün de arttığını vurgulamışlardır.

Rassam ve Williams (1999), kurutulmuş maden tortularının taşıma kapasitesi üzerinde, matris emmenin etkisini araştırmışlardır. Zeminin kayma mukavemetine matris emmenin katkısını belirterek, emme artışının, taşıma kapasitesi ve stabilite

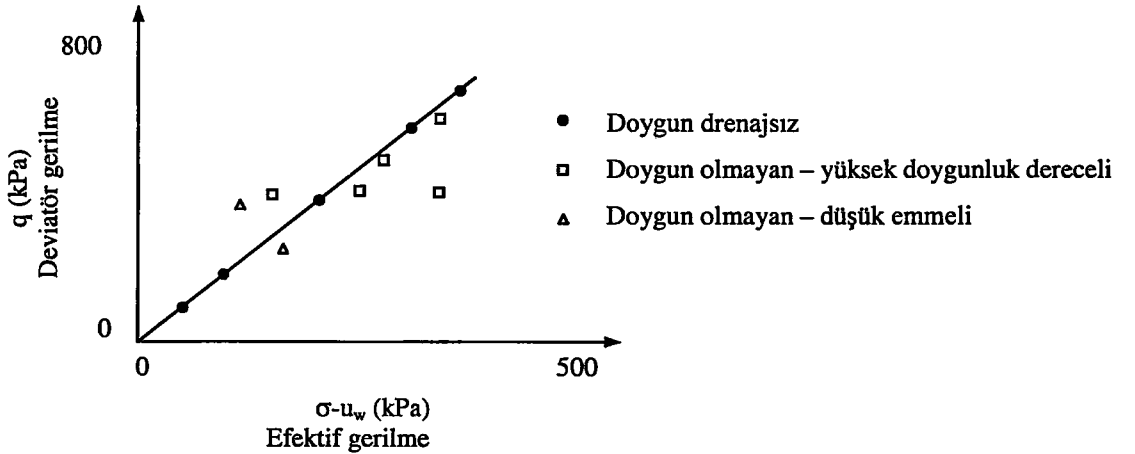
hesaplarındaki emniyet faktörünün artırılması şeklinde ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Ng ve Pang (2000a), zemin-su karakteristik eğrisinin, fiziksel olarak, verilen bir zemin emmesi için zeminin su depolama kapasitesinin bir ölçüsü olduğunu belirtmişler ve şev stabilitesi üzerinde etkisini araştırmışlardır. Zemin su karakteristik eğrilerinin, düşey basınç uygulanmadan laboratuvarında basınç plakası aleti kullanılarak ölçüldüğünü, bu çalışmada ise, zemin su karakteristik eğrileri üzerinde gerilme etkisinin araştırılması için yeni bir gerilme kontrollü basınç plakası kullanıldığını belirtmişlerdir. Sıfır emme gerilmesi altında üzerindeki mevcut gerilmeden daha yüksek bir düşey gerilmede yüklenen zemin numunelerinin, hacimsel su muhtevalarının daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Doygun olmayan zeminlerin şev stabilitesinin daha iyi ve emniyetli bir şekilde hesaplanması için, gerilmeye bağlı zemin-su karakteristik eğrilerinin ıslanma aşamasının dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Brady (1988) ve Toll (1990), kritik durum kavramlarının, zeminin emme özellikleri üzerine uygulandığı çalışmalardır. Schofield ve Wroth (1968), kritik durum kabullerinin, zeminin mekanik davranışının rasyonel bir çerçevede incelenmesine yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Brady (1988), Croney ve Coleman (1954) 'ın su muhtevası ile emme gerilmesi arasındaki ilişkileri araştırdığı çalışmasında kritik durum kavramlarını uygulamıştır. Londra killeri için literatürden topladığı zemin emmesi verilerini bir araya getirerek, kritik durum dönüşümlerini yapmış ve kritik durum çizgisini bir formülasyonla göstererek, emme ile kritik durum çizgileri arasındaki ilişkinin bulunması ile zemin emmesinin oldukça kolay bir şekilde hesaplanabileceğini ve bu konu üzerinde daha fazla çalışılması gerektiğini belirtmiştir.

Toll (1990), doymun olmayan zeminin kayma davranışını açıklamak için emme ve toplam gerilmenin etkilerini ayrı ayrı düşünerek kritik durum kavramlarını kullanmıştır. Doygun olmayan zeminlerde fabriğin, büyük şekil değiştirmeli kaymalar ile bozulmadığını belirterek, zemin fabriğinin önemini vurgulamıştır.

Kayma mukavemetine emme ve toplam gerilmenin etkisini iki ayrı gerilme oranı ile açıklamış ve bu gerilme oranlarının doygunluk derecesine bağlı olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında kullandığı kil numunesini, statik ve dinamik kompaksiyonla farklı kompaksiyon su muhtevalarında ve farklı kuru birim hacim ağırlıklarda hazırlamıştır. Numuneler üzerinde, emme ölçümleri yapabilen, modifiye edilmiş üç eksenli kesme deneyleri yapmıştır. Numunelerin bir kısmını kesme deneyinden önce doygun hale getirmiştir. Doygunluk derecesinin %90 ve %95 'den büyük olduğu durumlarda ($\sigma - u_w$) değerinin ortalama efektif gerilmeye, (σ'), eşit kabul edilebileceğini; ayrıca, emmenin 11 kPa 'dan düşük olduğu deneylerde ise, $\sigma - u_a$ ile $\sigma - u_w$ arasındaki farkın düşük olacağını belirtmiştir. Düşük emme deneylerinde (emme basıncının 11 kPa'dan daha az olduğu) zemin davranışının toplam gerilme tarafından kontrol edildiğini söylemiştir. Ayrıca bu durumda, doygunluk derecesinin yada fabriğin emme bileşenlerini etkilemeyeceği, emme bileşenlerinin sadece toplam gerilmeden etkileneceğini belirtmiştir. Şekil 2.20 'de doygun ve doygun olmayan zemin numunelerine ait deneylerden elde edilen q (deviatör gerilme) ile ($\sigma - u_w$) arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 2.20 'de bir nokta hariç diğer noktaların kritik durum çizgisine yakın olduğu görülmektedir. O noktanın, uzak olmasının nedenini, numunenin çok sıkı hazırlanmasından kaynaklandığı şeklinde yorumlamışlardır. Bu noktayı gösteren numunenin, başlangıç doygunluk derecesi %95 olmasına rağmen, kayma altında hacimindeki artışın doygunluk derecesini %80 'e düşürdüğünü ifade etmiştir.

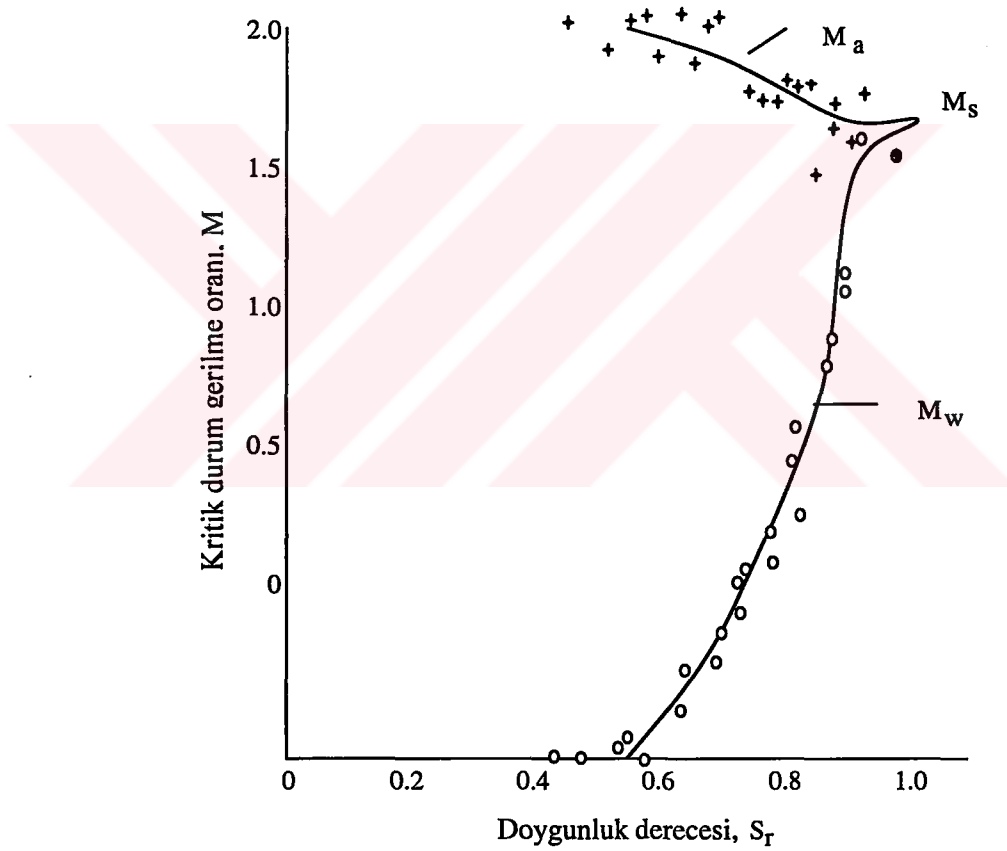


Şekil 2.20. Kiynyü çakılı için doygun ve doygun olmayan koşullar altında, efektif gerilme ile deviatör gerilme ilişkisi (Toll, 1990)

Toll (1990), doygun olmayan zemindeki gerilmeyi iki bileşene ayırmak için Denklem 2.16 'yı geliştirmiştir.

$$q = M_a (\sigma - u_a) + M_w (u_a - u_w) \quad (2.16)$$

Burada, M_a toplam gerilme oranı, M_w ise emme gerilme oranıdır. M_a ve M_w ile gösterilen gerilme oranlarının, doygunluk derecesinden etkilendiğini belirtmiştir. Doygunluk derecesi, S_r , ile kritik durum-gerilme oranlarının değişimi Şekil 2.21 'de görülmektedir.

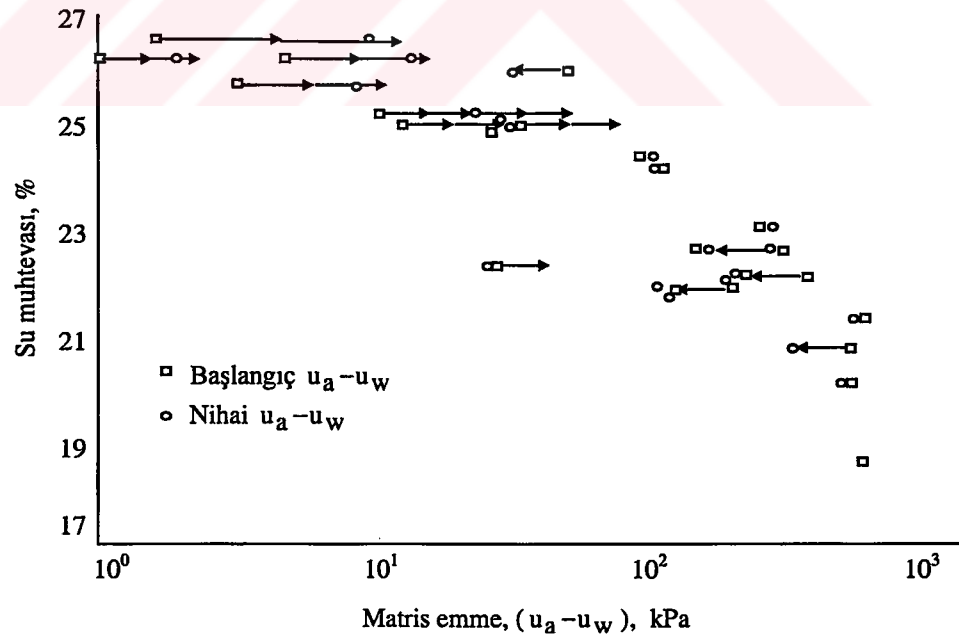


Şekil 2.21. Doygunluk derecesi ile kritik durum gerilme oranlarının değişimi
(Toll, 1990)

Bu şekilde, M_w azalırken doygunluk derecesinin de (S_r) azaldığı görülmektedir. Doygunluk derecesi %55 'in altına düştüğünde emmenin deviator gerilmeyi

etkilemediği belirtilmiştir. Bu, su fazının zemindeki küçük boşluklara çekildiği ve kaymanın olduğu yerde dane ilişkilerinin etkilenmediği şeklinde açıklanmıştır. Bu noktadaki doygunluk derecesinin zemin fabriğine ve derecelenmesine bağlı olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.21 'de toplam gerilme oranı M_a ya bakıldığında, doygunluk derecesi azalırken, toplam gerilmenin daha önemli hale geldiği anlaşılmaktadır. M_a ile S_r arasındaki değişikliklerin zemin fabriğindeki değişikliklerden olabileceği belirtilmiştir. Farklı doygunluk derecelerinde sıkıştırılmış numunelerin, farklı başlangıç zemin fabriğine sahip olacağı ifade edilmiş ve zemin danelerinin şeklinin, büyüklüğünün değişeceği ifade edilmiştir. Yüksek doygunluk derecelerinde M_a ve M_w 'nin tam doygunluk oranına (M_s) yaklaştığı belirtilmiştir.

Toll (1990) ayrıca, kritik durumda su muhtevası ile emme basıncı arasında bir ilişki bulmayı amaçlamıştır. Bunun için, sabit su muhtevasında doymun olmayan numunelerin emme basıncını modifiye edilmiş üç eksenli hücre deney sistemini kullanarak ölçmüştür. Deneyler sonucunda, kayma sırasındaki emme gerilmesi değişimlerini Şekil 2.22 'de göstermiştir.



Şekil 2.22. Sabit su muhtevasında doymun olmayan numuneler üzerindeki deneyler için kayma sırasında emme basınçlarındaki değişiklikler (Toll, 1990)

Deney sırasında başlangıçta düşük emme basıncına sahip numunelerde, kayma gerilmesi altında emme basıncında bir artış gözlemlendiğini, bununla beraber yüksek başlangıç emmeye sahip numunelerde beklenenin tersine emmede azalma olduğunu belirtmiştir. Bu davranışın, doymun olmayan fabrikten kaynaklandığını ifade etmiştir. Daneler kaymaya maruz kaldığı zaman zemin hacminin, danelerin birbiri üzerinden kayması ile artacağını ancak, danelerin boşluk suyu basıncının artması ile kendi kendilerine sıkışmaya maruz kalacaklarını ve böylece emmenin azalacağını belirtmiştir.

2.3. Zeminlerin Şişme Özellikleri ile İlgili Çalışmalar

Killi zeminlerin, su emerek hacimlerinin artması ya da hacim artışının engellenmesi durumunda, aşırı basınç göstermeleri zeminlerin şişme özelliği olarak tanımlanmaktadır. Tabii halde veya laboratuvarında sıkıştırılmış bir zemin numunesinin, belirli bir yük altında suya doymun hale gelene kadar oluşan hacim artışının, zeminin başlangıç hacmine oranına ise şişme potansiyeli denilmektedir. Şişme potansiyeline sahip bir zeminde meydana gelecek hacim değişikliğine engel olabilecek basınç da şişme basıncı olarak adlandırılmaktadır.

Şişme potansiyeline sahip zeminlerdeki şişme mekanizması oldukça karışıktır. Şişme, içsel gerilme dengesinin bozulduğu, kil-su sistemindeki içsel kuvvet değişikliklerinin bir sonucudur. Kil daneleri, genellikle yüzeylerinde negatif elektrik yüklerine, kenarlarında ise pozitif elektrik yüklerine sahiptirler. Negatif yükler, kil plakalarının yüzeylerinde elektriksel kuvvetler tarafından tutulmuş olan zemin suyundaki katyonlar tarafından dengelenir. Daneler arası elektriksel alan, hem elektriksel yüklerin ve hem de zemin suyunun elektrokimyasının bir fonksiyonudur. Kil kristalleri ve su molekülleri arasındaki hem Van Der Waals yüzey kuvvetleri hem de adsorpsiyon kuvvetleri, daneler arası kuvvetlerden etkilenir. Daneler arası elektriksel alandaki bu değişim, şişme ya da büzülme olarak ortaya çıkar (Nelson ve Miller, 1992).

Şişme mekanizmasını etkileyen bir çok faktör vardır. Bu faktörler, zeminin ihtiva ettiği kil yüzdesi ve minerolojik yapısı, arazideki gerilme şartları, kuru birim hacim ağırlık, danelerin yerleşim biçimi, başlangıç su muhtevası, emme basıncı, permeabilite, şişen zemin tabakasının kalınlığı ve derinliği, dış yükler, iklim şartları ve sıkıştırılmış zeminler için kompaksiyon yöntemi vb. olarak sayılabilir (Keskin, 1993). Bir zeminin şişme potansiyelini etkileyen bu faktörler başlıca üç ana grupta toplanabilir (Nelson ve Miller, 1992):

1. İçsel kuvvet alanının temel yapısından etkilenen, zemin özellikleri (Plastisite, kuru birim hacim ağırlık, kil mineralojisi, zemin suyu kimyası, zeminin emme kapasitesi, zemin yapısı ve fabriği, başlangıç su muhtevası vb.)
2. İçsel kuvvet sisteminde meydana gelen değişikliklerden etkilenen çevresel faktörler (Su muhtevasının değişimi, zemin suyu kimyası, kuru birim hacim ağırlık vb.)
3. Zemindeki gerilme durumu

Geoteknik mühendisliğinde şişen zeminlerin şişme karakteristiklerinin (şişme basıncı ve şişme yüzdesi) belirlenmesi, şişme problemi çözümünün ilk kısmını oluşturmaktadır. Şişme karakteristikleri belirlendikten sonra uygun stabilizasyon metotları kullanılarak bu problem çözülmektedir. Şişme karakteristiklerinin belirlenmesi için bir çok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler üç grup halinde düşünülebilir.

1. Mineralojik yöntemler: X-Ray difraksiyonu, diferansiyel termal analiz, boya adsorbsiyonu, kimyasal analiz, elektron mikroskop yöntemi sayılabilir.
2. Dolaylı yöntemler: Kilin kıvam limitleri özellikleri, PVC yöntemi, aktivite yöntemi, emme basıncı yöntemi ve ampirik bağıntıları içerir. Bu yöntemler, belli coğrafik bölgelerin zemin karakterlerini yansıttığından, bu yöntemlerin bağımsız olarak kullanılmaması tavsiye edilmektedir.
3. Doğrudan ölçüm: Şişen bir kilin şişme yüzdesi ve şişme basıncının en iyi belirlendiği yöntemdir. En yaygın olarak kullanılan doğrudan ölçüm tekniği bir boyutlu konsolidasyon yöntemidir. ASTM D4546 (1986) 'da ödometre

aletiyle yapılan standart kapsamda üç alternatif yöntem sunulmuştur. Bu üç yöntemde de numunelerin yanal yönde genişlemesine izin verilmediği, eksenel olarak yüklendiği ve suyla temasta olduğu kabul edilmektedir.

Doğrudan ölçüm metotlarının birincisinde, numune su altında bırakılır ve oturma basıncında (üst poroz taş ve yük plakasının ağırlığıyla uygulanan en az 1kPa'lık basınç) numunenin düşey olarak şişmesine izin verilir. Bu şişme oluştuktan sonra, başlangıç boşluk oranı ya da yükseklik elde edilene kadar numune yüklenir. Serbest şişme, şişme basıncına kadar olan düşey çevre basınçları için şişme yüzdesi değerleri ve şişme basınçları ölçülebilir. İkinci yöntemde, serbest suyun girişinden önce, numune oturma basıncını aşan düşey bir basınca maruz bırakılır. Düşey basıncın büyüklüğü genellikle jeolojik basınca, yapı yüküne ya da her ikisine eşdeğerdir, fakat deney sonuçlarının uygulanmasına bağlı olarak da değişebilir. Numuneye serbest su girişi sağlanır. Bu yöntemle, tahmin edilen jeolojik yüke eşit düşey basınç ve şişme basıncına kadar olan diğer düşey basınçlar için şişme yüzdesi ya da oturma ve şişme basıncı ölçülebilir. Üçüncü yöntemde ise, şişme basıncını bulmak için numune suya daldırıldıktan sonra yüksekliğinin değişmemesini sağlayacak şekilde düşey basınç yüklenir. Daha sonra ASTM D2435'e göre konsolidasyon deneyi yapılır. Boşaltma verileri kabarma potansiyelini belirlemekte kullanılır. Bu yöntemle, şişme basıncı, ön konsolidasyon basıncı ve uygulanan düşey basınç aralığındaki oturma ya da kabarma yüzdesi ölçülebilir.

2.3.1. Mineralojinin ve Zemin Başlangıç Koşullarının Şişmeye Etkisi

Grim (1962), kil zeminlerdeki şişmeyi daneler arası ve dane içi şişme olarak ikiye ayırmıştır. Daneler arası şişmenin, kilin mineralojik kompozisyonundan bağımsız olarak herhangi bir kil zeminde meydana gelebileceğini belirtmiştir. Nispeten kuru olan killi zemin danelerinin, kapiler kuvvetlerden kaynaklanan bir çekim kuvvetiyle bir arada tutulduğunu, buna karşın ıslanmış killerde ise, kapiler kuvvetlerin etkisinin azaldığını ve kilin genişlediğini ifade etmiştir.

Daneler arası şişme, montmorillonit mineralinin karakteristik bir özelliğidir. Bir montmorillonit kristalini oluşturan her bir molekül tabakası zayıf bir şekilde birbirine

bağlıdır. Dolayısıyla, ıslanma meydana geldiğinde, su sadece kristallerin arasına girmekle kalmakta, aynı zamanda, kristalleri de kapsayan birim tabakaların arasına da girmektedir. Sodyum montmorillonit kendi hacminin %2000 'ine kadar genişleyebilmekte ve jel kıvamına gelmektedir. Kalsiyum montmorillonit, sodyum montmorillonitten daha az şişme (%50-%100) gösterir. Kil mineralleri arasında en düşük şişme kapasitesine sahip olan kil, kaolin kili'dir. İllit %15, illit-montmorillonit karışımı %60-%100 oranında şişme gösterebilmektedir. Çizelge 2.2 'de bazı kil minerallerinin karakteristik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.2. Bazı kil minerallerin özellikleri (Mitchell, 1976)

Mineral Grubu	Bazal alan (Å ²)	Partikül özellikleri	Tabakalararası bağ	Spesifik Yüzey (m ² /g)	Kıvam limitleri			Aktivite (PI/ %kil)
					WL %	PL %	SI %	
Kaolin	14.4	Kalın, 6 kenarlı plakalar	Kuvvetli hidrojen bağları	10-20	30-100	25-40	25-29	0.38
İllit	10	İnce, yığılmış plakalar	Kuvvetli potasyum bağları	65-100	60-120	35-60	15-17	0.90
Montmorillonit	9.6	İnce, kuvvetli plakalar	Çok zayıf Van der Waals bağları	700-840	100-900	50-100	8.5-15	7.2

Farklı tiplerdeki kil mineralleri, her bir mineralin elektriksel alanındaki farklardan dolayı, farklı şişme potansiyellerine sahiptirler. Zeminin şişme potansiyeli kil mineralinin tipine, miktarına, kil danelerinin dizilişine, spesifik yüzey alanlarına ve bu daneleri çevreleyen zemin suyunun kimyasına bağlıdır. Zemin suyu kimyasının değişmesi şişmeyi oldukça etkilemektedir. Şişme, zemin suyunun çoğalan katyon konsantrasyonu ve katyon valansı tarafından artırılmaktadır (Mitchell, 1976; Snethen vd., 1977)

Sodyum, kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi tuz katyonları zemin suyunda çözünerek, negatif elektrik yüklerini dengelemek için, değişebilir katyonlar olarak, kil yüzeylerinde adsorbe edilir. Bu katyonların hidratasyonu ve kil kristalleri tarafından ortaya çıkarılan adsorpsiyon kuvvetleri, kil daneleri arasında büyük miktarda suyun toplanmasına sebep olabilirler (Nelson ve Miller, 1992). Çizelge 2.3 'de değişik adsorbe katyonlu kil minerallerinin kıvam limitlerindeki fark

görülmektedir. Değişebilir adsorbe katyonun Na^+ olması, montmorillonit minerali için kıvam limitlerini arttırırken, illit minerali kıvam limitlerini Ca^{++} katyonu arttırmaktadır. Kaolin minerali için ise, değişebilir katyon Mg^{++} olduğunda kıvam limitleri artmaktadır.

Çizelge 2.3. Değişik adsorbe katyonlu kil minerallerinin kıvam limitleri değerleri (Chen, 1988)

Kil Minerali \ Katyon Tipi	Na^+		K^+		Ca^{++}		Mg^{++}	
	Likit Limit, %	Plastisite İndisi, %	Likit Limit, %	Plastisite İndisi, %	Likit Limit, %	Plastisite İndisi, %	Likit Limit, %	Plastisite İndisi, %
Kaolin	29	1	35	7	34	8	39	11
İllit	61	27	81	38	90	50	83	44
Montmorillonit	344	251	161	104	166	101	158	99

Sıcaklık artarken plastisite indisi ve likit limit doğru orantılı olarak artmakta, suyun anyon ve katyon miktarlarının artmasıyla kıvam limitleri azalmakta, deney suyu bekleme süresinin artmasıyla kıvam limitleri değerleri artmaktadır. Bütün bu faktörlerin yüksek plastisiteli kil numunelerine etkisi, düşük plastisiteli kil numunelerine etkisinden daha fazla olmaktadır (Keskin, 1989).

Ülker vd (1993), Mesri vd. (1994), Keskin ve Çimen (1998), mineralojik yapının şişmeye etkisinin araştırıldığı diğer çalışmalardır. Hakim kil mineralinin montmorillonit olması durumunda şişme basıncının arttığı belirtilmiştir. Ülker vd (1993), ayrıca, diziliş farklılığından dolayı düşey ve yanal yönde alınan numunelerin şişme basınçlarının farklı olduğunu göstermişler ve doğal olarak ön yüklemenin düşey yönde alınan numunelerde daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Keskin vd. (1992), sıkıştırılmış killi zemin numunelerinin yanal yöndeki şişme davranışının izotrop ve anizotrop gerilme şartları altındaki değişimini araştırmışlardır. Bu amaçla, yüksek plastisiteli kil numunesi üzerinde modifiye edilmiş üç eksenli basınç deneyleri yapmışlardır. İzotropik gerilme şartları altında sabit çevre basıncında farklı efektif gerilmeler için, yanal şişme basınçlarının efektif gerilmelerdeki artışla ters orantılı olarak azaldığını göstermişler ve efektif gerilmeler

arttıkça, nihai yanal şişme basıncına ulaşma süresinin azaldığını belirtmişlerdir. Anizotropik gerilme şartları altında, yanal şişme basınçlarının efektif gerilmelerdeki artışla ters orantılı olarak azaldığını göstermişler ve anizotropik gerilme şartları altında oluşan şişme basınçlarının izotropik gerilmelerin uygulandığı ortamdakilerden daha küçük olduğunu belirtmişlerdir.

Çokça ve Birand (1992), killi zeminlerde büzülme ve şişme etkisi ile meydana gelen çatlak ve fisürlerin oluşum mekanizmalarını açıklamışlardır. Şişme miktarı, şişme basıncı ve şişme hızlarının fisürlerin varlığına bağlı olarak değiştiğini ifade etmişlerdir. Büzülme çatlaklarının, daha önceden oluşacağı, şişme çatlaklarının ise büzülme çatlaklarının şişen zemin ile dolmadığı sürece oluşmayacağını belirtmişlerdir.

Viani vd. (1985), Komine ve Ogata (1996) ve Keskin vd. (1998b) şişme karakteristiklerinin çift tabaka teorisi ile ilişkisinin araştırıldığı çalışmalardır. Viani vd. (1985), vermikulitteki tabakalar arası mesafe ile şişme basıncı arasındaki ilişkinin direkt olarak ölçülmesini ele almışlardır. Şişmenin çift tabaka teorisini uygulamak için tabakalar arası ayrılmayı, λ , şişme basıncının bir fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir. Şişme basıncının, $1 / \lambda$ 'nın exponansiyel bir fonksiyonu olduğunu ve şişme basıncı ile λ arasında gözlenen ilişkinin çift tabaka teorisinden tahmin edilen şişme basıncı ile uyumadığını göstermişlerdir.

Komine ve Ogata (1996), sıkıştırılmış bentonit numuneleri kullanarak, iki montmorillonit tabakası arasındaki kuvvetle, şişme karakteristikleri arasındaki ilişkileri göstermişlerdir. Çift tabaka denklemlerini kullanarak, iki paralel plaka arasındaki birim alana düşen P kuvvetini şu şekilde elde etmişlerdir.

$$P = f_r - f_a \quad (2.17)$$

Burada, f_r iki paralel plaka arasındaki birim alandaki itki kuvveti ve f_a ise, iki paralel plaka arasındaki birim alandaki çekim kuvvetidir. Montmorillonitin hacimsel şişme yüzdesini aşağıdaki gibi tanımlamışlardır:

$$\varepsilon_{sv*} = \frac{V_v + V_{sv}}{V_m} * 100(\%) \quad (2.18)$$

Burada, V_v sıkıştırılmış bentonitteki boşlukların hacmi, V_m sıkıştırılmış bentonitteki montmorillonit hacmi ve V_{sv} sabit düşey basınçta sıkıştırılmış montmorillonitin maksimum şişme deformasyonudur.

Sıkıştırılmış bentonitin şişme mekanizmasını açıklayarak, Denklem 2.18 ile, sıkıştırılmış bentonitin maksimum şişme deformasyonu, ε_{smaks} , arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi vermişlerdir.

$$\varepsilon_{sv*} = \frac{\left(1 + \frac{\varepsilon_{smaks}}{100}\right) \frac{\rho_s}{\rho_{d0}} - 1}{\frac{C_m}{100}} * 100(\%) \quad (2.19)$$

Burada, ρ_s bentonitin birim hacim ağırlığı, ρ_{d0} sıkıştırılmış bentonitin başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ve C_m ise, bentonitteki montmorillonit miktarıdır.

Komine ve Ogata (1996), önerdikleri bu metodun uygulanabilirliğini, sıkıştırılmış bentonitlerin şişme basıncı ve şişme deformasyonu ile, tahmin edilen değerleri karşılaştırarak göstermişlerdir. Şişme basıncının 3000 kPa 'dan az olan sodyum bentoniti için şişme karakteristiklerinin, önerdikleri metotla bulunabileceğini göstermişlerdir.

Keskin vd. (1998b), zeminlerde emme ve şişme özellikleri ile elektriksel çift tabaka ve mineralojik yapı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta kompaksiyonla sıkıştırarak hazırlanan ve ödometre ringine alınan numuneler üzerinde ödometre yöntemi ile emme ve serbest şişme deneyleri yapmışlardır. Zemin numuneleri üzerinde X-Ray analizleri yaparak montmorillonit miktarı fazla olan killerin daha yüksek emme kapasitesine ve şişme

yüzdesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Daha kalın çift tabakaya sahip olan kil minerallerinin, zemin içerisinde bulunma miktarının, zeminin emme ve şişme özelliklerini direkt olarak etkilediğini ifade etmişlerdir.

Seed vd. (1962), El-Sohby vd. (1981), Chen (1988), Komine ve Ogata (1994) ve Komine ve Ogata (1999), başlangıç koşullarının şişme potansiyeline etkisinin araştırıldığı diğer çalışmalardır. Seed vd. (1962), sıkıştırılmış zeminlerde şişme miktarının sıkıştırma su muhtevasına, kuru birim hacim ağırlığa ve kompaksiyon yöntemine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Optimum su muhtevasının üzerindeki su muhtevalarında, şişme miktarının, kompaksiyon derecesinden bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı numunedeki statik ve dinamik kompaksiyon farkının şişme miktarını etkilediğini, dinamik kompaksiyonla hazırlanmış numunede daha düşük şişme yüzdesi elde edildiğini göstermişlerdir.

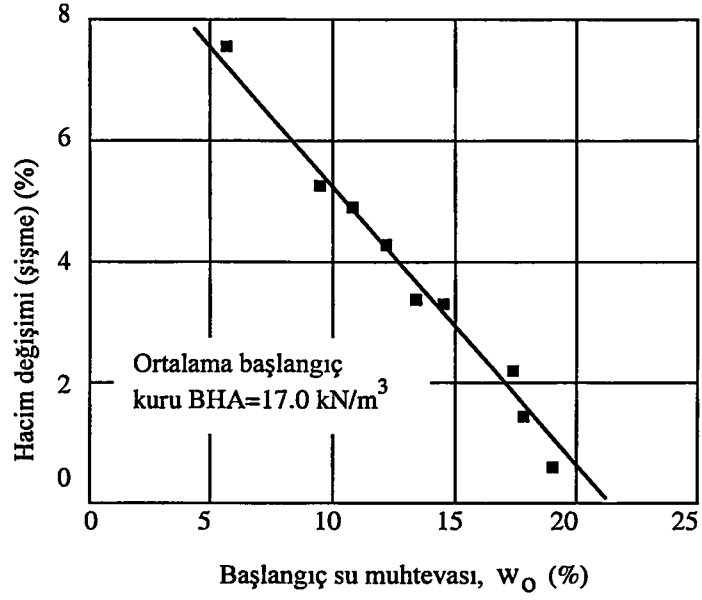
Chen (1988), su muhtevastaki küçük bir değişikliğin yaklaşık %1-2 oranında dahi, ciddi bir şişmeye neden olabileceğini, şişen zeminlerin başlangıç su muhtevastının şişmenin miktarını kontrol ettiğini belirtmiştir. Tabii su muhtevastı %15 'in altında olan killerin, şişme açısından tehlikeli olduğunu, böyle killerin %35 oranından daha fazla suyu kolaylıkla adsorbe edebildiklerini, su muhtevastı %30 'un üzerindeki killerde şişmenin daha önceden meydana geldiğinin anlaşıldığını ve daha düşük oranlarda bir şişme beklenildiğini belirtmiştir. Ayrıca, başlangıç su muhtevastı ile direk olarak ilişkili olan kilin kuru birim hacim ağırlığının şişmenin bir belirleyicisi olduğunu ve 17.62 kN/m^3 'den daha yüksek kuru birim hacim ağırlıklı zeminlerin yüksek şişme potansiyeli gösterebileceklerini belirtmiştir. Geoteknik mühendisliğinde, sıkıştırılmış zeminlerin kullanıldığı dolgularda, daha çok $16.0\text{-}20.83 \text{ kN/m}^3$ aralığındaki kuru birim hacim ağırlıklarla ilgilenildiğini ve şişmeye dikkat edilmesi gerektiğini ifade etmiştir.

El-Sohby vd. (1981), kil zeminlerin şişme davranışını etkileyen faktörler olarak başlangıç su muhtevastı, kil mineralinin tipi, başlangıç kuru birim hacim ağırlık, kil miktarı ve dane dağılımını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, likit limiti %84, plastik limiti %28 olan kil numunesini farklı su muhtevalarında (%5, 10, 15, 20 ve 25)

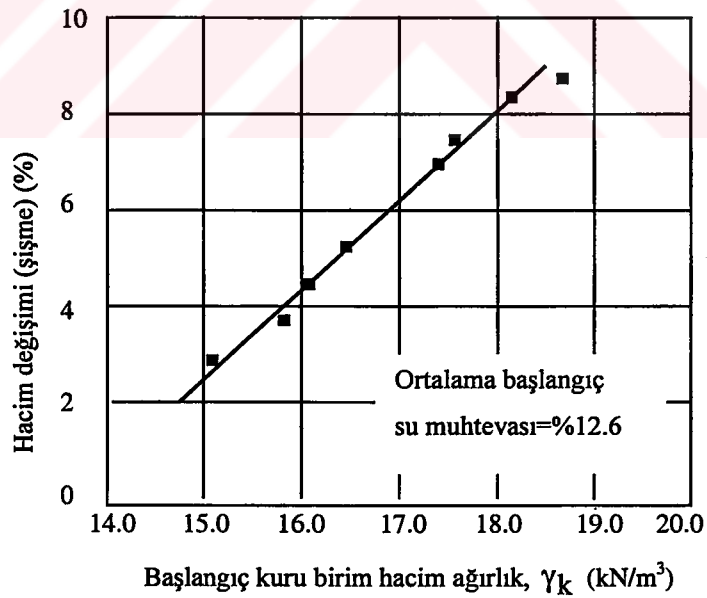
sıkıştırarak kullanmışlardır. Ayrıca, bu kil zemin numunesini, kuma ve silte farklı oranlarda karıştırarak farklı kuru birim hacim ağırlıklarda ($\gamma_k=10.0, 15.5, 17.0, 18.0$ kN/m³) sıkıştırmışlardır. Hazırladıkları her bir numunenin şişme yüzdesi ve şişme basınçlarını ödometre deney sistemi yardımıyla belirlemişlerdir. Kil mineral tipinin şişme üzerindeki etkisini incelemek için de likit limiti %81, plastik limiti %34 olan başka bir zemin numunesi kullanmışlardır.

Ayrıca, aynı kuru birim hacim ağırlıktaki numuneler için başlangıç su muhtevasının artmasıyla, şişmenin azaldığını göstermişlerdir. Bunu da başlangıç su muhtevasının artmasıyla, doyumluk derecesinin artmakta, adsorbe çekim kuvvetinin düşmekte ve dolayısıyla, tam doyumluk için gerekli adsorbe su miktarının azalacağından, şişme miktarının da azalacağı şeklinde yorumlamışlardır. Rötire limitine ulaşana kadar, başlangıç su muhtevasının, şişme ve şişme basıncı üzerinde çok küçük etkiye sahip olduğunu, rötire limitinin üzerindeki su muhtevalarında ise, şişmenin ve şişme basıncının başlangıç su muhtevasının artmasından daha çok etkilendiği belirtmişlerdir. Sabit su muhtevasında, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının artmasıyla şişme potansiyeli ve şişme basıncının arttığını göstermişlerdir. Kil miktarının şişme potansiyeli ve şişme basıncı üzerindeki etkisini de araştırmak için, kum ve silte farklı oranlarda kil karıştırmışlardır. Aynı kil yüzdesindeki siltin, kuma göre daha fazla şişme potansiyeline ve şişme basıncına sahip olduğunu göstermişlerdir.

Chen (1988), sıkıştırılmış zeminlerin toplam şişme miktarı üzerinde başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığının etkisini araştırmıştır. Likit limiti %44 plastik limiti %20 olan siltli kil zemin üzerinde ödometre yöntemi ile şişme deneyleri yapmıştır. Başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlığının hacim değiştirme yüzdesi ile ilişkilerini Şekil 2.23 ve Şekil 2.24 'deki gibi vermiştir.

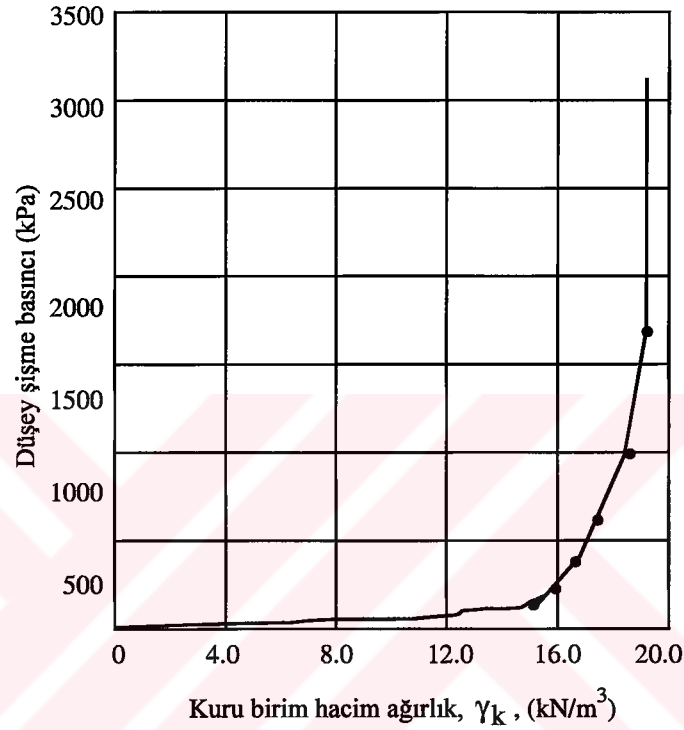


Şekil 2.23. Sabit başlangıç kuru birim hacim ağırlıklı numuneler için başlangıç su muhtevası değişiminin toplam kabarmaya etkisi (Chen, 1988)



Şekil 2.24. Sabit başlangıç su muhtevalı numuneler için başlangıç kuru birim hacim ağırlığının toplam kabarmaya etkisi (Chen, 1988)

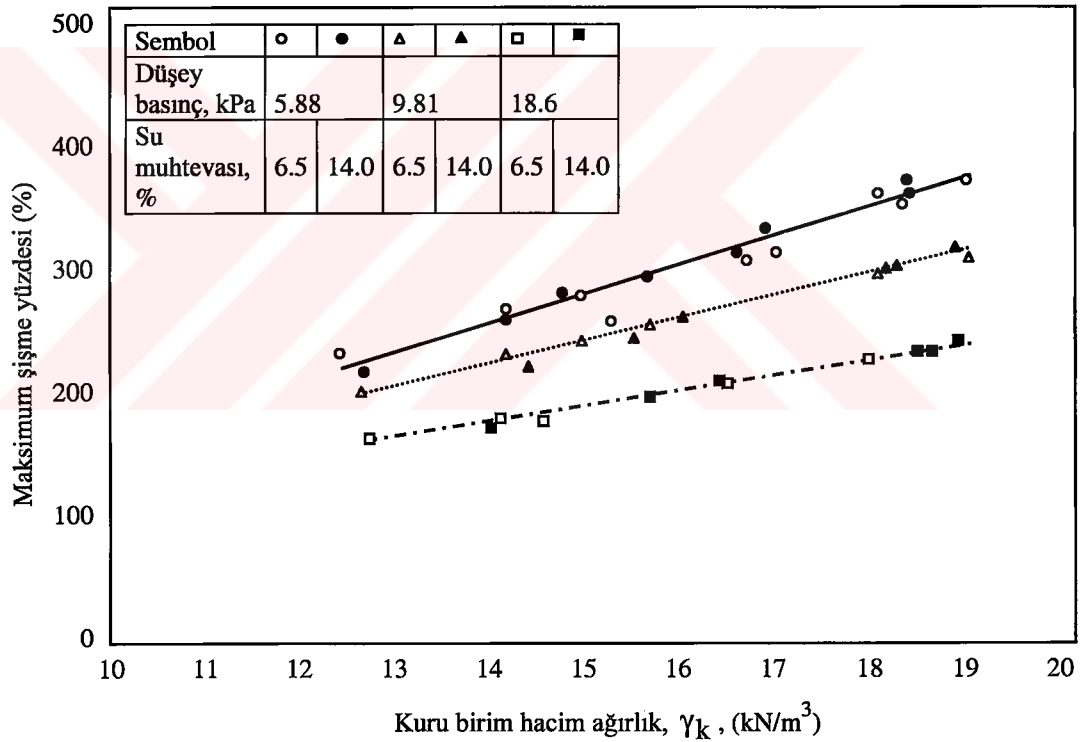
Şekil 2.23 'den başlangıç su muhtevasının artmasıyla hacim değiştirme yüzdesinin azaldığı, Şekil 2.24 'den de kuru birim hacim ağırlığının artması ile hacim değiştirme yüzdesinin arttığı görülmektedir. Kuru birim hacim ağırlık ile düşey şişme basıncı arasındaki ilişkiyi de Şekil 2.25.'deki gibi göstermiş ve aralarında eksponansiyel bir ilişkinin olduğunu belirtmiştir.



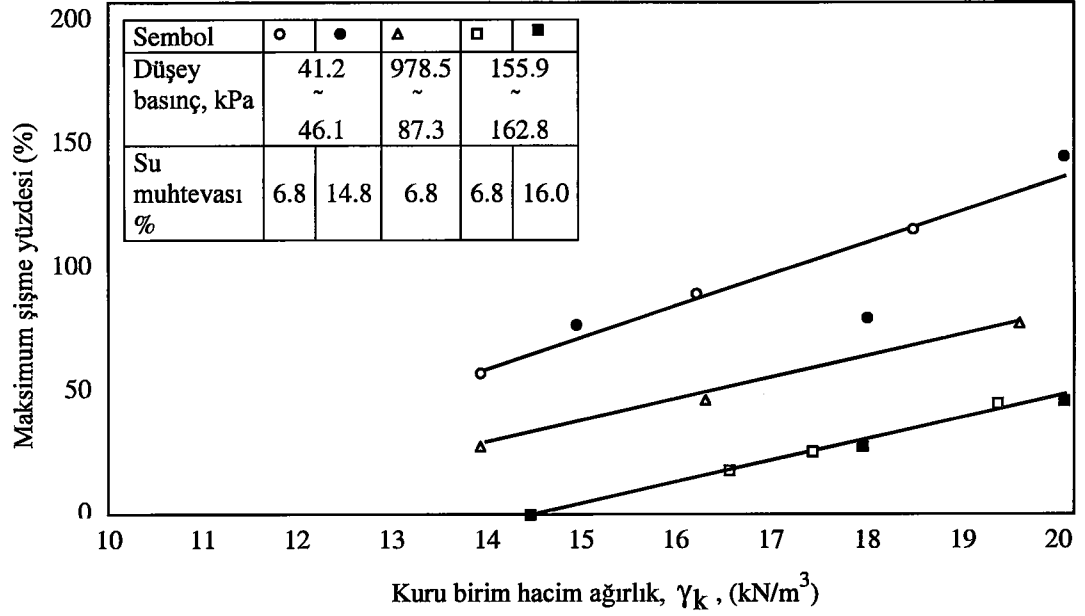
Şekil 2.25. Düşey şişme basıncına kuru birim hacim ağırlığının etkisi
(Chen, 1988)

Komine ve Ogata (1994), sıkıştırılmış bentonitin şişme karakteristiklerini araştırmak için şişme basıncı ve şişme deformasyon deneyleri yapmışlardır. Çalışmalarında, likit limiti %474, plastik limiti %27 olan ticari sodyum bentonit kullanmışlardır. Farklı kuru birim hacim ağırlıklarda ve farklı su muhtevalarında sıkıştırarak hazırladıkları numuneler üzerinde, ödometre deney aleti kullanarak farklı düşey basınçlar için şişme-deformasyon deneyleri yapmışlardır. Kuru birim hacim ağırlık arttığında maksimum şişme yüzdesinin arttığını göstermişlerdir.

Şişme yüzdesi ile zaman arasındaki ilişkinin, kuru birim hacim ağırlığı düşük olan numunelerde ($\gamma_k=13.8 \text{ kN/m}^3$), ilk su muhtevasından hemen hemen bağımsız olduğunu, yüksek kuru birim hacim ağırlıklı numunelerde ($\gamma_k=18.3-18.4 \text{ kN/m}^3$) ise, ilk su muhtevasına bağımlı olduğunu belirtmişlerdir. Kuru birim hacim ağırlık ile maksimum şişme yüzdesi arasındaki ilişkiyi Şekil 2.26 ve Şekil 2.27 'de vermişlerdir. Düşey basıncın düşük olduğu durumlarda, şişme yüzdesinin daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Maksimum şişme yüzdesi, başlangıç su muhtevasından oldukça bağımsızken, kuru birim hacim ağırlığına ise bağımlı olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca maksimum şişme basıncının da kuru birim hacim ağırlık artarken arttığını, başlangıç su muhtevasından ise neredeyse bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.26. Düşey basıncın düşük olduğu deneyler için kuru birim hacim ağırlık ile maksimum şişme yüzdesi ilişkisi (Komine ve Ogata, 1994)



Şekil 2.26. Düşey basıncın yüksek olduğu deneyler için kuru birim hacim ağırlık ile maksimum şişme yüzdesi ilişkisi (Komine ve Ogata, 1994)

Komine ve Ogata (1999), nükleer atık depolarında kullanmak üzere, kum bentonit karışımının şişme karakteristikleri üzerinde başlangıç kuru birim hacim ağırlığının ve bentonit miktarının etkisini araştırmışlardır. Bentonit oranının aynı olduğu numunelerde, şişme basıncının ve maksimum şişme deformasyonunun, kuru birim hacim ağırlığının artmasıyla arttığını göstermişlerdir. Aynı kuru birim hacim ağırlıklı karışımlarda ise, maksimum şişme basıncı ve maksimum şişme deformasyonunun bentonit miktarının artmasıyla arttığını belirtmişlerdir.

2.3.2. Şişme Özelliklerine Etki Eden Diğer Faktörler ve Şişme Özelliklerinin Tahmini İle İlgili Çalışmalar

Sürşarj yükünün büyüklüğü, verilen bir su muhtevası ve birim hacim ağırlık için, oluşacak hacim değişiminin miktarını etkiler. Dışarıdan uygulanan yük, daneler arası itki kuvvetlerini dengelemeye çalışır ve şişme basıncını azaltır (Holtz, 1959). Seed vd. (1962) sıkıştırılmış numunelerin şişme yüzdelere sürşarj basıncının etkisini araştırmıştır. Sürşarj yükünün artmasıyla şişme yüzdesinin azaldığını göstermişlerdir. Chen (1988), sabit başlangıç su muhtevasında ve sabit başlangıç kuru birim hacim

ağırlıkta sıkıştırarak hazırladığı numuneler üzerine farklı sürşarj basınçları uygulayarak şişme deneyleri yapmıştır. Sürşarj basıncının artmasıyla, numunelerin hacim değiştirme yüzdesinin azaldığını, buna karşın şişme basıncının çok fazla etkilenmediğini göstermiştir. Sürşarj yükünün, temel deformasyonunu kontrol etmede esas olduğunu belirterek, şişme basıncının belirlenmesi ile uygun bir temel dizaynının yapılabileceğini ifade etmiştir. 6.89 kPa ile 68.9 kPa 'lık sürşarj basıncı altında fazla hacim değişiminden dolayı, şişme karakteristiklerinin direk ölçümünde, şişme basıncının kullanılmasının faydalı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, Chen (1988) çalışmasında, tabaka kalınlığının etkisini de araştırmıştır. Değişik numune kalınlıkları için boşluk oranı-efektif basınç (e-log P) eğrilerinin şeklinin yaklaşık aynı kaldığını, şişme basıncının sabit olduğunu ve hacim artışının arttığını göstermiştir .

Holland ve Lawrence (1980), zemin profilindeki şişen tabakaların yerleşimi ve kalınlığının, şişme potansiyelini etkilediğini ve en büyük şişmenin, aktif zonda bulunan şişen killerde oluştuğunu belirtmişlerdir.

Gadre ve Chandrasekaran (1994) çalışmalarında, likit limiti %71, plastik limiti %32 olan CH tipi zemin numunesini kullanarak, tabaka kalınlığının şişmeye etkisini incelemişlerdir. Şişmenin büyüklüğünün zemin tabakasının kalınlığına bağlı olduğunu belirtmiştir.

Bekkouche vd. (2000), şişme yada büzülmenin büyüklüğünün kil mineralinin tipine ve çokluğuna, geçmişteki kil tabakasının mukavemetine, su muhtevası değişimine ve kil plakalarının kalınlığına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Keskin vd. (1994), aşırı konsolidasyon oranının zeminlerin şişme davranışına etkisini araştırmışlardır. Likit limiti %80, plastik limiti %28 olan yüksek plastisiteli kil numunesi üzerinde ödometre deney aleti ile sabit hacimli şişme deneyleri yaparak, kil numunesinin şişme basınçlarını belirlemişlerdir. Daha sonra aynı zemin numunelerini, farklı ön yük değerlerinde konsolide ederek bu numunelerin şişme basınçlarını bulmuşlardır. Bu deneylerdeki numuneler %15 su muhtevasında, 17.9

kN/m^3 kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırarak hazırlanmıştır. Çalışmada, zeminlerin şişme davranışının aşırı konsolidasyon oranından önemli ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Zeminin sahip olduğu aşırı konsolidasyon değerine kadar, aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla şişmenin arttığını, ancak bu değerden sonra şişme basıncının azaldığını grafiklerle göstermişlerdir.

Day vd. (1995), sıkıştırılmış zeminlerin oturma ve şişme davranışları ile üç eksenli boşluk suyu parametresini (A) karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında iki farklı kil zemin numunesi ve bir tane siltli kum numunesi kullanarak üç eksenli basınç deneyleri ve bir boyutlu şişme ve göçme deneyleri yapmışlardır. Üç eksenli basınç deneylerinde elde ettikleri A değerlerini ve ödometre deneylerindeki şişme veya oturma değerlerini Çizelge 2.4 'de göstermişlerdir. Boşluk suyu parametresi (A) değerine göre zemin davranışının kuru birim hacim ağırlıktan bağımsız olarak tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

Çizelge 2.4. Optimum su muhtevasında sıkıştırılmış numuneler için A değerine karşı zemin davranışı (Day vd., 1995)

Zemin tipi	Boşluk suyu parametresi (A) değerleri			
	$A < 0$	$0 < A < 0.4$	$0.4 < A < 0.6$	$A > 0.6$
Sıkıştırılmış granüler zemin	Çökme yok	Çok az çökme	Geçiş: Muhtemel çökme	Önemli çökme
Sıkıştırılmış kil	Çok yüksek şişme	Önemli şişme	Geçiş: Biraz şişme veya çökme	Önemli çökme

Lin ve Benson (2000) ve Jo vd. (2001), iki geotekstil arasında bulunan kil tabakalarının hidrolik kondaktivitelerinin şişmeye etkisini incelemişlerdir. Lin ve Benson (2000) çalışmalarında, farklı kimyasal içerikli sıvılar kullanmışlardır. Islanma aşamasında $0.0125 \text{ mol CaCl}_2$ yada çeşme suyu kullanıldığı zaman ıslanma-kuruma devir sayısının artması ile bentonitin plastisitesinin azaldığını göstermişlerdir. $\text{PH} = 6.5$ olan saf su kullanıldığı zaman, ıslanma-kuruma devirleri ile plastisitenin arttığını belirtmişlerdir. Bunun sebebini de, saf su kullanıldığında sodyum iyonlarının kaybolması ve bunun sonucunda da, daha düşük tuz konsantrasyonu, daha büyük çift tabaka kalınlığı ve daha büyük plastisite ortaya çıkması şeklinde açıklamışlardır. $\text{PH} = 6.5$ ve $\text{PH} = 6.8$ 'deki kuruma-ıslanma

periyotlarının 7 ıslanma –kuruma devrinden sonra, bentonitin şişmesi üzerinde çok az etkili olduğu ifade etmişlerdir. Bununla beraber, CaCl_2 çözeltisi ile iki ıslanma devrinden sonra şişmenin azaldığını belirtmişlerdir.

Chen (1965), kuruma-ıslanma devirlerine maruz kalan kil zemin numunelerinde şişmenin yorulmasına dikkati çekmiş ve devir sayısının artması ile şişme yüzdesinde azalma meydana geldiğini göstermiştir. Mitchell (1976) ve Kassiff ve Baker (1971), tekrarlı ıslanma ve kurumanın, laboratuvar numunelerindeki şişmeyi azalttığını, ancak, kuruma ıslanma devirlerinin belirli bir sayısından sonra şişmenin etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Day (1994), sıkıştırılmış bir kilin şişme, büzülme davranışını incelemek için, hazırladığı numunelerin 1.5 günlük periyotlarla şişmesine izin vermiştir. Daha sonra numuneleri 2.5 gün güneşte kurumaya bırakmış ve düşey büzölmeleri hesaplamıştır. Şişme aşamasında numune eski çapına döndüğü için yatay büzölmeyi de buradan hesaplamıştır. Şişme–büzölme devirlerini 10 kez tekrarlamış ve çalışmaları sonucunda bu şekilde ıslanma-kuruma devirlerine maruz kalan bir kilin beklenen şişmeden daha fazla bir şişme göstereceğini belirtmiştir.

Basma vd. (1996) ‘de benzer bir çalışma yapmışlar ve 4 farklı plastisiteye sahip zemin kullanarak devirsel şişme davranışını incelemişlerdir. Zemin kısmen ıslatılıp kurutulduğunda, şişme kapasitesinde bir azalmanın (su adsorpsiyon kapasitesinde azalma) gözlemlendiğini, diğer taraftan zemin tamamen kurduğunda şişme potansiyelinde artmanın gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Zeminin muhtemel şişme derecesinin belirlenmesi ile ilgili literatürde daha bir çok çalışma yapılmıştır. Altmeyer (1955), lineer rötre ve rötre limitine bağlı olarak muhtemel şişme yüzdeleri Çizelge 2.5 ‘de göstermiştir. Rötre limiti %10 ‘dan küçük olduğunda şişmenin kritik durumda olduğunu belirtmiştir.

Çizelge 2.5. Lineer rötre veya rötre limitine bağlı olarak şişen zeminlerin sınıflandırılması (Altmeyer, 1955)

Lineer rötre	Rötre limiti %	Muhtemel şişme %	Şişme derecesi
<5	>12	<0.5	Kritik değil
5-8	10-12	0.5-1.5	Marjinal
>8	<10	>1.5	Kritik

Holtz ve Gibbs (1956), Çizelge 2.5 'e plastisite indisi ve kil miktarını da ekleyerek daha genişletilmiş bir çalışma yapmışlardır. 1 psi 'lik düşey yük altında serbest şişme deneyleri yaparak rötre limiti, plastisite indisi ve kil miktarının şişme yüzdesi ile ilişkisini Çizelge 2.6 'da vermişlerdir. Plastisite indisi %35 'den büyük, rötre limiti %11 'den az ve kil miktarı %28 'den fazla olduğunda muhtemel şişme yüzdesinin %30 'dan büyük olacağını ve bunun da çok yüksek şişme olarak ifade edilebileceğini belirtmişlerdir.

Çizelge 2.6. Rötre limiti, plastisite indisi ve kil miktarına bağlı olarak şişen zeminlerin sınıflandırılması (Holtz ve Gibbs, 1956)

Kil miktarı %	Plastisite indisi %	Rötre limiti %	Muhtemel şişme %	Şişme derecesi
>28	>35	<11	>30	Çok yüksek
20-31	25-41	7-12	20-30	Yüksek
13-23	15-28	10-16	10-20	Orta
<15	<18	>15	<10	Düşük

Raman (1967), Altmeyer (1955) 'e benzer bir çalışma yapmış ve Çizelge 2.7 'yi önermiştir. Rötre limiti %40 'dan büyük ve plastisite indisi %32 'den büyük olduğunda zeminin şişme derecesinin çok yüksek olacağını belirtmiştir.

Çizelge 2.7. Rötire limiti ve plastisite indisine bağlı şişen zemin sınıflandırılması
(Raman, 1967)

Plastisite indisi %	Rötire limiti %	Şişme derecesi %
<12	<15	Düşük
12-23	15-30	Orta
23-32	30-40	Yüksek
>32	>40	Çok yüksek

Chen (1988), plastisite indisi %35 'den büyük olan zeminleri şişme potansiyeli yüksek olan zeminler olarak sınıflandırmıştır.

Seed vd. (1962), tabii zeminin şişme potansiyeli için $\pm\%35$ 'lik bir yaklaşımla plastisite indisine bağlı olarak aşağıdaki ifadeyi vermişlerdir.

$$S = 2.16 \times 10^{-3} \times PI^{2.44} \quad (2.20)$$

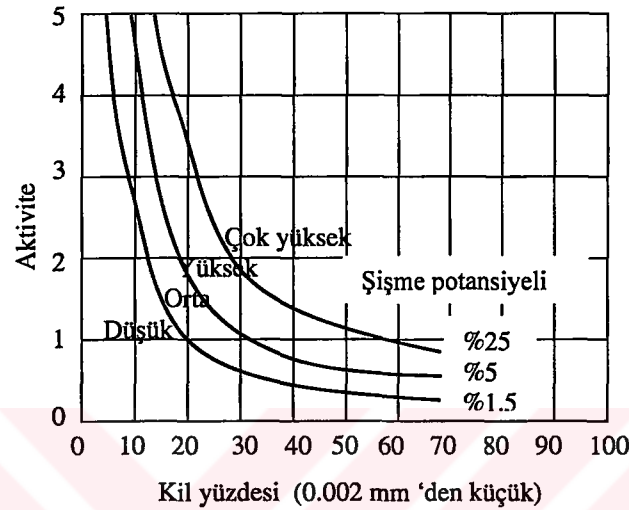
Burada, S şişme potansiyelini ve PI ise, plastisite indisini göstermektedir. Toplam şişme, şişme potansiyeli ve plastisite indisine bağlı yaklaşık değerler ise Çizelge 2.8 'de görülmektedir.

Çizelge 2.8. Plastisite indisi, şişme potansiyeli ve toplam şişme arasındaki yaklaşık ilişki (Seed vd., 1962)

Plastisite indisi %	Şişme potansiyeli ^a %	Toplam şişme ^b %
10	0.4-1.5	4.5-10
20	2.2-3.8	13.5-18.7
30	5.7-12.2	21.4-18
40	11.8-25	28-53
50	20.1-42.6	33-40

Burada *a* üst sembolü, optimum su muhtevasında 1 psi sürşarj yükü altında şişmesine izin verilmiş numunelerin şişme potansiyelini ve *b* üst sembolü ise, 1 psi sürşarj yükü altında doygun hale getirilmiş numunelerin şişme potansiyelini göstermektedir.

Seed vd. (1962), kil yüzdesi ve aktiviteye bağlı olarak sıkıştırılmış killer için sınıflandırma kartı elde etmişlerdir (Şekil 2.28). Seed vd. (1962) verdikleri kartta, şişme potansiyelini düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olarak dört gruba ayırmışlardır.



Şekil 2.28. Şişme potansiyeli için sınıflandırma kartı (Seed vd., 1962)

Chen (1965), laboratuvar ve arazi deneylerini birleştirerek Çizelge 2.9 'u önermiştir. Chen (1965), No.200 eleği altına geçen malzeme miktarı %95 'den fazla, likit limiti %60 'dan büyük ve SPT darbe sayısı 30 'dan büyük olduğunda muhtemel şişme yüzdesinin %10 'dan büyük olduğunu ve bunun da çok yüksek şişme olarak ifade edilebileceğini belirtmiştir.

Çizelge 2.9. Rocky dağı zeminleri için standart penetrasyon dayanımları, likit limit ve No.200 elek altına geçen malzeme miktarına bağlı olarak şişen zeminlerin sınıflandırılması (Chen, 1965)

200 nolu elekten geçen %	Likit limit %	Standart penetrasyon darbe sayısı	Muhtemel şişme %	Şişme derecesi
>95	>60	>30	>10	Çok yüksek
60-95	40-60	20-30	3-10	Yüksek
30-60	30-40	10-20	1-5	Orta
<30	<30	<10	<1	Düşük

Chen (1988), tabii zemin numunelerindeki küçük yapıların genellikle tatbik edeceği 50 kN/m^2 'lık yük altında yaptığı şişme deney sonuçlarını, indeks özelliklerini ve SPT değerlerini göz önüne alarak Çizelge 2.10 'u vermiştir.

Çizelge 2.10. Şişen killerde muhtemel hacim değişiklikleri için veriler
(Chen, 1988)

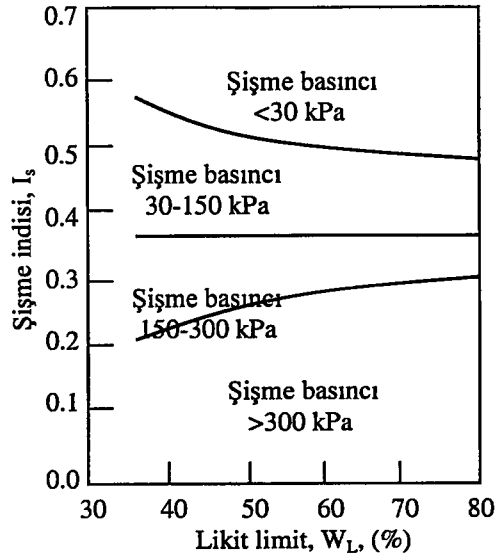
200 nolu elekten geçen %	Likit limit %	Standart penetrasyon darbe sayısı	Toplam hacmin yüzdesi olarak muhtemel şişme	Şişme basıncı (kN/m^2)	Şişme derecesi
>95	>60	>30	>10	>1000	çok yüksek
60-95	40-60	20-30	3-10	250-1000	Yüksek
30-60	30-40	10-20	1-5	150-250	Orta
<30	<30	<30	<1	<50	Düşük

Wayne vd. (1984), yukarıdaki Çizelgenin bir benzerini temel tasarımında kullanılmak üzere aşağıdaki gibi vermişlerdir (Çizelge 2.11).

Çizelge 2.11. Hacim değişikliği, şişme basıncı ve muhtemel hasar arasındaki ilişki (Wayne vd.,1984)

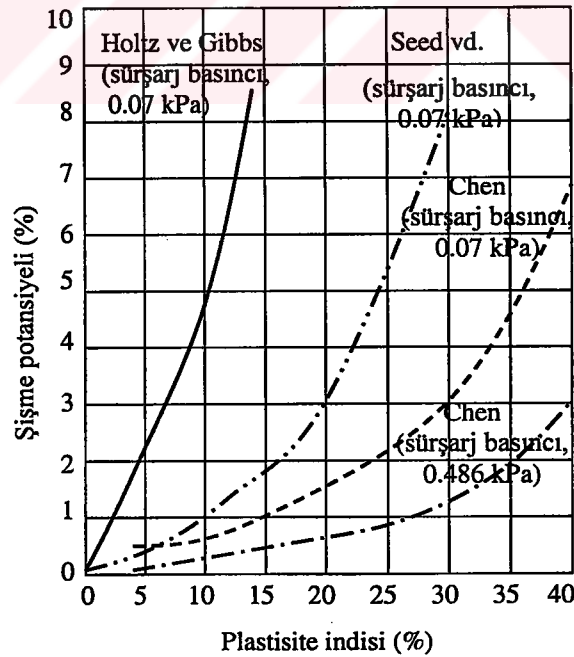
Hacim değişikliği %	Şişme basıncı (kN/m^2)	Muhtemel hasar
0-1.5	<0.50	Düşük
1.5-5	50-250	Orta
5-25	250-1000	Yüksek
>25	>1000	Çok yüksek

Chen (1988), şişme indisi ile likit limit ilişkisini Şekil 2.29 'daki gibi göstermiş ve şişme basınçlarına göre dört bölge tanımlamıştır.



Şekil 2.29 Şişme indisi – likit limit ilişkisi (Chen, 1988)

Chen (1988), şişen zeminlerin sınıflandırılması için yapılan çalışmaları birleştirerek Şekil 2.30 'da göstermiştir. Şişme potansiyelinin plastisite indisi ile değişimini çeşitli araştırmacılar tarafından oldukça farklı olarak bulunmuştur. Bu farkın deney yöntemlerinde ve zemin tipindeki farklılardan kaynaklanabileceğini belirtmiştir.



Şekil 2.30. Şişen zeminlerin tanımlanması için farklı çalışmaların karşılaştırılması (Chen, 1988)

Snethen vd. (1977), arazideki tabii su muhtevastaki zeminin emme basıncı, plastisite indisi ve likit limite bağılı olarak şişme potansiyelini Çizelge 2.12 'de görüldüğü gibi üç gruba ayırmıştır. Zemin emmesi 400 kPa 'dan büyük, plastisite indisi %35 'den büyük ve likit limiti %60 'dan büyük olduğunda potansiyel şişme yüzdesinin %1.5 'dan fazla olacağını göstermişlerdir.

Çizelge 2.12. Arazi emmesi, plastisite indisi ve likit limite bağılı şişen zemin sınıflandırılması (Snethen vd., 1977)

Likit limit %	Plastisite indisi %	Tabii su muhtevastaki zeminin emme basıncı kPa	Şişme potansiyeli %	Şişme derecesi
>60	>35	>400	>1.5	Yüksek
50-60	25-35	150-400	0.5-1.5	Orta
<50	<25	<150	<0.5	Düşük

Aytekin ve Şenol (2000), zeminin şişme davranışını sonlu elemanlar modeli ile modellemişlerdir. Modelde, zemin kütlesinin poisson oranı, birim hacim ağırlığı ve zemin emme zarfını girdi olarak kullanmışlardır. Hesabın doğruluğunun zemin emme zarfının hassas bir şekilde belirlenmesine (Aktif derinlikteki zemin emme basıncı değerleri zemin emme basıncı zarfı olarak tanımlanmış ve bu zarfların belirlenmesi Aytekin (1995) tarafından verilmiştir.) ve elastisite modülünün derinlikle değişiminin hassas bir şekilde tespit edilmesine bağılı olduğunu belirtmişlerdir.

2.4. Zemin Parametrelerinin Belirlenmesinde Bulanık Mantığın Kullanıldığı Çalışmalar

Üç fazlı bir malzeme olan zemin, homojen ve izotrop olmayan bir yapıya sahiptir. Bu özelliğinden dolayı zeminler, birçok belirsizlikler taşımaktadır. Zeminin emme ve şişme davranışı; diğer zemin davranışlarında da (gerilme-şekil değiştirme, konsolidasyon vb.) görüldüğü gibi lineer olmama özelliği göstermekte, birçok faktöre bağılı olarak değişmekte, dolayısıyla bazı belirsizlikler içermektedir.

Zemin davranışının anlaşılması için, arazide ve laboratuvarda birçok deney yapılmaktadır. Yapılan laboratuvar deneylerinde, arazideki gerilme şartlarını uygulamaya ve arazideki zemin yapısını korumaya çok dikkat edilmelidir. Bu nedenlerle, arazideki problemlerin deneysel yöntemlerle ilişkisinin kurulabilmesi için kavramsal (matematiksel) modellere ihtiyaç duyulmaktadır (Delage ve Graham, 1996).

Zeminlerin davranışlarının modellenmesi ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan birisi olan yapay sinir ağları ile, zeminin sıvılaşma potansiyeli ve gerilme-şekil değiştirme davranışı modellenmeye çalışılmıştır. Kazıkların taşıma kapasitesinin tahmini için yine yapay sinir ağları ile yapılan modeller kullanılmıştır (Goh, 1994; Ellis vd., 1995; Goh, 1996a,b). Fenton (1999a,b), konik penetrasyon deneyi verilerini, fraktal stokastik modelinde kullanmıştır. Christian ve Baecher (1999), geoteknikte rasgele değişkenlerin fonksiyonlarının çözümünde nokta-hesap metodunu kullanmışlardır. Ayrıca, doymuş ve doymuş olmayan zemin davranışının modellenmesinde elasto-plastik modeller, Cam-Clay modelleri, sonlu eleman modelleri ve kritik durum modelleri kullanılmıştır (Mayne, 1980; Wheeler ve Sivakumar, 1995; Gens, 1996; Shahu vd., 1999; Aytekin ve Şenol, 2000). İstatistiksel modeller ise zemin parametrelerinin tahmininde çok sık kullanılmaktadır (Sezen ve Ansal, 1993).

Belirsizliklerin hakim olduğu ve problemlerin çözümünde sözel bilgilerin kullanıldığı bir model, bulanık mantık (Fuzzy Logic) modelleme tekniği olarak bilinir. Bulanık mantık metodu, farklı disiplinlerde geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bulanık mantık metodunun uygulama alanları; hesaplama, tahmin, kontrol, öğretilbilir sistemlerin dizaynı ve optimizasyonun kullanıldığı inşaat, kimya, endüstri mühendislikleri gibi mühendislik dalları olarak sayılabilir. Belirsizliklerin hakim olduğu zemin özelliklerinin, bulanık kurallar kullanılarak irdelenmesi ile ilgili çalışmalara son yıllarda rastlanılmaktadır.

Juang vd. (1991), kumdaki tekil kazıkların taşıma kapasitesini belirlemek için, bulanık kümeleri kullanarak bir model oluşturmuşlardır. Kaba daneli zeminlerdeki

kazıkların yük taşıma kapasitesinin tahmininin geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan önemli bir problem olduğuna değinmişlerdir. Kazık taşıma kapasitesi hesabına uygulanan metotlardaki ve verilerdeki belirsizliklerden dolayı kazık kapasitesi hesabının belirsizliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu belirsizlikleri hesaba katmak için bulanık modelin uygulanmasının daha gerçekçi bir çözüme götürebileceğini önermişlerdir. Bu amaçla, tekil kazığın Q_u nihai taşıma kapasitesini belirlemek için, standart penetrasyon darbe sayılarından (SPT – N) yararlanarak 2 farklı metot (Federal Highway Administration modeli, FHWA, ve Briaud-Tucker (1984), BT, modeli) ve üç farklı deney sonucu kullanmışlardır. Bu iki metodun her biri ile kazık taşıma kapasitesinin noktasal tahminini, verilen SPT - N değerleri belli profil için elde etmişlerdir. Bu noktasal tahminin güvenilirliği için, aşağıdaki tahmin hata miktarı, E, bağıntısından yararlanmışlardır.

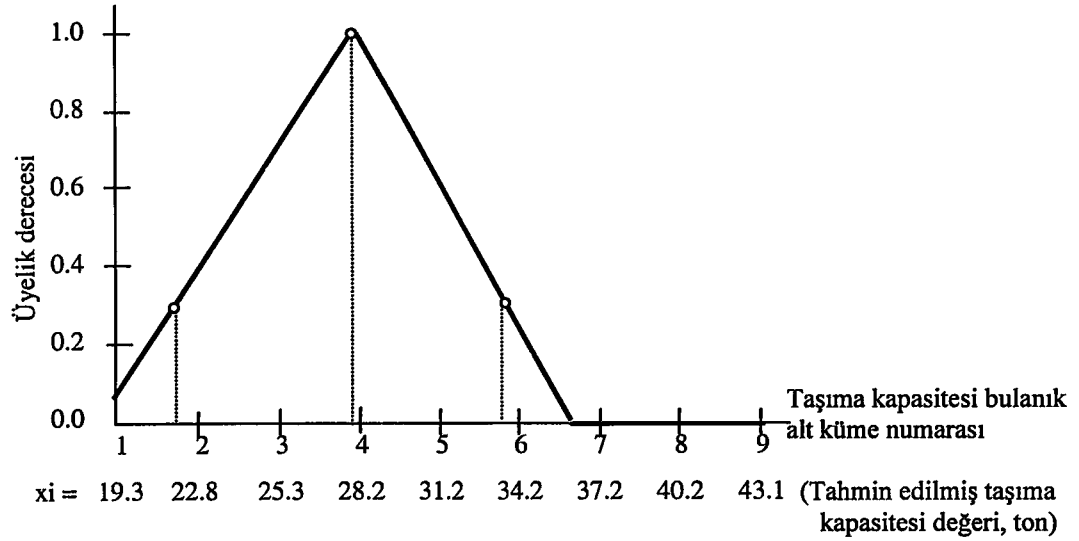
$$E = (Q_{pre} - Q_m) / Q_m \quad (2.21)$$

Burada Q_{pre} farklı metotlar kullanılarak tahmin edilen nihai taşıma kapasitesi ve Q_m kazık yükleme deneylerinden ölçülen nihai taşıma kapasitesidir. Tahmini hata miktarı, literatürde verilmiş kazık yükleme deney sonuçlarına göre elde edilmiştir. Tahmin edilen kazık taşıma kapasitesi ile tahmini hata miktarından yararlanılarak, kazığın nihai taşıma kapasitesinin minimum ve maksimum değerleri aşağıdaki bağıntılar kullanılarak elde edilmiştir.

$$Q_{u \min} = Q_{pre} \left(1 - \frac{E}{100} \right) \tau \quad (2.22)$$

$$Q_{u \max} = 2Q_{pre} - Q_{u \min} \quad (2.23)$$

Bulanık kümenin oluşturulması için 9 adet nihai taşıma kapasitesi değeri ve bir bulanık kümeden yararlanılmıştır (Şekil 2.31).



Şekil 2.31. Taşıma kapasitesi tahminleri kümesini gösteren bulanık küme
(Juang vd., 1991)

Burada, τ girdi verilerinden tahmin edilen nihai taşıma kapasitesindeki hatayı azaltıcı bir katsayıdır. Nihai taşıma kapasitesi kümesinin birinci elemanını $Q_{u\min}$, dokuzuncu elemanını ise Q_{umaks} tanımlamaktadır. Diğer elemanların değerleri ise, lineer enterpolasyonla belirlenmiştir. Nihai taşıma kapasitesi kümesinin elemanlarının üyelik dereceleri 1.0 olarak, bu elemanın $Q_{u\min}$ ve Q_{umaks} değerlerinin üyelik dereceleri 0.3 olarak kabul edilmiştir. İkinci deney sonuçları için elde edilmiş $Q_{u2} = 27.7$; $Q_{u2\min} = 21.6$; $Q_{u2maks} = 32.8$ tahminleri kümesi Şekil 2.31 'de gösterilmiştir. Böylece, kazık taşıma kapasitesinin 3 farklı tahminini gösteren 3 Fuzzy kümesini tanımlamışlardır. 3 Fuzzy kümesinin birleşimi olan son fuzzy kümesi, fuzzy ağırlıklı ortalama metodu ile birleştirilmiş ve kazık kapasitesinin en güvenilir tahminini, Q_u^* , Denklem 2.24 'de verilen bağıntı ile yapmışlardır.

$$Q_u^* = \frac{\sum x_i \mu(x_i)}{\sum \mu(x_i)} \quad (2.24)$$

Burada x_i , i. eleman için Q_u değeri ve $\mu(x_i)$ ise x_i 'nin üyelik derecesi'dir. Bu işlemlerin yapılabilmesi için Fortran 77 programlama dilinde bir program yazmışlar, ve tahmin edilen ve ölçülen kazık kapasitesi değerleri arasında çok iyi bir uyumun olduğunu göstermişlerdir.

Juang vd. (1992), bulanık model kullanarak şevlerin göçme potansiyelini incelemişlerdir. Modelde, tabii şevlerin stabilitesini etkileyen jeoloji, topografya, meteoroloji, ve çevre faktörleri gibi kümeleri dikkate almışlardır. Her bir kümenin 2 ile 4 alt kümeyi içerdiğini ve önerdikleri hesap metodunda toplam 13 alt kümenin kullanıldığını belirtmişlerdir. Şev göçme kriteri de, çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olarak 5 alt kümeye ayrılmıştır. Şev göçme potansiyelinin hesaplanmasında ele aldıkları faktörleri ve etkilerini Çizelge 2.13 'de göstermişlerdir. Bu faktörlerin ve etkilerinin seçiminin, mühendislik yargısına, olası istatistiksel verilere, bölgelerdeki çalışmalardan elde edilen bulgulara, iklim, çevre ve jeolojik koşullara bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 2.13. Şev göçme potansiyelinin değerlendirilmesi için gerekli faktörler ve etkileri (Juang vd., 1992)

Faktörler	Faktörlerin etkisi	Faktörlerin alt grupları	Bütün faktörler içerisinde her bir faktörün etkisi
Topografya	A	Eğim Yatay profil Düşey profil Yerleşim Yükseklik	D B A B A
Jeoloji	B	Jeolojik orijin Zemin yapısı Havalanma derinliği	D A B
Çevre	D	Eğimin yönü Bitki örtüsü Toprak kullanımı	C B C
Meteoroloji	B	Maksimum günlük yağış Maksimum saatlik yağış	A A

A = Son derece önemli; B = Çok önemli; C = Önemli; D = Orta önemli; E = Nispeten önemsiz

Juang vd. (1996), konik penetrasyon deneyi (CPT) verilerinden kumun relatif sıkılığının (D_r) belirlenmesi amacıyla düşük, orta ve yüksek sıkışabilirlikli kumlar için 3 ampirik bağıntıyı kullanarak bunları bulanık model çerçevesinde dikkate almışlardır. Verilen bulanık modelde, CPT verilerinin girdi olarak girilmesi ile kumun relatif sıkılığının belirlenebileceğini göstermişlerdir.

Yazarlar, literatürde konik penetrasyon uç mukavemeti (q_c) ile relatif sıkılık arasındaki (D_r) korelasyonları kullanarak aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir. Bu bağıntının oluşturulmasında 24 farklı kum (q_c - D_r) ilişkisi verilerini aldıklarını ve en küçük kareler regresyonunu kullandıklarını belirtmişlerdir.

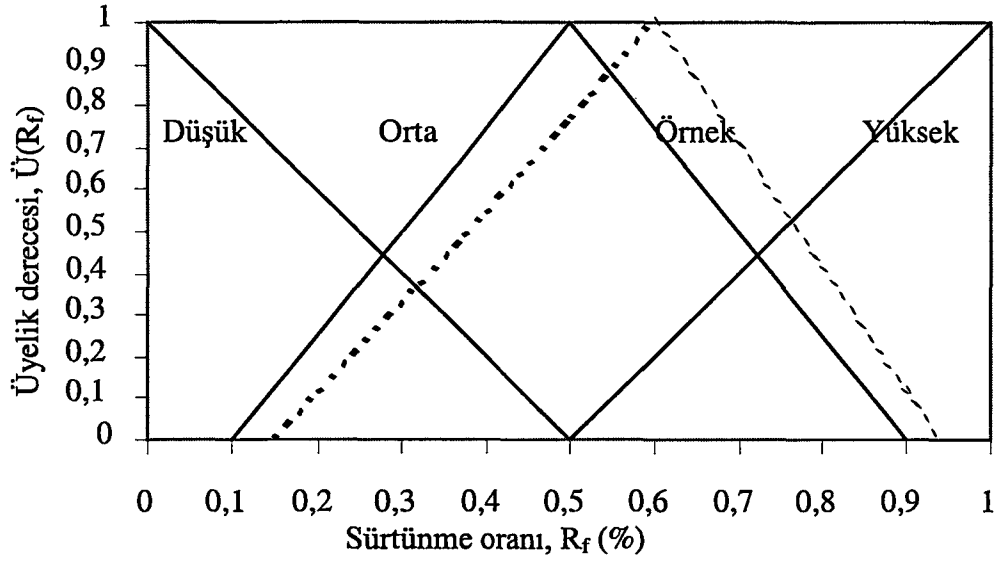
$$D_r^2 = \left(\frac{1}{Q_F} \right) \left[\frac{q_c / P_a}{\left(\sigma'_v / P_a \right)^{0.5}} \right] \quad (2.26)$$

Burada P_a atmosfer basıncı, σ'_v düşey efektif gerilme ve Q_F en küçük kareler regresyonundaki ampirik bir sabittir.

Juang vd. (1996), ayrıca sürtünme oranını aşağıdaki gibi tanımlamışlar ve bunu kumun sıkışabilirliğini karakterize etmek için kullanmışlardır.

$$R_f = f_s / q_c \quad (2.27)$$

Burada R_f sürtünme oranı ve f_s sürtünme katsayısıdır. Sıkışabilirliği düşük olan kumlar için R_f değerinin yaklaşık 0 olduğunu ve sıkışabilirliği yüksek olan kumlar için bu değer 0.01 veya biraz daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, sıkışabilirliğin belirlenmesi için R_f nin yeterli bir parametre olduğunu düşünmüşler ve bu konudaki bulanıklığı ele almışlardır. Sıkışabilirliği düşük, orta ve yüksek sıkışabilirlik olarak 3 alt kümeye ayırmışlardır (Şekil 2.33).



Şekil 2.33. Sıkışabilirliğin çeşitli seviyelerini gösteren fuzzy sayıları
(Juang vd., 1996)

Şekil 2.33 'de örnek olarak verilen kırıklı çizgi bulanık küme sınırlarının gerektiğinde değiştirilebileceğini ifade etmektedir. Çalışmaları sonucunda, bulanık modelin geçerliliğini göstermek için, literatürde mevcut olan kumun sıkışabilirliği ile ilgili verileri kullanmışlardır. Böylece, önerdikleri bulanık modelin, CPT verilerinden yararlanarak relatif sıkılığı, D_r , belirlemek için kullanılabileceğini göstermişlerdir.

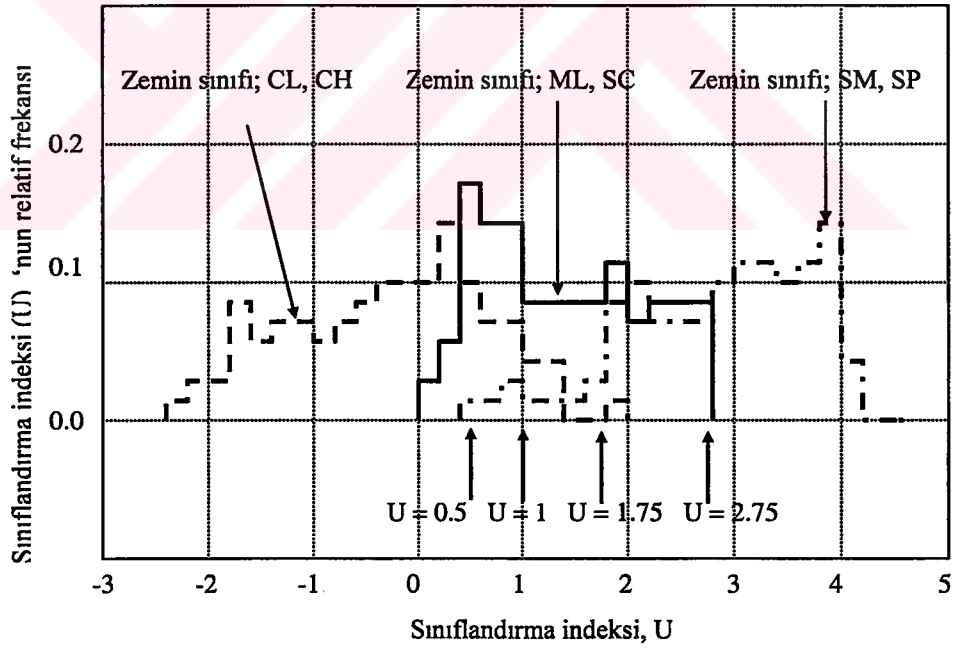
$$D_r = D_{RL} \cdot M_L + D_{RM} \cdot M_M + D_{RH} \cdot M_H \quad (2.28)$$

Burada, D_{RL} , D_{RM} ve D_{RH} sırasıyla düşük, orta ve yüksek sıkışabilirlikli kumlar için tanımlanan korelasyonlardan bulunan relatif sıkılıklar ve M_L , M_M ve M_H ise, bulanık kuralların birleştirilmesinden elde edilen bulanık katsayılarıdır.

Zhang ve Tümay (1999), CPT sonuçlarından zemin sınıfının belirlenmesi için, istatistiksel Fuzzy yaklaşımını kullanmışlardır. CPT verilerinden elde edilen zemin sınıflandırılması, zeminin içerisindeki farklı orandaki daneler ile zeminin mekanik davranışı arasındaki belirsizlikten dolayı, bulanık yaklaşımın kullanılmasını

düşünmüşlerdir. Nokta hesaplaması ve bölge hesaplaması olarak 2 istatistiksel hesaplama kriteri önermişlerdir.

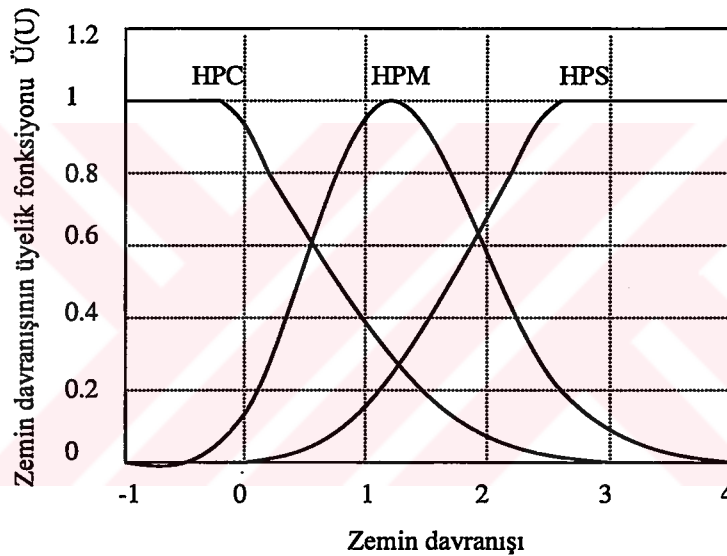
CPT verilerinden zeminin mühendislik sınıflandırma indisinin, U, hesaplanması için istatistiksel bir program kullanmışlardır. 7 farklı zemin tipi için muhtemel yoğunluk fonksiyonları ile U sınıflandırma indisi arasındaki ilişkileri Şekil 2.34 'de göstermişlerdir. Bölge hesaplama metodunun, konvansiyonel zemin sınıflamasına benzer bir sınıflama yaklaşımı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu yaklaşımda U sınıflandırma indisinin pek çok bölgeye bölündüğü ve bir zemin numunesi için tahmin edilen zemin tipinin numunenin ait olduğu U değerindeki bölgeye bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Nokta hesaplama metodunda ise, ihtimale bağlı olarak zemin sınıfının direk tahmin edilmesi yaklaşımı kullanıldığını, bu yaklaşımdaki esasın, verilen U değerine bakılarak zemin sınıfının belirlenebileceğini söylemişlerdir.



Şekil 2.34. Üç genel grup için ampirik CPT zemin sınıflandırması:

Grup 1- SM ve SP; Grup 2- ML ve SC; Grup3- CL ve CH
(Zhang ve Tümay, 1999)

Önerdikleri bulanık yaklaşımın ise, zemin davranışındaki belirsizlikle ilgili olduğunu ve daha gerçekçi bir yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir. 3 farklı zemin tipine ait konik penetrasyon deney sonuçları için bulanık sınıflandırmayı yaparak, bu bulanık kümeyi yüksek ihtimalli killi zemin (HPC), yüksek ihtimalli karışmış zemin (HPM) ve yüksek ihtimalli kumlu zeminler (HPS) olarak üç alt küme şeklinde ele almışlardır. Ampirik olarak her bir kümenin üyelik fonksiyonlarını Şekil 2.34 'de verilen değerlerden belirlemişlerdir. Ele aldıkları üç zemin grubunu (HPS, HPM, HPC), Şekil 2.35 'deki bulanık kümeler formunda oluşturmuşlar ve üyelik fonksiyonlarını göstermişlerdir.



Şekil 2.35. CPT bulanık zemin sınıflandırma şeması (Zhang ve Tümay, 1999)

CPT sonuçlarına bağlı olarak verdikleri sınıflama metodunun, CPT sonuçlarının, çeşitli zemin tipleriyle ilişkileri hakkında bilgileri içerdiğini belirtmişlerdir. Şekilde verdikleri bulanık zemin sınıflandırma şemasında, HPS zeminlerin genellikle yüksek mukavemete, yüksek permeabiliteye, düşük sıkışabilirliğe, yüksek konik uç direncine, düşük sürtünme oranına ve daha büyük sınıflandırma indisi değerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. HPC zeminlerin düşük mukavemete, düşük permeabiliteye, yüksek sıkışabilirliğe, düşük konik uç direncine, yüksek sürtünme oranına ve düşük sınıflandırma indisi değerine sahip olduğunu; HPM tipi zeminlerin özelliklerinin ise, HPS ve HPC arasında kaldığını belirtmişlerdir. Bu yeni metodun,

hem istatistiksel kuralları ve hem de bulanık mantık yaklaşımını içerdği söylenmiştir. Bulanık yaklaşımın, yeni ve eski yerel kalibrasyonlar arasında bir köprü oluşturabileceğine dikkat çekmişlerdir.

Nawari ve Liang (2000), ölçülen her geoteknik parametrenin karakteristik değerlerinin belirlenmesi için bulanık mantık yaklaşımının kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Öncelikle herhangi bir bulanık kümeyi düşünmüşler sonra, bu bulanık kümedeki her bir alt kümenin üyelik fonksiyonun tanımlanmasında mühendislik yargısı ile diğer kaynak bilgilere ihtiyaç olduğunu ifade etmişlerdir. Bulanık işlemlerin sonucunun, kullanılan hesap metoduna ve seçilen fonksiyonun tipine bağlı olarak değiştiğini göstermişlerdir.

Çimen ve Keskin (2001), çalışmalarında bir bentonit numunesini farklı kuru birim hacim ağırlıklarda ve farklı başlangıç su muhtevalarında sıkıştırarak hazırlamışlardır. Bu numuneler üzerinde ödometre deney sistemi yardımıyla emme kapasitesi deneyleri yaparak, emmenin zamana karşı ilerleyişini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Su muhtevalarında zamanla meydana gelen değişimleri ve emme kapasitesinin zamana bağlı ilerleyişini bulanık mantık yöntemiyle de belirlemişlerdir. Kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevası bilinen bir kilin herhangi bir zamandaki emme kapasitesinin bulanık mantık yöntemiyle belirlenebildiğini göstermişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Giriş

Şişme potansiyeline sahip olan zeminler üzerinde inşa edilen özellikle az katlı hafif yapılarda, karayolu ve havaalanı kaplamalarında, sulama kanallarında, boru hatlarında veya arkasında bu tür zeminleri tutan istinad yapılarında önemli hasarlar oluşabilmektedir. Bir mühendislik yapısının inşasından önce, altındaki zeminin özelliklerinin tespit edilmesi, zeminin emme kapasitesi, şişme basıncı, şişme yüzdesi ve uygulanan yük karşısındaki oturma davranışı gibi parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Şişme özelliği gösteren bir kil zeminde, şişme probleminin engellenebilmesi için, ortama su girişinin önlenmesi, kilin şişmesini önleyecek bir yükü yüklenmesi ve uygun stabilizasyon yöntemleri gibi metotlar kullanılabilmektedir.

Günlük hayatta sıkça farklı problemlerle karşılaşılır. Problemleri çözmek için, öncelikle ilgili konu hakkındaki ön bilgilerden ve tecrübelerden yararlanılır. Mühendislik araştırmaları ve modellemelerinde, çeşitli kavramlara kesinlik kazandırmak için değişik kabuller ve varsayımlar yapılmaktadır. Böylece, olayın çözümlenmesine yönelik ilk adımlar, kabuller ve varsayımlardır. Bu kabuller ve varsayımlar; problemlerin çözümlenmesini kolay ve uygulanabilir yapar. Dolayısıyla, problemlerin çözümü ideal şartlar için gerçekleştirilmiş yaklaşık çözümler olmaktadır.

Halbuki bir olayın makro ölçeğinden mikro ölçeğine gidildikçe, uygulamalı mühendislik problemlerinde, kesinlikten uzaklaşmakta ve belirsizlikler artmaktadır. Geoteknik mühendisliği de uygulamalı bir bilim dalıdır. Arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlar deneysel hataları içerebilmektedir.

Bu bölümde, kullanılan zemin numuneleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalara yer verilecektir. Ayrıca, doymun olmayan killi zeminlerin emme kapasitesi ve şişme basıncını, laboratuvarında emme ve şişme deneyleri yapmadan; zeminin kolaylıkla

belirlenebilen özellikleri olan kuru birim hacim ağırlığı, su muhtevası ve plastisite indisinden yararlanarak tahmin edilebilmesi için, kullanılacak olan “Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)” metodunu tanıtılacaktır. Öncelikle, sıkıştırılmış kil numuneleri üzerinde yapılan emme ve şişme deney metotları verilecek daha sonra bulanık mantık kavramı ve kuralları anlatılacaktır. Kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası ve plastisite indisi parametre olarak alınıp bulanık kümeler oluşturulduktan sonra, emme kapasitesi ve şişme basıncı bulanık mantık metoduyla modelleneyecektir.

3.2.Yapılan Deneysel Çalışmalar

Çalışmada kullanılan numuneler üzerinde sınıflandırma deneyleri, kompaksiyon deneyleri yapılarak özellikleri tespit edilmiştir. X-Ray analizleri ile numunelerin minerolojik yapıları belirlenmiştir. Daha sonra, farklı başlangıç su muhtevası ve farklı kuru birim hacim ağırlıklarda hazırlanan numuneler üzerinde ödometre sistemi yardımıyla emme kapasitesi ve şişme deneyleri yapılmıştır.

3.2.1. Kullanılan Zemin Numunelerinin Tanımlanması

Çalışmada farklı bölgelerden temin edilen üç farklı yüksek plastisiteli örselenmiş kil numunesi kullanılmıştır. 1 No’lu numune; İstanbul’dan, 2 ve 3 No’lu numuneler; Antalya’dan alınmıştır. Çalışmada kullanılan numuneler üzerinde elek analizleri, hidrometre analizleri, kıvam limitleri, piknometre ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Elek ve hidrometre analizleri yapılarak elde edilen granülometri eğrileri EK 1 ‘de verilmiştir. Zeminlerdeki ince kum boyutu ve daha iri danelerin dane çapı dağılımını saptamak için elek analizleri; silt, kil boyutundaki danelerin dane çapı dağılımının nicel olarak belirlenmesi için ise hidrometre deneyleri yapılmıştır. Granülometri eğrilerinden elde edilen çakıl, kum silt ve kil yüzdeleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Standart kompaksiyon deneyleri yapılarak numunelerin en iyi şartlarda sıkışabileceği optimum su muhtevaları ve bu su muhtevalarında elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Elde edilen kompaksiyon eğrileri de Ek 1 ‘de verilmiştir. Kıvam limitleri deneyleri yapılarak incelenen numunelerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre zemin sınıfları tespit

edilmiştir. Sınıflandırma, piknometre ve kompaksiyon deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan numunelerin tanımlanması

Özellikler	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Likit limit (%)	75	73	66
Plastik limit (%)	21	26	28
Plastisite indisi (%)	54	47	38
Rötre limiti (%)	7	13	10
Dane birim hacim ağırlık (kN/m^3)	27.4	27.7	28.1
Maks. kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)	16.1	16.0	15.2
Optimum su muhtevası (%)	23	23	27
Çakıl (%)	1	1	0
Kum (%)	6	3	2
Silt + Kil (%)	93	96	98
Rengi	Koyu gri	Kırmızı	Kırmızı
Zemin cinsi	CH	CH	CH

3.2.2 İncelenen Zemin Numunelerinin Minerolojik Yapılarının Belirlenmesi

İncelenen zemin numunelerinin minerolojik yapılarının belirlenmesi amacıyla, numuneler üzerinde X- Ray analizleri yapılmıştır. X- Ray difraksiyon metodu, zeminlerin içerisindeki hakim mineral cinsini ve kristal yapılarını tespit etmek için yaygın olarak kullanılan bir metottur. Bu metodun esası, çok kısa dalga boyuna sahip elektro manyetik dalgalardan meydana gelen X- ışınlarının, kristallerin atomlarına çarptırılarak yansıtılmasıdır. Atomlar, kristaller belli bir düzen içinde bulunduğundan yansıyan ışınlar birbirini güçlendirir veya yok eder. Yansımanın meydana gelmesi için X ışınları belli bir açı ile dönen toz numunenin üzerine gönderilmektedir. Atomlara çarpan X ışınları aynı açı ile yansır ve yansıyan ışınların izleri kart üzerinde tespit edilir. Bu eğrilerden, kristallerin özellikleri hesaplanır. Amorf cisimlerdeki atomlar düzensiz olduğundan, amorf cisimlerde düzenli bir yansıma meydana gelmemektedir.

X ışınları, elektro manyetik spektrumdaki birkaç değişik tipteki dalgalardan biridir. 0.01 ile $100 \text{ \AA}$ arasında değişen oranlarda dalga boylarına sahiptirler. X ışınları, içinde yaklaşık 500 voltluk bir voltaj düşüşüne maruz kalan hedef malzemedeki bir

flamandan ışın oluşumuna neden olan, elektronların bulunduğu bir tüp kullanılarak oluşturulur. Belirli maddeler, farklı dalga boylarındaki X ışınlarını adsorbe edebilirler. Böylece, onların yalnız bir dalga boyunun ışınlarını veren X ışınları tüpünün çıkışında filtre edilmeleri mümkündür. Kil minerallerinin tanımlanmasında en yaygın olarak kullanılan bakır radyasyonu $1.54 \text{ \AA}$ 'luk bir dalga boyuna sahiptir. Kil minerallerinin tanımlanmasında çok uygun olan X ışınları yansıması, kil olmayan fakat zeminde bol bulunan diğer mineralleri de belirleyebilir.

Zeminlerdeki kil minerallerini tespit etmek için Montmorillonit, Feldispat, Sepiolit, Klorit, Kuartz, Kaolin gibi saf minerallerden elde edilen çizgilerin şiddetleri ile farklı mineraller için tespit edilen çizgilerin karşılaştırılması gerekmektedir. Farklı kil mineralleri 7.1 veya $14 \text{ \AA}$ 'daki ilk sıradaki esas yansımalar ile karakterize edilirler. Spesifik kil mineral gruplarının pozitif olarak tanımlanmaları için bunların belirli ön işleme tabi tutulmaları gerekmektedir. Örneğin, kaolin tipi kil mineralleri $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ısıda ısıtılarak parçalanabilir. Ancak, bu ısıda diğer kil mineralleri bozulmaz. Kaolin, yaklaşık $7.2 \text{ \AA}$ 'luk ara mesafe ayarına sahip iken, hidratlı halloysit $10 \text{ \AA}$ 'luk ara mesafeye sahiptir. Hidratlı halloysit $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulduğunda $7 \text{ \AA}$ geri dönüşümü mümkün olmayacak şekilde bozulur. İllitler ise yaklaşık $10 \text{ \AA}$ 'un bir $d(001)$ 'i ile karakterize edilmişlerdir. Smektit grubu minerallerin pozitif olarak tanımlanmasında esas olan husus, şişme karakterine sahip olmalarıdır. Bunlar, havada kurutulduklarında $12 - 15 \text{ \AA}$ 'luk temel bir aralığa sahip olabilirler. Smektitler, etilen glikol veya gliserol ile muamele edildiklerinde $17 - 18 \text{ \AA}$ 'un bir $d(001)$ değerinde genişlerler ve etüvde kurutulduklarında $d(001)$ yaklaşık $10 \text{ \AA}$ 'a düşer.

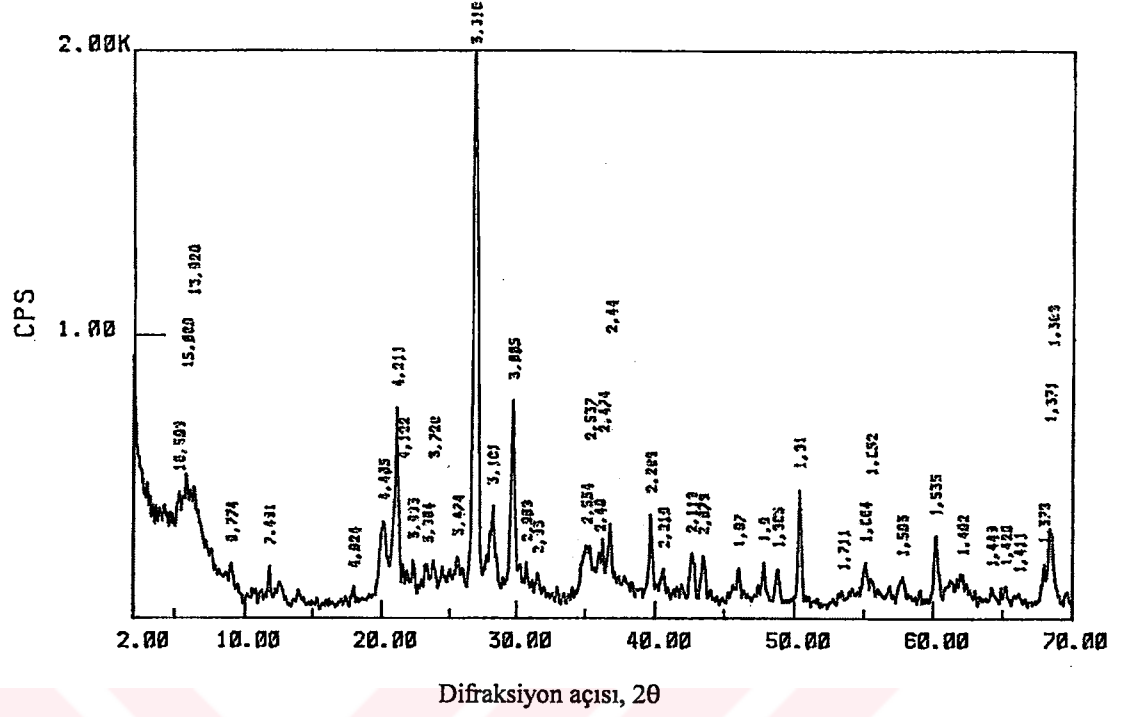
Vermikulit, genişleyen bir mineral olmasına rağmen daha büyük bir iç tabaka düzenine sahiptir. Dolayısıyla, ısıtma ve kurutma neticesinde temel boşluklarında meydana gelen değişiklikler, smektit minerallerinde oluşan değişikliklerden daha azdır. Tam doygun olduklarında, d boşluğu $14.8 \text{ \AA}$ 'dur ve bu değer, $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ısıtıldığında $11.6 \text{ \AA}$ 'a düşer. Klorit minerallerinin temel boşluğu $14 \text{ \AA}$ 'da sabittir. Demirce zengin olan kloritler, zayıf bir ilk yansımaya sahiptir. Fakat ikinci yansımaları oldukça güçlüdür. Bu yüzden, kaolin ile karıştırılabilirler. Gerçekte, $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1 NHCl ile işleme tutulduklarında, klorit mineralleri bozulurken kaolin

etkilenmez. Yada 600 °C 'deki ısıtmada, kaolin bozulurken klorit etkilenmeyebilir. İşte yapılacak bazı ön işlemler ile zeminin mineral cinsine daha doğru bir şekilde karar vermek mümkün olacaktır (Mitchell, 1976; Keskin 1993; Velde, 1995).

Yansıma piklerinin yüksekliğine veya alanına göre bir zemindeki farklı minerallerin miktarlarının çokluk olarak belirlenmesi her zaman kolay olmayabilir. Bunun nedeni, hidrasyondaki, minerallerin kristallenmesindeki, danelerin yönlenmesindeki, minerallerin hacimsel emme katsayılarındaki v.b. farklılıklardır (Keskin, 1993).

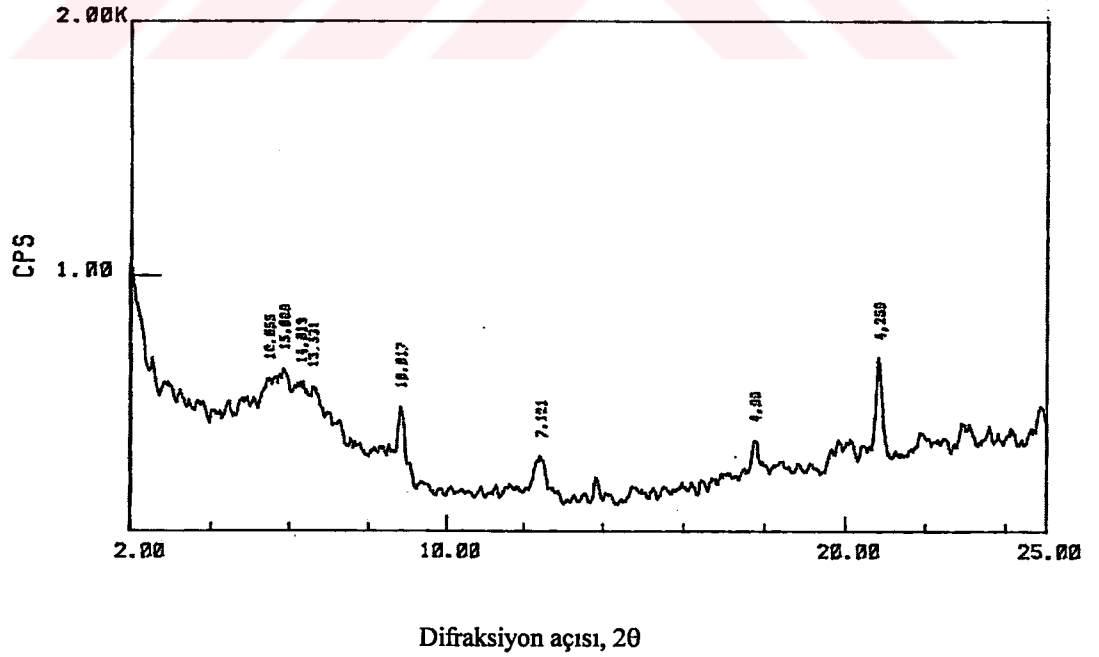
Bu çalışmada kullanılan üç farklı kil numunesinin minerolojik araştırmaları, MTA Genel Müdürlüğü Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarındaki Rigaku Geiger Flex X ışını kullanılarak yapılmıştır. Numuneler üzerinde yapılan X-Ray analizleri tüm kayaç incelemeleri ve kil boyutu incelemeleri olarak iki kısımda yapılmıştır. Tüm kayaç çekimlerinden numuneler içerisinde smektit, klorit, kuvars, feldispat, kalsit ve illit olduğu görülmektedir. Daha sonra numunelerin sadece kil kısmı (<0.002 mm) ayrılıp onun üzerinde kil fraksiyon çekimleri yapılmıştır. Kil mineral cinsinin daha iyi belirlenmesi için kil numunesi etilen glikol ile doyurularak X-Ray analizleri yapılmıştır. Etilen glikol işlemine tabi tutulmuş numuneler 550°C ısıyla muamele edilerek X-Ray çekimleri yapılmıştır. Şekil 3.1 – Şekil 3.12 'de numunelerin X-Ray kırınım eğrileri verilmiştir.

Sample Name : H17903



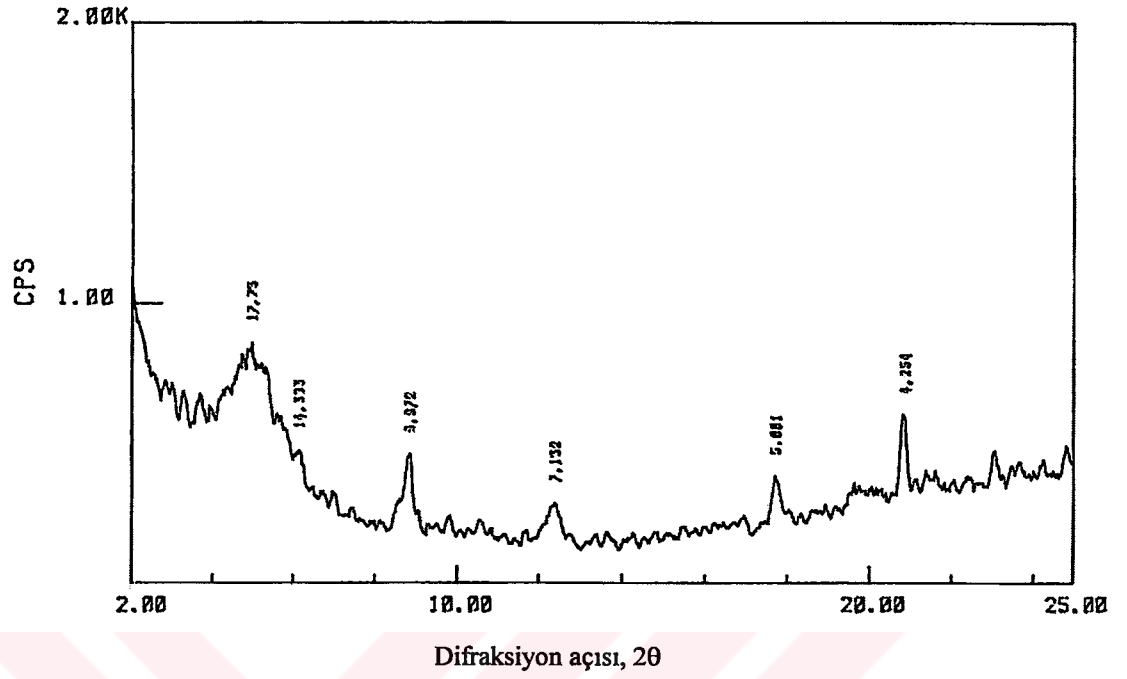
Şekil 3.1. 1 No'lu numunenin tüm kayaç çekimi

Sample Name : 017903



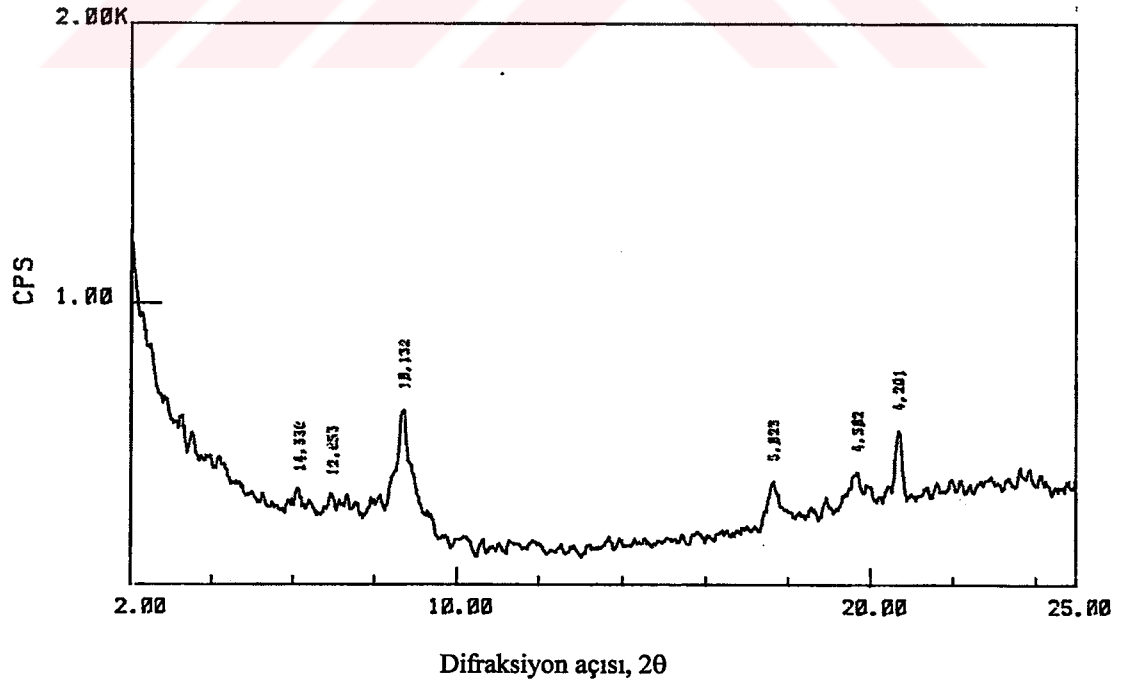
Şekil 3.2. 1 No'lu numunenin oryantasyonu

Sample Name : E17903

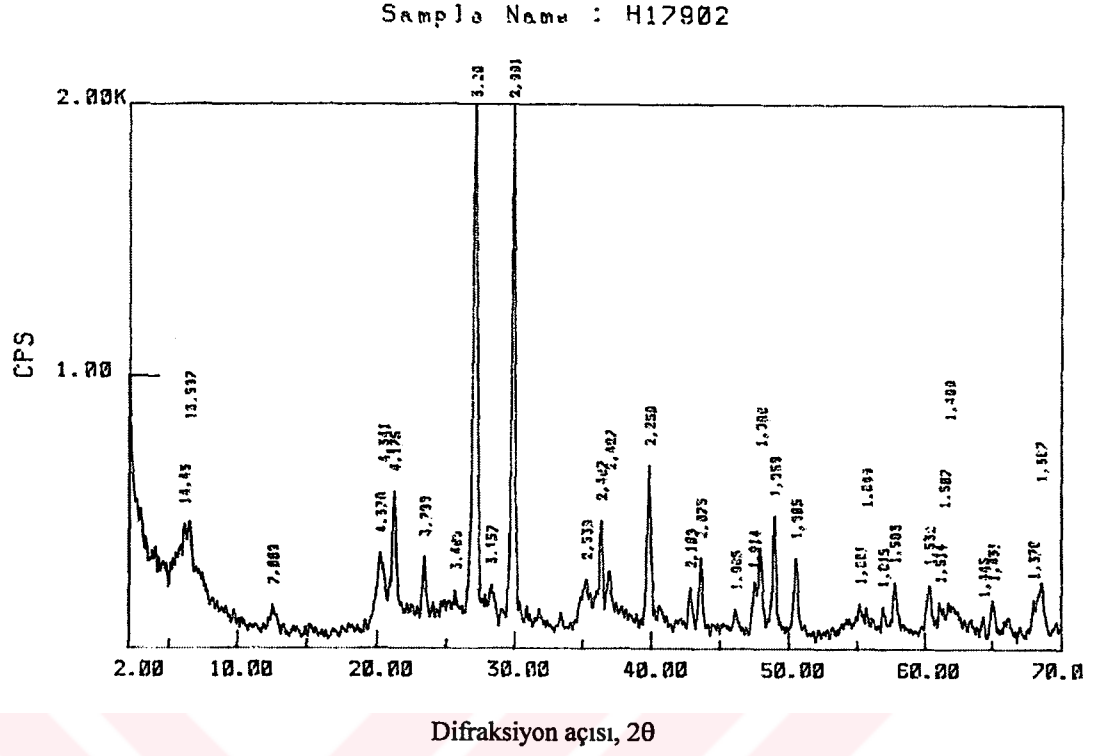


Şekil 3.3. 1 No'lu numunenin etilen glikol ile muameleli analizi

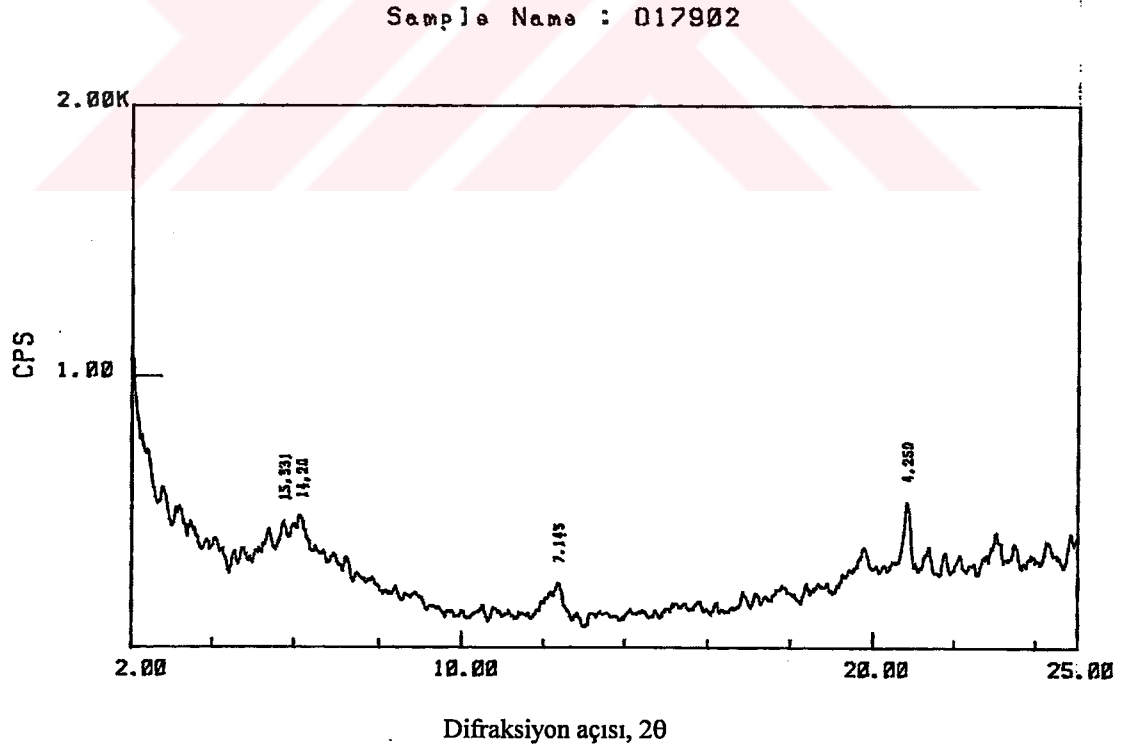
Sample Name : H17903 550



Şekil 3.4. 1 No'lu numunenin 550 °/1 saat ısıya tabi analizi

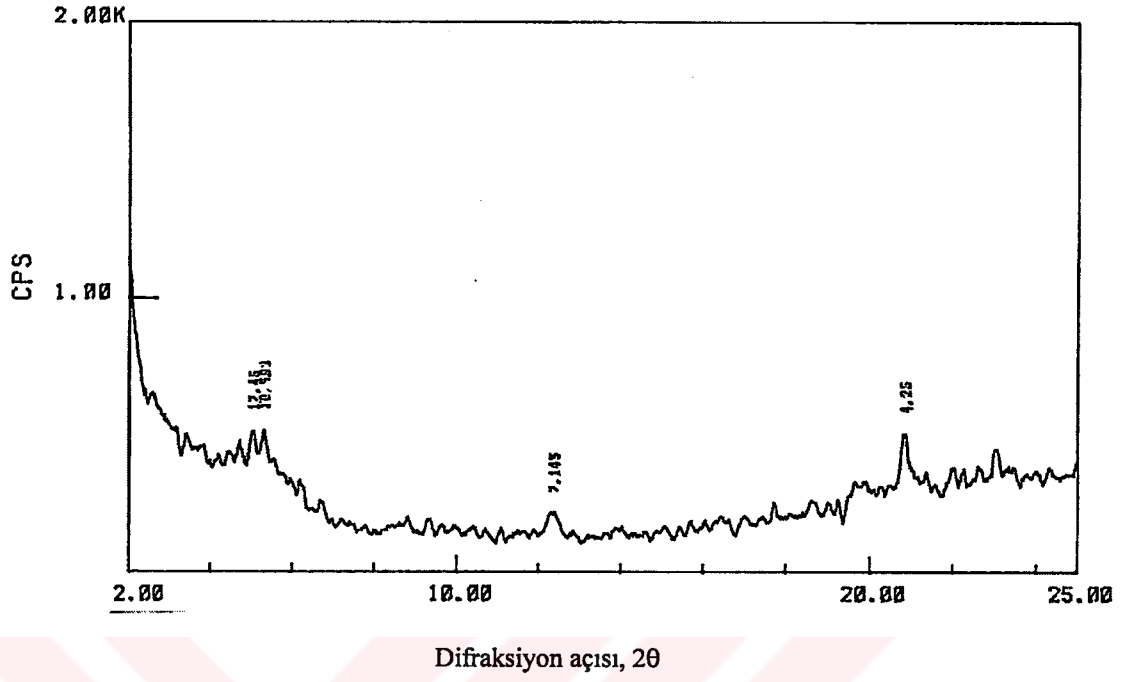


Şekil 3.5. 2 No'lu numunenin tüm kayaç çekimi



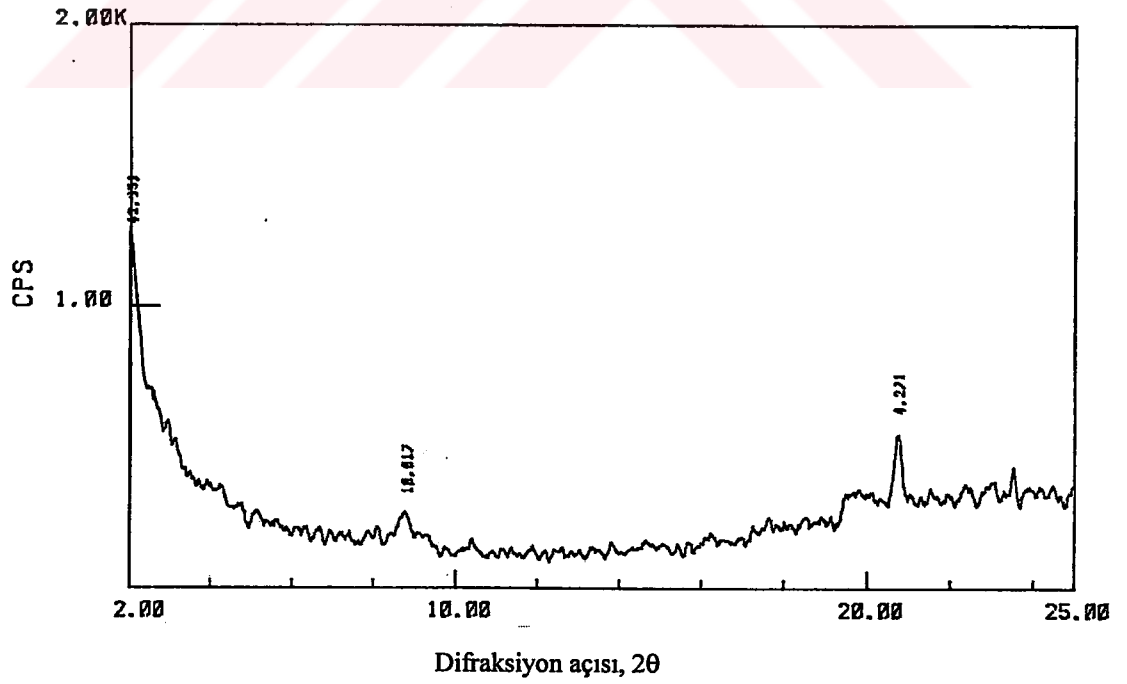
Şekil 3.6. 2 No'lu numunenin oryantasyonu

Sample Name : E17902



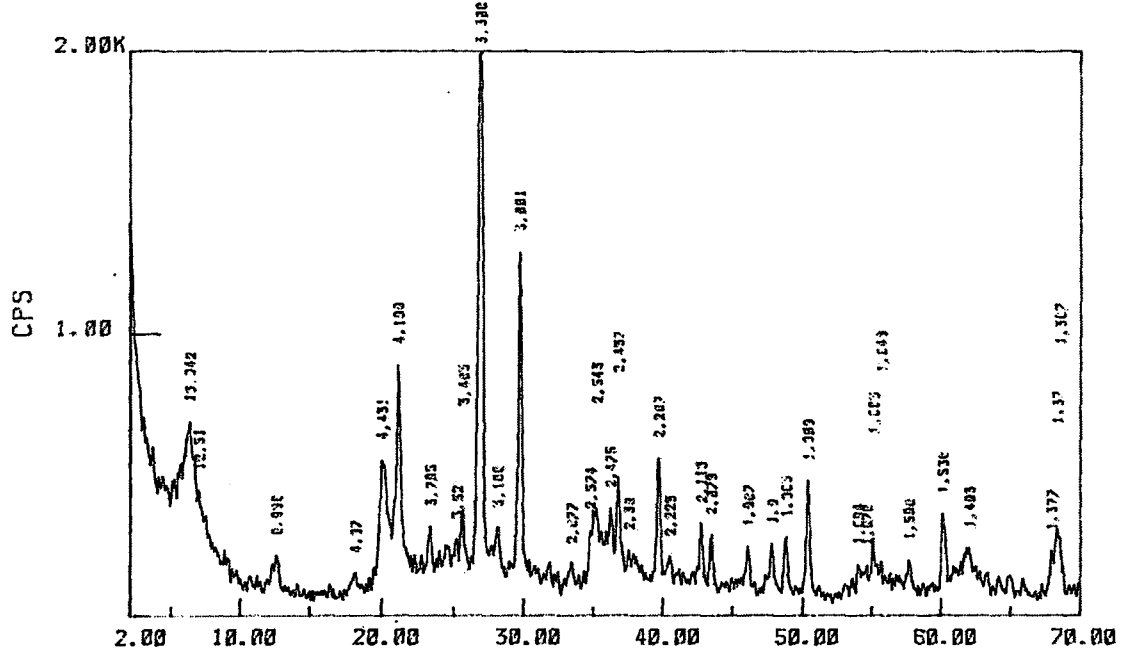
Şekil 3.7. 2 No'lu numunenin etilen glikol ile muameleli analizi

Sample Name : H17902 550



Şekil 3.8. 2 No'lu numunenin 550 °/1 saat ısıya tabi analizi

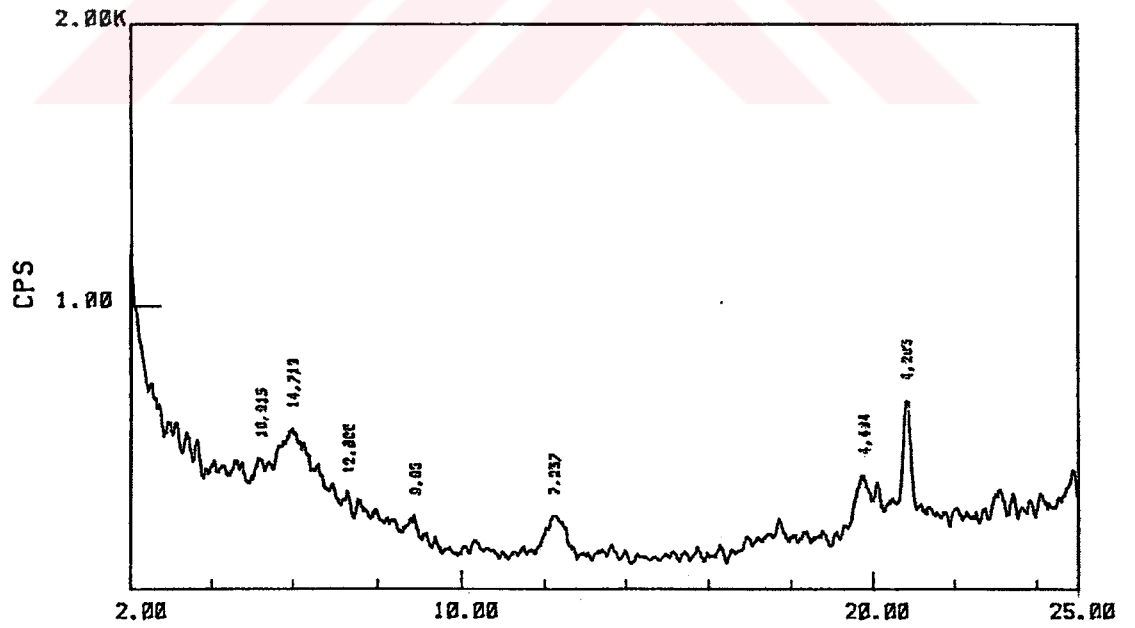
Sample Name : H17901



Difraksiyon açısı, 2θ

Şekil 3.9. 3 No'lu numunenin tüm kayaç çekimi

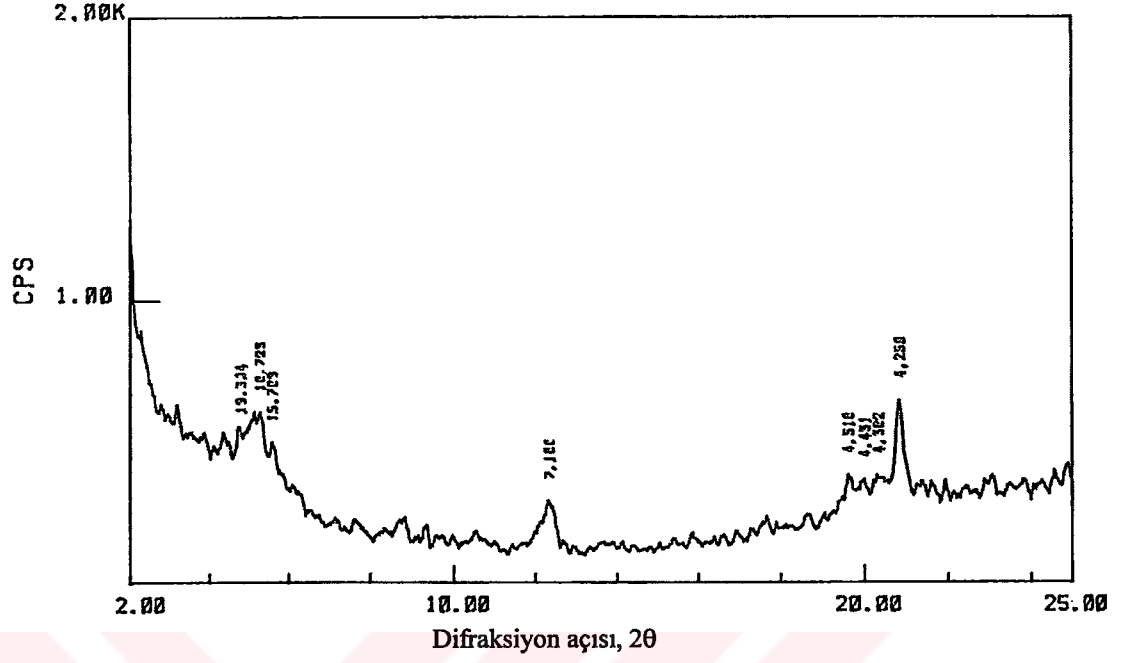
Sample Name : 017901



Difraksiyon açısı, 2θ

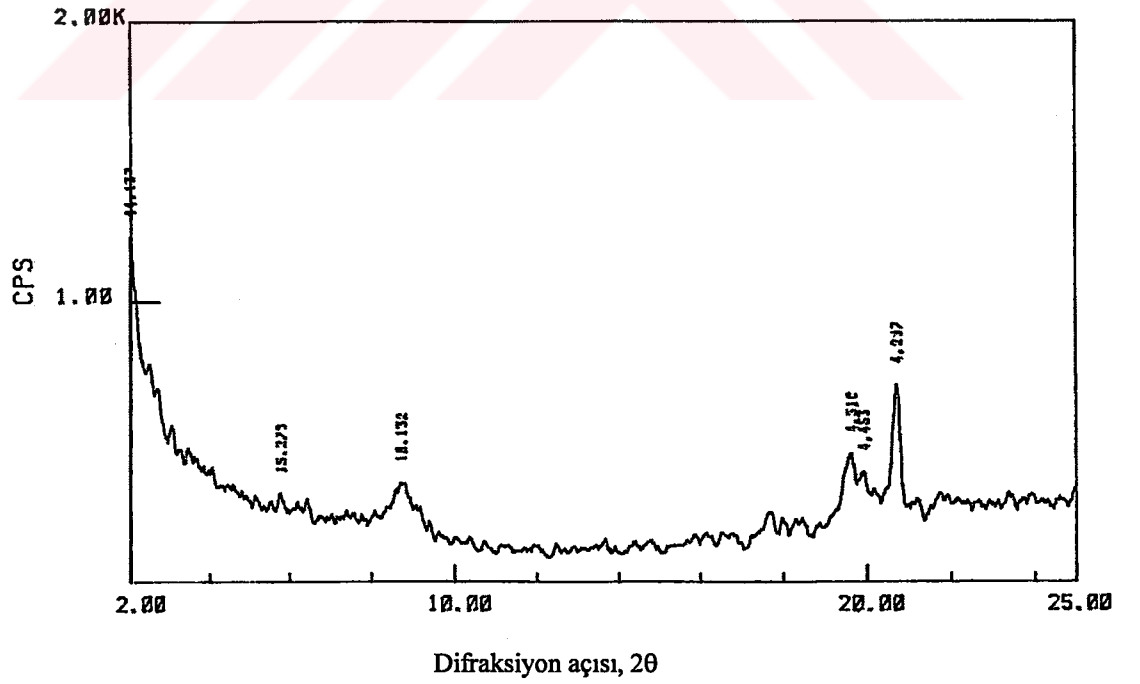
Şekil 3.10. 3 No'lu numunenin oryantasyonu

Sample Name : E17901



Şekil 3.11. 3 No'lu numunenin etilen glikol ile muameleli analizi

Sample Name : H17901 550



Şekil 3.12. 3 No'lu numunenin 550 °/1 saat ısıya tabi analizi

Şekil 3.1 - Şekil 3.12 'de görülen, X-Ray analizleri ile numunelerdeki hakim kil mineralleri ve diğer mineraller çokluk sırasına göre tespit edilmiştir. Buna göre; 1 Nolu numune; smektit + klorit, kuvars, kalsit, feldispat, illit şeklinde; 2 Nolu numune; smektit + klorit, kuvars, feldispat, kalsit şeklinde ve 3 Nolu Numune; smektit + klorit, kalsit, illit, kuvars şeklinde sıralanmaktadır.

3.2.3. Ödometre Yöntemi ile Emme Kapasitesi ve Şişme Değerlerinin Belirlendiği Deneyler

Emme kapasitesi, şişme basıncı ve şişme yüzdesinin belirlenmesinde, ödometre yönteminden yararlanılmıştır. Deneylerde kullanılan zemin numuneleri No.40 eleğinden elenmiştir. Elenen numuneler 24 saat etüvde bekletildikten sonra, optimum su muhtevasının kuru ve ıslak tarafında olacak şekilde, önceden belirlenen farklı başlangıç su muhtevalarında (%15, %20, %25, %30, %35, %40) karıştırılarak hazırlanmışlardır. Numuneler üzerinde yapılan deneylerin her aşamasında saf su kullanılmıştır. Farklı su muhtevalarında olacak şekilde hazırlanan numuneler, çapı 7.10-7.50 cm ve yüksekliği 1.60-2.00 cm arasında değişen ödometre ringlerine farklı kuru birim hacim ağırlıklarda (11.5 kN/m^3 , 13.0 kN/m^3 , 14.0 kN/m^3 , 15.0 kN/m^3 , 16.0 kN/m^3 , 17.0 kN/m^3) olacak şekilde sıkıştırılmışlardır. Deneyler öncelikle, sabit bir kuru birim hacim ağırlıkta ve farklı başlangıç su muhtevaları için daha sonra, sabit bir su muhtevasında ve farklı kuru birim hacim ağırlıklar için ayrı ayrı yapılmıştır. Sıkıştırma sırasında, numunelerin su muhtevalarının değişmemesine ve homojen bir sıkışma sağlanmasına özen gösterilmiştir.

Başlangıç su muhtevası %40 olduğunda numuneleri 16.0 kN/m^3 kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırmak mümkün olamamıştır. Aynı şekilde 17.0 kN/m^3 kuru birim hacim ağırlıkta da, sadece %15 ve %20 su muhtevalarındaki numuneler sıkıştırılabilmektedir.

Hazırlanan sıkıştırılmış numunelerin altına ve üstüne poroz kağıt ve poroz taş yerleştirilerek ödometre hücresine konulmuştur. Hücreye yerleştirilen numuneye alt poroz taş seviyesine kadar saf su ilave edilerek, numunenin kapiler yolla su alması

sağlanmıştır. Numuneler belirli zaman aralıklarında (düşük kuru birim hacim ağırlıklı ve düşük başlangıç su muhtevalı numunelerde ilk yarım saat veya 1 saat, ardından 2 saatlik periyotlarda, yüksek kuru birim hacim ağırlıklı numunelerde ise deneyin ilerleyen safhalarında numune kaybı oluşabileceğinden, 2 saatlik periyotlarda) ödometre hücresinden alınıp, 0.001 gr hassasiyetindeki terazide ağırlıkları tartılmıştır. Bu işlem, numune ağırlığı sabitlenene kadar tekrar edilmiştir. Numune ağırlığı sabitlendiğinde numune tamamen suya boğularak 24 saat beklendikten sonra, ağırlıkta değişme olmadığı gözlenmiştir. Sonra numune, etüve konularak kuru ağırlığı belirlenmiştir. Zemin numunesinin ödometre hücresindeki nihai su muhtevası değeri numunenin emme kapasitesi olarak ele alınmış ve Denklem 3.1 'deki gibi hesaplanmıştır (Keskin vd. 1997).

$$W_{em} = \frac{M_{nihai} - M_{kuru}}{M_{kuru}} \quad (\%) \quad (3.1)$$

Burada W_{em} , yüzde olarak emme kapasitesini; M_{nihai} , serbest koşullar altında zemin numunesinin kapiler emme ile ulaştığı ağırlığı ve M_{kuru} ise, zemin numunesinin kuru ağırlığını göstermektedir.

Numuneler üzerindeki şişme deneyleri iki grup halinde yapılmıştır. Her iki grup şişme deneylerindeki numuneler, emme kapasitesi deneylerindeki aynı başlangıç şartlarında hazırlanmış ve numunelerin kapiler yolla su almaları sağlanmıştır. Birinci grup şişme deneylerinde, numune su alırken ödometre hücresi üzerindeki deformasyon saatinin sıfırda kalmasını sağlayacak şekilde sürekli yükleme yapılmıştır. Şişme olmayacak şekilde numuneye uygulanan basınç sürekli arttırılmış ve düşey deformasyon saatinin ibresi sıfırda sabit tutulmuştur. Şişmenin engellendiği nihai basınç, şişme basıncı olarak alınmıştır.

İkinci grup şişme deneylerinde ise, aynı şartlar altında ödometre hücresine yerleştirilen zemin numunelerine herhangi bir gerilme uygulanmadan, kapiler yolla su almaları sağlanmıştır. Serbest olarak şişmelerine müsaade edilen zemin numunelerinin şişme miktarı, düşey deformasyon saatinden belirlenmiştir. Zemin

numunelerinin nihai şişmesinin tamamlanmasına kadar beklendikten yani deformasyon saatinde okunan değer sabitlendikten sonra numuneler suya boğulmuş ve 24 saat beklenmiştir. Bu süre sonunda, numunenin nihai şişme değerinin değişmediği görülmüştür. Numunenin şişmesi tamamlandıktan sonra, numuneye küçük adımlarla yük uygulanmıştır. Her yük kademesinde en az 24 saat beklenilmiştir. Toplam şişme miktarının sönümlenmesi için gerekli basınç belirlenmiş ve böylece zeminin şişme basıncı tespit edilmiştir. Bu basınç düzey deformasyonu ölçen saatin ibresinin yeniden başlangıç noktasına (sıfıra) dönmesinin sağlandığı basınç olarak alınmıştır. Ayrıca serbest şişme deneyi ile numunede meydana gelen şişme yüzdesi aşağıdaki Denklem (3.2) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$S = \frac{\Delta H}{H_0} (\%) \quad (3.2)$$

Burada S, şişme yüzdesini; ΔH , numunede meydana gelen toplam şişme miktarını (mm) ve H_0 ise, numunenin ilk yüksekliğini göstermektedir.

3.3. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Metodu ve Bu Metodun Emme Kapasitesi ile Şişme Basıncına Uygulanması

Yapılan deneysel çalışmaların ardından elde edilen verilere bulanık kurallar uygulanmıştır. Öncelikle sıkıştırılmış bir kilin emme kapasitesi ve şişme basıncına etkiyen faktörlerden olan kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi bulanık kümelerle ayrılmıştır. Daha sonra emme kapasitesi ve şişme basıncı da bulanık kümeler halinde oluşturulmuştur. Elde edilen bulanık kurallar Fortran 5.1 programlama dilinde yazılmıştır. Oluşturulan bulanık model yardımıyla, kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi girdi olarak girildiğinde şişme basıncı ve emme kapasitesi tahmin edilebilmektedir.

3.3.1. Bulanık Mantık Kavramı

Herhangi bir konudaki bilgi kaynağı, kesin olmayan ve hatta sözel bilgi kaynaklarını da içerebilir. Bu gibi konuların anlaşılması zor olduğundan, insan beyni böyle karışık durumları yaklaşık olarak canlandırarak yorumlar. Belirsiz ve kesin olmayan konular hakkındaki yorumlamaların da belirsiz (bulanık) olduğu söylenebilir. Bir konu hakkında ne kadar fazla bilgi sahibi olursak, onu o kadar daha iyi anlayabiliriz ve onun hakkındaki bulanıklıklar da o derece azalır.

Bir sistemin (problemin) çözümü araştırılırken, bulanık olan ve olmayan her girdi ve çıktı bilgileri, sistem çözümüne dahil edilmelidir. Zadeh (1965), belirsizliklerle dolu olan bir sistemin çözümünde Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) isimli bir modelleme tekniğini geliştirmiştir. Zadeh 'in geliştirdiği bulanık mantık modellemesinde, belirsizliklerin ortaya koyulduktan sonra daha güvenilir olarak dikkate alınabilecekleri bu tekniğin ana fikrini oluşturmaktadır (Şen, 1999). Bulanık sistemler, teorik ve matematik aksiyomlu yaklaşımlardan bağımsız bir çözüm algoritması temsil ettiğinden, bir sistemin modellenmesinde yaklaşık ve kolay çözümlülük verirler. Ayrıca, elde edilebilen tüm sayısal ve sözel bilgiler de çözüm algoritmasına katılarak daha kolay ve daha anlamlı çözümlere varılabilmektedir. Bu bakımdan, bulanık mantık yöntemi, uzman kişilerin de vereceği sözel bilgilerin işlendiği toptan çözüme gitmeye yarayan bir modelleme yöntemidir (Bumat, 2001).

Geçmişte, belirsizliklerin işlenmesi ve anlamlı sonuçlara varılabilmesi için ihtimaller teorisi kullanılmıştır. İhtimaller teorisi, matematik alanında istatistik yöntemlerle birlikte kullanılmış ve belirsizliklerin rastgele karaktere sahip olduğu düşünülmüştür. Ancak, belirsizliklerin çoğu rastgele karakterde değildir. Geoteknik mühendisliği alanında da karşılaştığımız rasgele karakterde olmayan çoğu belirsizlik deneysel hatalardan kaynaklanabilmektedir. Bu yüzden, belirsiz olayların incelenmelerinde ihtimaller teorisi ve istatistik gibi sayısal belirsizlikleri gerektiren yöntemler kullanılamamaktadır (Şen, 1999).

Bulanık mantık metodu, incelenen olayın çok karmaşık olması ve bununla ilgili yeterli bilginin bulunmaması durumunda, kişilerin görüş ve değer yargılarına da yer vermesi bakımından problemlerin çözümlenmesinde kolaylık sağlamaktadır. Mühendislik problemlerinin bulanık mantık metodu ile çözümünde, araştıracının her şeyden önce ulaşacağı sonuçların hangi tolerans sınırları içinde kalacağına karar vermesi gerekmektedir. Bir olayın karmaşıklığının bilinmesi ve insanın olaydaki belirsizlikler hakkında fikir beyan etmesi faydalı bir bilgi kaynağıdır. Olayların incelenmesinde, bu tür bilgi kaynaklarının sistematik bir biçimde kullanılmasına bulanık mantık kuralları yardımcı olur.

Geoteknik mühendisliğinde de, herhangi bir konuda yapılan deneysel ölçümlerle elde edilen verilerle, ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçların birbiri ile uyuşmadığını gözlemlemek genellikle mümkündür. Bir zemin numunesi üzerinde aynı şartlar altında aynı deneyi birkaç kez tekrarladığımızda, sonuçların birbirine çok yakın ancak genellikle tamamen aynı olmadığını gözlemleyebiliriz. Bu gözlemler bizi, ölçülen değerlerin, incelenen problemde ortam, alet durumlarına, insan faktörüne göre geçerli olan bir aralıkta olduğu sonucuna götürür. Yapılmış sonlu sayıdaki ölçümlerden bunların düşeceği ortamın boyutları, ayrık veya sürekli olup olmadıkları hakkında bilgiler elde ederiz. Buna rağmen, bir sonra yapılacak ölçümün bu ortamda nokta olarak nereye düşeceğini çoğu zaman bilemeyiz. Böylece karşımıza ölçümlerin düşeceği aralık hakkında bilgili olduğumuz, fakat olayın sonucunun bu aralıkta nokta olarak nereye düşeceğini bilemeyeceğimiz bir belirsizlik durumu ortaya çıkar. Örneğin, aynı numune üzerinde yapılan likit limit deneyi sonuçlarının %39 ile %41 arasında değiştiği sonucunu görebiliriz.

Casagrande plastisite kartında, likit limiti %50 'den fazla olan ince daneli zeminler yüksek plastisiteli zeminler olarak adlandırılmaktadır. Bu karta bulanık mantık yaklaşımıyla baktığımızda, yüksek plastisitenin değişik dereceleri elde edilir. Örneğin, herhangi bir yüksek plastisiteye sahip zeminin plastisite indisi kriter olarak alınıp bu zemine yüksek plastisiteli denirse, ondan daha yüksek plastisiteli zeminler çok yüksek plastisiteli zeminler olarak, daha düşük olanlar ise az yüksek plastisiteli zeminler olarak isimlendirilebilir. Böylelikle, likit limiti %50 'den fazla olan

zeminler kümesinin elemanlarının plastisite açısından birer yüksek plastisite üyelik derecesine sahip olduklarını söyleyebiliriz.

Şimdiye kadar alışlagelen klasik küme kavramında, bir kümeye giren öğelerin oraya ait oluşları durumunda üyelik dereceleri 1'e, ait olmamaları durumunda ise 0'a eşit varsayılır. Bunun arasında hiçbir üyelik derecesi düşünülemez. İşte bulanık kümeler kavramında 0 ile 1 arasında değişen değişik üyelik derecelerinden söz etmek mümkün olup, bulanık kümelerdeki öğelerin üyelik dereceleri 0 ile 1 arasında kesintisiz olarak değerler almaktadır.

3.3.2. Bulanık Mantık Kuralları

Bir problemin çözümlenmesine başlanmadan önce, toplanabildiği kadar sayısal ve sözel veriler gözönünde tutularak, çözüm için en uygun yöntem karar verilir. Bulanık mantık metodu da sözel verileri işlemekte etkin bir metottur. Bu metotta, sözel bilgileri bilgisayarlara kurallar yardımıyla tanıtarak bulanık işlemler yapılmaktadır.

İncelenen olayın herhangi bir değişkeni için, belirlenen olasılıkları içeren topluluğa küme denir. Örneğin, pozitif tam sayılar kümesi denilince öğeleri ayırık fakat sonsuz sayıda olan bir küme anlaşılır.

$$PS = \{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,\dots,100,\dots\} \quad (3.3)$$

Öğelerinin ayırık olmayıp süreklilik gösterdiği kümeler de vardır. Bunların değişim aralıkları ne olursa olsun içerdikleri üye sayısı sonsuzdur. Örneğin, $F(x) = x$ fonksiyonu $\{1-10\}$ aralığında sürekli denildiğinde, öğeleri sürekli fakat 1 ile 10 arasındaki bütün tam ve ondalıklı sayılar olan bir küme anlaşılır.

$$F(x) = \{1 \leq x \leq 10\} \quad (3.4)$$

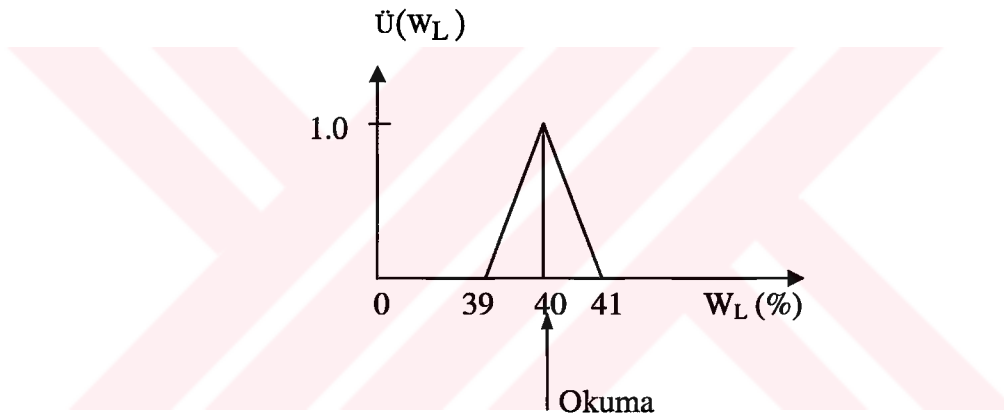
Bir olayın incelenmesi sonunda mutlaka küme öğelerinden bir tanesine karar verilmesi gerekir. Ancak hangisinin olacağı tam olarak bilinmemektedir. İşte bu tam olarak bilinmemenin belirsizlik olması ve bu öğe belirsizliğinin olasılık denilen sayısal bir değere sahip olması bir sonraki bölümde anlatılacaktır.

Klasik kümelerde bir öğeden diğerine geçiş, keskin ve ani değişen üyelik dereceleri sayesinde olmaktadır. Ancak bulanık kümelerde bu geçiş yumuşak ve sürekli bir şekildedir. Bu geçişte kesin olmama, belirsizlik, hayal gücü, sezgi gibi görüşler rol oynar. Başka bir deyişle, bulanık kümenin üyelik derecesinin fonksiyonu, bu tür görüşlerin karışık bir şekilde öğelere yayılmasını temsil eder. Buradan ortaya çıkan önemli bir sonuç, klasik kümelerde bir öğenin kümeye ait olması için üyelik derecesinin mutlaka 1'e eşit olması gerektiğidir. Buna karşılık bulanık kümede, çoğu öğenin değişik derecelerle, kümeye ait olmalarının mümkün olmasıdır. Ayrıca, bir bulanık küme öğesi başka bir kümenin de öğesi olabilir.

3.3.3. Üyelik Fonksiyonları ve Üyelik Dereceleri

Dikkate alınan bulanık bir ifadenin temsil ettiği sayısal aralık, o ifade hakkında bilgi sahibi olan kişiler tarafından belirlenebilir. Örneğin, çoğu killi zemin için likit limit değeri değişim aralığının %0 'dan %120 'ye kadar olduğu söylenebilir. İşte bu aralık, likit limit değerleri kümesi elemanlarının bulunabileceği aralığı gösterir. Bununla birlikte, likit limit kümesinin yine bir takım alt aralıklardan oluştuğu düşünülebilir. Örneğin, çok az, az, orta, yüksek, çok yüksek likit limit alt kümeleri gibi. Her bir alt küme aralığı için, çok azın %0 ile %15, azın %15 ile %30, ortanın %30 ile %50, yüksek %50 ile %80 ve çok yüksek ise %80 ile %120 arasında değiştiği söylenebilir. Burada, aralık tahminlerinde bulunulmuş ve her bir alt aralıktan biri bitince diğeri başlamıştır. Ancak, bu aralıkların arasındaki geçiş kısımlarının böyle birbirinin devamı olmayacağı ve bir örtüşmenin söz konusu olabileceği düşünülürse, daha mantıklı ve daha gerçekçi çözüme gidilebilir. Çünkü, %30 ile %50 arasındaki likit limit sınırının orta olduğu herkesçe kabul edilmeyebilir. Dolayısıyla, likit limit kümesinin alt aralıklarının birbiri ile örtüşmeli geçişlere sahip olması gerektiği açıktır.

Bulanık alt küme sınırları belirlendikten sonra, kümedeki her bir alt aralığa, düşen likit limit değerlerinin (örneğin orta aralığa) hepsinin aynı önemde olup olmayacağı, yani, üyelik fonksiyonları belirtilmelidir. Orta aralığın alt ve üst sınırlarına yaklaştıkça, az yada yüksek alt kümelerine doğru geçişler beklenmektedir. O geçiş bölgelerine rastlayan sınırların tam anlamı ile orta özelliğine sahip olacağı söylenemez. Böylece, her bir alt aralığa düşen likit limit derecelerinin, o alt aralığın sınırlarına yakın kısımlarında, önemlerini orta aralığa kıyasla kaybedecekleri açıktır. Buradan da, eğer bir alt aralıkta önem derecesi diye bir değer düşünülecek olursa en büyük üyelik derecesine sahip değerler ortalarda en düşüklerin ise uçlarda olacağı anlaşılır. Bu düşünceler, bizi Şekil 3.13 'de gösterilen bir alt kümedeki küme öğelerinin her birinin o kümedeki üyelik derecesi önemini belirten bir geometrik gösterime yönlendirir.

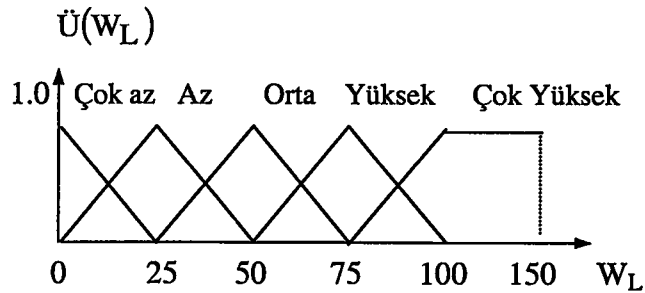


Şekil 3.13. Bulanık likit limit alt kümesi

Genel olarak, klasik küme şeklinde ortaya çıkan değişim aralıklarının bulanıklaştırılması, bulanık kümenin, mantık ve sistem işlemleri için gereklidir. Bunun için, bir aralıkta bulunabilecek öğelerin hepsinin 1 üyelik derecesine sahip olacağı yerde, 0 ile 1 arasında değişik değerlere sahip olması düşünülür. Böylece, bazı öğelerin belirsizlik içerdikleri kabul edilir. Bir aletin $\pm \%1$ 'lik hassasiyetindeki kalibrasyonu dikkate alındığında, alet yardımıyla ölçülen bir büyüklüğün x ile gösterilmesi halinde, $x + 0.01$ ve $x - 0.01$ arasında değişeceği anlaşılır. Örneğin, bir kil numunesinin deney sonucunda likit limit değerinin $\%40$ bulunması halinde, Cassagrande aleti ve bıçağının kalibrasyonu da dikkate alınarak, likit limit değerinin

hassasiyetin pratik olarak daha sağlıklı bir mantıki tanım olduğu ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.13 'de, klasik kümelere bir benzerlik teşkil etmesi açısından en büyük önem derecesine sahip olan ortaya yakın öğelere 1 üyelik derecesi değeri verilmiştir. Diğer değerler ise, 0 ile 1 arasında ondalıklı ve sürekli bir değişimi ifade etmektedir. İşte bu şekilde 0 ile 1 arasındaki değişimin her bir öğe değerine üyelik derecesi, $\bar{U}(W_L)$, bunun bir alt küme içindeki değişimine ise üyelik, fonksiyonu adı verilir. Üyelik dereceleri 1'e eşit olan öğelerin toplandığı alt küme kısmına o alt kümenin özü veya çekirdeği (core) denir. Üçgen şekilli bir üyelik fonksiyonunda, bir tane elemanın üyelik derecesi 1'e eşit olduğundan, üçgen üyelik fonksiyonlarının özü, bir nokta olarak karşımıza çıkar. Bir alt kümenin tüm elemanlarını içeren aralığa, o alt kümenin dayanağı (support) adı verilir. Üyelik dereceleri 1'e veya 0'a eşit olmayan öğelerin oluşturduğu kısımlara üyelik fonksiyonunun sınırları veya geçiş bölgeleri (crossover zone) adı verilir. Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarında üyelik derecesinin 0.5'e eşit olması durumundaki noktaya geçiş noktası (crossover zone) adı verilir (Tsoukalas ve Uhrig, 1997; Şen, 1999).

Bulanık kümelerin gerek üyelik derecelerinin gerekse üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde kişisel sezgi, mantık ve tecrübelerden yararlanılır. Literatürde üçgen, trapez, Gaussian, sigmoidal ve çan şekilli üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Ancak, en çok kullanılan üyelik fonksiyonu üçgen üyelik fonksiyonudur (Jang vd., 1997). Örneğin, killerin likit limiti için çok az, az, orta, yüksek ve çok yüksek likit limitli gibi 5 tane alt küme belirlenebilir ve her biri üçgen ve trapez şekilli üyelik fonksiyonları ile temsil edilebilir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Likit limit bulanık alt kümeleri

3.3.4. Eğer – İse (If – Then) Kuralları

Makinalar tarafından bilgi işlemlerinin algılanma yolu olan, yapay zeka alanında, bilgi işlemi için değişik yollardan bir tanesi de, bilgiyi sanki insan dilindeki gibi ifade etmektir. Bu, insan bilgisini makinalara aktarma yoludur. Bu aktarma işleminde eğer- ise (If - Then) olarak ayrılmış iki kısım bulunur. Bunlardan EĞER ile İSE kelimeleri arasında bulunan kısma öncül veya ön şartlar, İSE kelimesinden sonraki kısma ise soncul veya çıkarım adı verilir. Örneğin; “EĞER *Plastisite İndisi az* İSE *Şişme azdır*” ifadesi, bilinen bazı bilgilerin kullanılması ile, diğer bazı bilgilerin çıkarılması anlamına gelir. Bu bilgiler, insanın kişisel deneyim ve tecrübelerinden çıkardığı bilgilerdir. Halbuki, bilgilerin daha çoğu sezgi, yapı, fonksiyon, olaylar ve sonuçlar arasındaki davranış biçimlerine göre elde edilir. Bunların sözel olarak kolay bir şekilde çıkarılması mümkün değildir. Bu bilgilerin gelişerek oluşmasında yılların gözlem, deney ve birikimleri vardır.

3.3.5. Bulanık İşlemler

Bir sistemin modellenmesinde, birden fazla kurala sahip bulanık ifadeler mevcuttur. Tüm sistemde bir sonuca varabilmek için her bir kuralın (Eğer-İse) oluşturulması kısmında her bir kurala bağlı olarak ortaya çıkan sonuçların harmanlanması gereklidir. Buradan kuralların, hepsinin katkısının olduğu genel bir çıkarıma gitmek gereklidir. Örneğin; γ_k (kuru birim hacim ağırlık), w_o (başlangıç su muhtevası) ve PI (plastisite indisi) gibi üç tane öncül ve W_{em} (emme kapasitesi) gibi bir tane sonculu olan, r tane kuralı olan bulanık sistem Eğer-İse ifadesi ile modellenebilir.

$$\text{EĞER } \gamma_k^n(i) \text{ ve } w_o^n(j) \text{ ve } PI^n(k) \text{ İSE } W_{em}^n(z) \quad (n = 1, 2, \dots, r) \quad (3.5)$$

Burada i, j, k ve z değişkenleri her bir bulanık parametrenin ait olduğu alt kümeyi gösterir. Örneğin, $\gamma_k(2)$, kuru birim hacim ağırlık bulanık kümesinin ikinci alt kümesini göstermektedir. Bulanık sistem modeli oluşturulduktan sonra bu kuralların harmanlanması gereklidir. Literatürde çok farklı harmanlama metodları

kullanılmaktadır. Lee (1990a,b), 40 ‘tan fazla bulanık çıkarım (harmanlama) bağıntısının olduğunu belirtmiştir. Hines (1997), Jang vd. (1997), Tsoukalas ve Uhrig (1997) harmanlama seçimine mantıksal ve sezgisel durumların yansıdığını ifade etmişlerdir. Literatürde kullanılan farklı harmanlama operatörleri, bu çalışmada ele alınan problemler için uygulanarak aşağıda örnekler halinde verilmiştir.

1. Zadeh maks-min harmanlama operatörü: Zadeh (1973) tarafından bulanık işlemlerin harmanlanması için verilen bağıntı bu çalışmadaki emme kapasitesinin belirlenmesi problemine Eşitlik (3.6) ‘deki gibi uygulanmıştır:

$$\begin{aligned} \ddot{U}(W_{em}(z)) = & \left[\ddot{U}(\gamma_k(i)) \wedge \ddot{U}(w_o(j)) \wedge \ddot{U}(PI(k)) \right] \vee \\ & \dots \dots \dots \left[\left[1 - \ddot{U}(\gamma_k(i)) \right] \wedge \left[1 - \ddot{U}(w_o(j)) \right] \wedge \left[1 - \ddot{U}(PI(k)) \right] \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Burada; $\ddot{U}(\gamma_k(i))$, $\ddot{U}(w_o(j))$, $\ddot{U}(PI(k))$ ve $\ddot{U}(W_{em}(z))$ sırasıyla, kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası, plastisite indisi ve emme kapasitesi bulanık alt kümelerinin üyelik (ait olma) derecelerini göstermektedir. i, j, k ve z indisleri ise, sırasıyla kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası, plastisite indisi ve emme kapasitesi bulanık kümelerinin ait oldukları alt kümeyi ifade etmektedir. $\wedge$ (veya) sembolü bulanık kümeler arasındaki kesişimi, $\vee$ (ve) sembolü ise birleşimi göstermektedir. Bu denklemde; önce kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi bulanık alt kümeleri üyelik derecelerinin en küçüğü bulunur. Sonra, bu üyelik derecelerinin 1 ‘den çıkarılıp tekrar en küçüğünün bulunması ile ortaya çıkan iki sonuçtan en büyük üyelik derecesi değerinin, emme kapasitesi alt kümesini kesen üyelik derecesi olarak alındığı kabul edilmiştir.

2. Mamdani min. harmanlama operatörü: Mamdani (1977), bulanık işlemlerin harmanlanmasında Zadeh’in (1973) vermiş olduğu bağıntıyı basitleştirmiştir. Mamdani minimum harmanlama operatörü şişme basıncının belirlenmesine aşağıdaki gibi uygulanmıştır:

$$\dot{U}(P_s(z)) = \dot{U}(\gamma_k(i)) \wedge \dot{U}(w_o(j)) \wedge \dot{U}(PI(k)) \quad (3.7.)$$

Bu denklemde; kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi bulanık alt kümeleri üyelik derecelerinin en küçüğü, şişme basıncı alt kümesini kesen üyelik derecesi, $\dot{U}(P_s(z))$, olarak tanımlanmaktadır.

3. Larsen çarpım harmanlama operatörü: Larsen (1980) tarafından bulanık işlemlerin harmanlanmasında aritmetik çarpımı kullanarak verilen bağıntı çalışmadaki probleme aşağıdaki gibi uygulanmıştır:

$$\dot{U}(P_s(z)) = \dot{U}(\gamma_k(i)) \cdot \dot{U}(w_o(j)) \cdot \dot{U}(PI(k)) \quad (3.8)$$

Bu denklemde; kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi bulanık alt kümeleri üyelik derecelerinin aritmetik çarpım değeri, şişme basıncı alt kümesini kesen üyelik derecesi olarak alınmaktadır.

4. Aritmetik harmanlama operatörü: Zadeh (1975) tarafından verilen aritmetik harmanlama operatörünün bu çalışmadaki probleme uygulanışı aşağıda verilmiştir:

$$\dot{U}(W_{em}(z)) = 1 \wedge \left[\begin{array}{l} \left[1 - \dot{U}(\gamma_k(i)) + \dot{U}(w_o(j)) \right] \wedge \\ \left[1 - \dot{U}(w_o(j)) + \dot{U}(PI(k)) \right] \wedge \\ \dots\dots\dots \end{array} \right] \quad (3.9)$$

Bu denklemde; ilk olarak parantez içerisindeki kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi bulanık alt kümeleri üyelik derecelerinin aritmetik toplamaları (6 farklı toplama işlemi) dikkate alınmaktadır. Bu toplamaların en küçüğü

bulunduktan sonra elde edilen sonuç, eğer 1 'den küçük ise bu çıkan sonucu, büyük ise 1 değerini, emme kapasitesi alt kümesini kesen üyelik derecesi olarak tanımlar.

5. Boolean harmanlama operatörü: Daha çok kontrol çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki probleme uygulandığı aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \ddot{U}(W_{em}(z)) = & \left[\left[1 - \ddot{U}(\gamma_k(i)) \right] \wedge \left[1 - \ddot{U}(w_o(j)) \right] \wedge \left[1 - \ddot{U}(PI(k)) \right] \right] \vee \\ & \left[\ddot{U}(\gamma_k(i)) \wedge \ddot{U}(w_o(j)) \wedge \ddot{U}(PI(k)) \right] \end{aligned} \quad (3.10)$$

Burada; ilk olarak kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi bulanık alt kümeleri üyelik dereceleri 1 'den çıkartılır. Elde edilen üç ayrı değerden en küçüğü belirlenir. Bu üç alt bulanık küme üyelik derecelerinin yine en küçüğü hesaplanıp, bu iki sonuçtan en büyük olan değer, emme kapasitesi alt kümesini kesen üyelik derecesi olarak tanımlanır.

Bir bulanık işlem gerçekleştirilirken elde edilen bulanık çıktı, yukarıdaki harmanlama operatörlerinden birisi yardımıyla yapılır. Bazen bir olaya r adet kural etki edebilir. Bu durumda, bütün kuralların birlikte harmanlanması gerekmektedir. Bu harmanlama işlemi; Zadeh (1973) maks-min harmanlama operatörü ile yapıldığında r adet bulanık çıktının kesişimleri alınırken; Mamdani (1977) min harmanlama ve Larsen (1980) çarpım operatörleri ile yapıldığında her iki yöntemde de r adet bulanık çıktının birleşimleri alınır. Aritmetik harmanlama operatörü ve Boolean harmanlama operatörü ile yapıldığında ise r adet bulanık çıktının kesimleri alınmaktadır. Ancak Boolean harmanlama operatörü klasik kümelerle yapılan işlemlerin kontrolü amacıyla kullanılmaktadır.

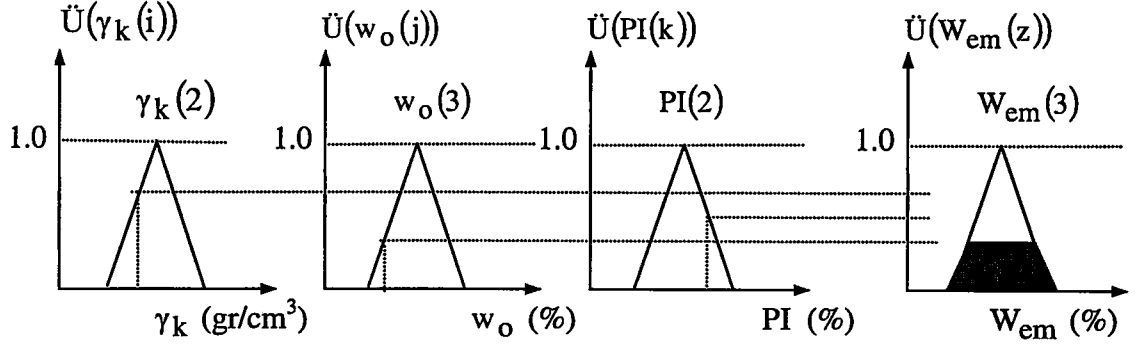
Bulanık kuralların harmanlanmasında en çok kullanılan operatörler; Mamdani (1977) ve Larsen (1980) harmanlama operatörleridir. Bu çalışmada, Mamdani (1977) harmanlama yöntemi kullanılmıştır. Bunun nedeni, diğer operatörler denenip deneysel verilere en yakın değerlere Mamdani (1977) harmanlama yöntemi ile

ulaşılmıştır. Bu yöntem, bir kilin emme kapasitesine etki eden faktörlerden olan kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisinin herbirinin yalnızca iki kuralı için, aşağıda grafiksel olarak adım adım gösterilmiştir (Şekil 3.15). Burada, sistemi temsil eden ve gerçekleşen her bir kural ‘VE’ birleşimi yapıldığında en küçük üyelik derecesi, EK, alınacaktır. Diğer bir değişle, VE kullanıldığında, kümeler teorisine göre bunların kesişimleri alınmaktadır. İkinci bir bağlaç olan “VEYA” kullanıldığında ise en büyük üyelik derecesi, EB, alınacaktır. Yani, kümeler teorisine göre bunların birleşimleri alınmaktadır (Denklem 3.11).

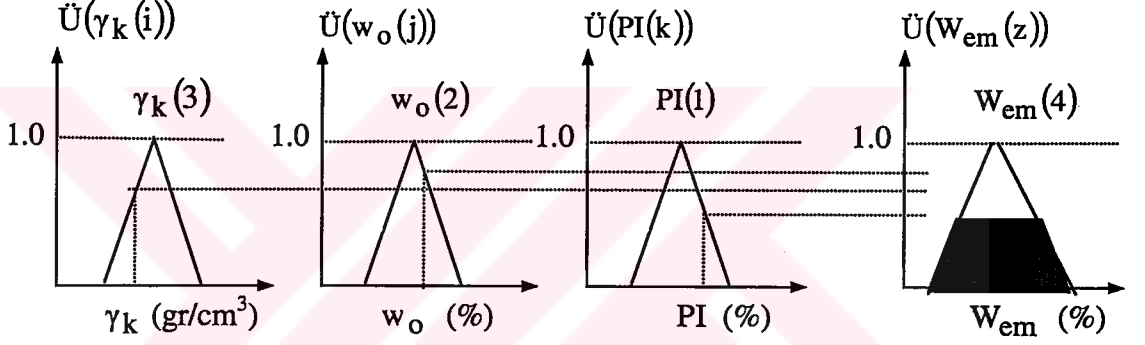
$$\dot{U}(W_{em}^n(z)) = EB \left[EK \left[\dot{U}(\gamma_k^n(i)), \dot{U}(w_o^n(j)), \dot{U}(PI^n(k)) \right] \right] \quad (n = 1, 2, \dots, r) \quad (3.11)$$

Kural 1 ‘de; $\gamma_k(2)$, $w_o(3)$, $PI(2)$ ve $W_{em}(3)$ sırasıyla, kuru birim hacim ağırlık bulanık kümesinin 2. bulanık alt kümesini, başlangıç su muhtevası bulanık kümesinin 3. bulanık alt kümesini, plastisite indisi bulanık kümesinin 2. bulanık alt kümesini ve emme kapasitesi bulanık kümesinin 3. bulanık alt kümesini göstermektedir. Benzer şekilde Kural 2 ‘de ise; $\gamma_k(3)$, $w_o(2)$, $PI(1)$ ve $W_{em}(4)$ sırasıyla, kuru birim hacim ağırlık bulanık kümesinin 3. bulanık alt kümesini, başlangıç su muhtevası bulanık kümesinin 2. bulanık alt kümesini, plastisite indisi bulanık kümesinin 1. bulanık alt kümesini ve emme kapasitesi bulanık kümesinin 4. bulanık alt kümesini göstermektedir. Her bir kural, Mamdani çıkarımına göre “VE” bağlacıyla birleştirilmiş ve emme kapasitesinin bulanık alt kümeleri, $W_{em}(3)$ ve $W_{em}(4)$, elde edilmiştir. Daha sonra bu iki emme kapasitesi bulanık alt kümeleri yine Mamdani çıkarımına göre “VEYA” bağlacıyla birleştirilerek bir çıkarım kümesi elde edilmiş ve bu çıkarım kümesinden elde edilen W_{em}^* değeri (bulanık modelden elde edilen emme kapasitesi değeri), Bölüm 3.3.6 ‘da görüleceği üzere Sentroid yöntemi (COA) ile elde edilmiştir.

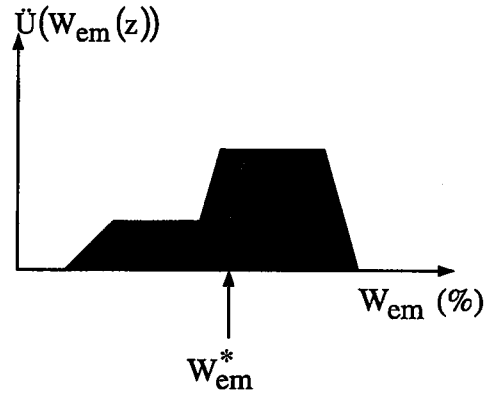
KURAL 1 : EĞER $\gamma_k^1(2)$ ve $w_o^1(3)$ ve $PI^1(2)$ İSE $W_{em}^1(3)$



KURAL 2 : EĞER $\gamma_k^2(3)$ ve $w_o^2(2)$ ve $PI^2(1)$ İSE $W_{em}^2(4)$



ÇIKARIM : $W_{em}^1(3)$ VEYA $W_{em}^2(4)$



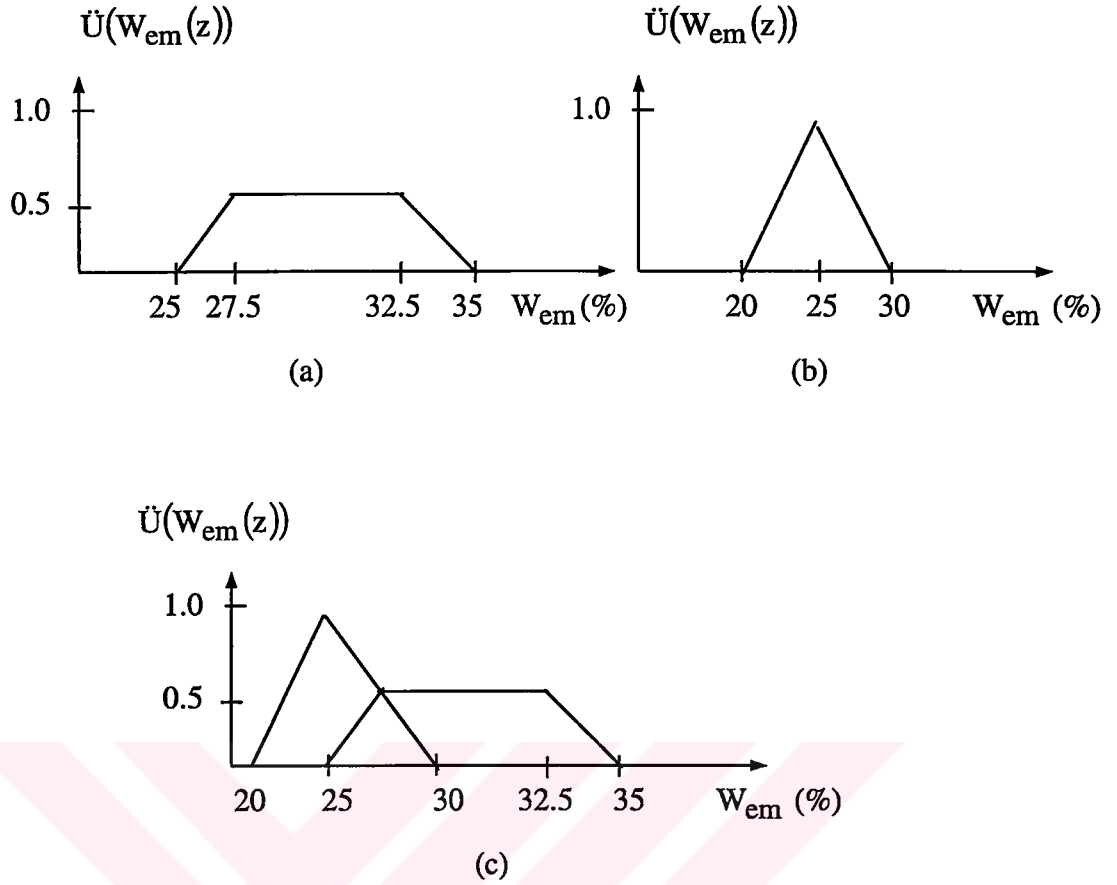
Şekil 3.15. Mamdani en büyük-en küçük (EB-EK) çıkarımı

Herbir kural tabanlı EĞER - İSE ifadesinde, bu şekilde ayrı ayrı çıkarımlar yapılır. Sistemin tümünü temsil edebilmek için, ayrı olan bu çıkarım üyelik fonksiyonlarının ‘veya’ bağlacı ile birleştirildiği düşünülerek, harmanlanmış çıkarım için kümelerin birleşim işleminin kullanılması ile iki ayrı bulanık kümenin örtüştüğü yani ortak olduğu kısımlardan meydana gelen bir karışık bulanık alt küme ortaya çıkar. İşte göz önünde tutulan bulanık kural tabanlı ifadelerle, modellenen sistemin girdiler, sonucunda vereceği tüm bilgiler bu harmanlanmış bulanık kümede toplanmıştır. Eğer sistem için tek bir sayısal değerin elde edilmesi gerekiyorsa, aşağıdaki bölümde anlatıldığı gibi durulaştırma işlemleri ile sonuca varılmaktadır.

3.3.6. Durulaştırma (Yorumlama) Bağlantıları

Bir önceki bölümde, emme kapasitesini bulanık mantıkla belirlenmesinde, bulanık işlemlerin yapılışı ve işlemler sonucunda bulanık çıkarım kümesinin elde edilmesi verilmiştir. Bir sonraki adım, bulanık olarak elde edilen bu bilgilerden yararlanarak, gerekli sayısal cevapların alınması için bulanık olan bilgilerin durulaştırılması işlemidir.

Durulaştırma işlemi, bulanıklaştırma işleminin tersidir. Yani, bulanık ifadelerden kesin ifadelere geçiş yapılmaktadır. Bu çalışmada, bir kilin emme kapasitesine etki eden parametrelerden olan, kilin kuru birim hacim ağırlığı, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi ele alınmıştır. Bu parametrelerin etkisi neticesinde herhangi iki kuralın işlemesinden ortaya çıkan bulanık sonuçlardan bir tanesinin Şekil 3.16a ’daki gibi yamuk, diğerinin ise Şekil 3.16b ’deki gibi üçgen şeklinde olduğu düşünölsün. Bunların ikisinin birleşimi ise, yapılan son işlem sonrasında bulanık çıkarım olsun (Şekil 3.16c). Bu bulanık çıkarımdan tek sayılı bir tasarım büyüklüğünün elde edilmesi istenilirse, bunun için durulaştırma işleminin yapılması gerekmektedir.

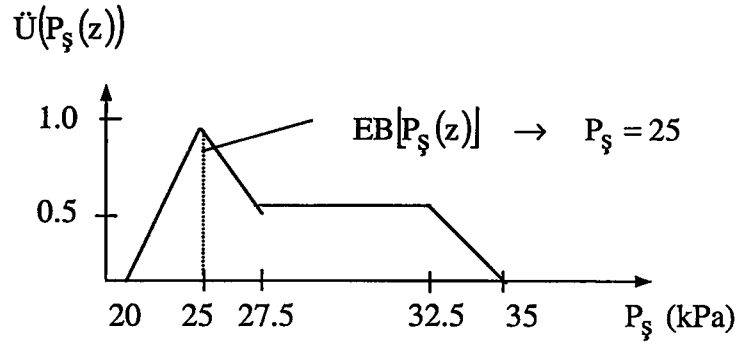


Şekil 3.16. Tipik bulanık küme çıktısı, (a) bulanık çıktı (kural 1), (b) bulanık çıktı (kural 2), (c) bulanık birleşim

Aşağıda farklı durulaştırma işlemleri verilmiştir. Bunların hangisinin kullanılacağına, araştırma veya tasarımı yapan kişi elindeki problemin türüne göre karar vermelidir (Jang vd., 1997; Tsoukalas ve Uhrig, 1997, Şen, 1999).

1. En büyük üyelik ilkesi: Bunun diğer bir adı da ‘yükseklik’ yöntemidir. Kullanılması için tepeleri olan çıkarımlara gerek vardır. Şekil 3.17 ‘de gösterilen bu çalışmadaki probleme uygulanan, durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için Denklem (3.12) kullanılmaktadır. Kısaca ifade etmek gerekirse, en büyük üyelik derecesine sahip olan değer, bulanık işlemler sonucunda elde edilen şişme basıncı değeri olarak alınır.

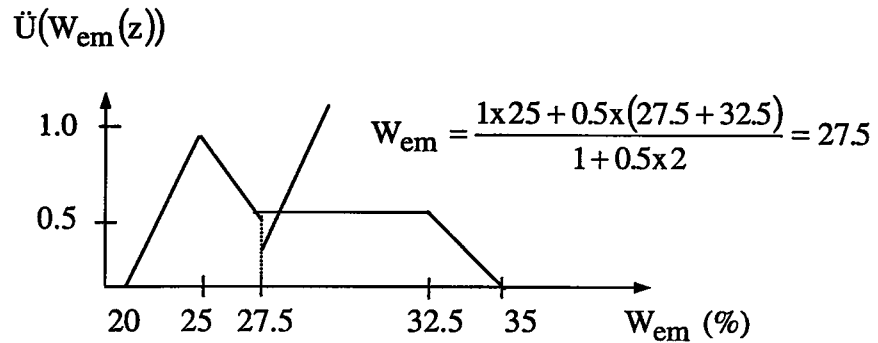
$$P_{\ddot{s}} = EB[P_{\ddot{s}}(z)] \quad (3.12)$$



Şekil 3.17. En büyük üyelik derecesi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması

2. Sentroid yöntemi (COA): Bu yöntemin diğer bir adı ağırlık merkezi yöntemidir. Durulaştırma işlemlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Şekil 3.18 'de gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için aşağıdaki denklem geçerlidir. Kısaca ifade etmek gerekirse, bulanık çıktı şeklinin ağırlık merkezi değeri, bulanık işlemler sonucunda elde edilen emme kapasitesi değeri olarak alınır.

$$W_{em} = \frac{\int U(W_{em}(z)) \cdot W_{em}(z) \cdot dW_{em}(z)}{\int U(W_{em}(z)) \cdot dW_{em}(z)} \quad (3.13)$$

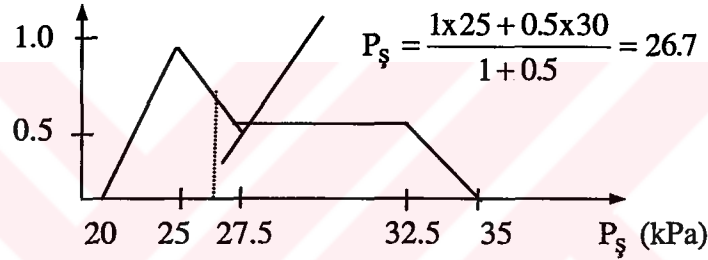


Şekil 3.18. Sentroid yöntemi ile durulaştırmanın emme kapasitesinin belirlenmesine uygulanması

3. Ağırlıklı ortalama yöntemi: Bu yöntemin kullanılabilmesi için simetrik bir üyelik fonksiyonunun bulunması gereklidir. Böylece, çıkışı oluşturan bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının her biri sahip oldukları en büyük üyelik derecesi değeri ile çarpılarak, ağırlıklı ortalamaları alınır. Şekil 3.19 'da gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için aşağıdaki denklem şişme basıncının belirlenmesi problemine uygulanmıştır.

$$P_{\S} = \frac{\sum \bar{U}(P_{\S}(z))P_{\S}(z)}{\sum \bar{U}(P_{\S}(z))} \quad (3.14)$$

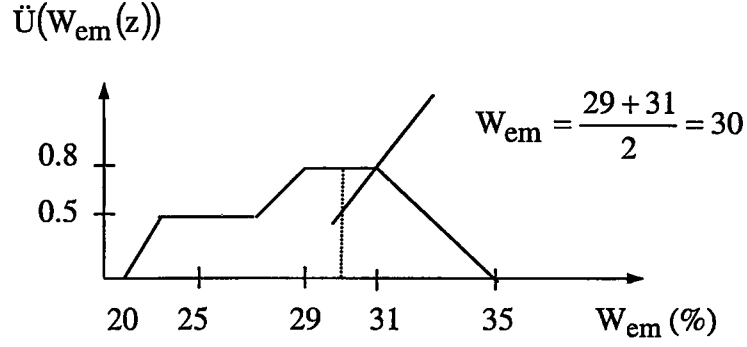
$$\bar{U}(P_{\S}(z))$$



Şekil 3.19. Ağırlıklı ortalama yöntemi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması

4. Ortalama en büyük üyelik (MOM): Diğer bir adı en büyüklerin ortasıdır. Birinci durulaştırma ilkesine çok yakındır. Ancak en büyük üyeliğin konumu tekil olmayabilir. Bunun anlamı üyelik fonksiyonunda en büyük üyelik derecesine sahip olan, $\bar{U}(W_{em}(z))=1$, bir nokta yerine plato kısmı bulunabilir. Şekil 3.20 'de gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için aşağıdaki denklem geçerlidir. Bu yöntem sentroid yönteminden hızlı çalışmasına rağmen, bulanık çıkarım kümesinin hepsini hesaplara dahil etmemesi gibi bir dezavantaja sahiptir.

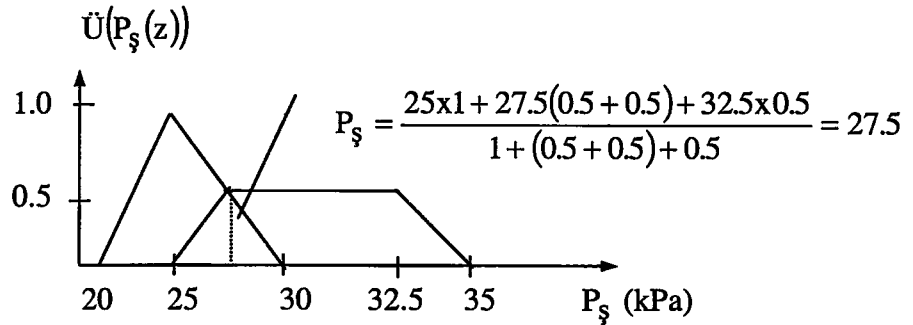
$$W_{em} = \frac{W_{em}(z) \bar{U}_{maks,1}(W_{em}(z)) + W_{em}(z) \bar{U}_{maks,2}(W_{em}(z))}{2} \quad (3.15)$$



Şekil 3.20. Ortalama en büyük üyelik durulaştırmasının emme kapasitesinin belirlenmesine uygulanması

5. Toplamların merkezi (COS): Kullanılan durulaştırma işlemleri arasında en hızlı olan yöntemdir. Bu yöntemde iki bulanık kümenin birleşimi yerine, kümelerin alanlarının cebirsel toplamları kullanılır. Bu hesaplama tarzı ağırlıklı ortalama durulaştırmasına benzemektedir. Ancak toplamların merkezi yönteminde ağırlıklar ilgili üyelik fonksiyonlarının alanlarıdır. Ortalama ağırlıklar yönteminde ise bu her bir üyelik derecesidir. Toplamların merkezi yönteminin dezavantajı, örtüşen kısımların iki defa toplama girmesidir. Şekil 3.21 'de gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için aşağıdaki denklem probleme uygulanmıştır.

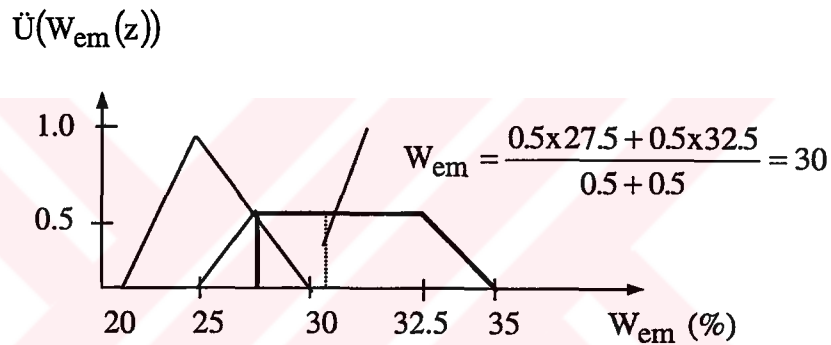
$$P_{\S} = \frac{\int P_{\S}(z) \cdot \sum_{\eta=1}^n \dot{U}(P_{\S}(z)) dP_{\S}(z)}{\int \sum_{\eta=1}^n \dot{U}(P_{\S}(z)) dP_{\S}(z)} \quad (3.16)$$



Şekil 3.21. Toplamların merkezi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması

6. En büyük alanın merkezi: Eğer çıkış bulanık kümesi en azından iki tane dış bükey alt bulanık kümeyi içeriyorsa, dış bükey bulanık kümelerin en büyük alanlısının (EB) ağırlık merkezi durulaştırma işleminde kullanılır. Şekil 3.22 'de gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için aşağıdaki denklem geçerli olmaktadır.

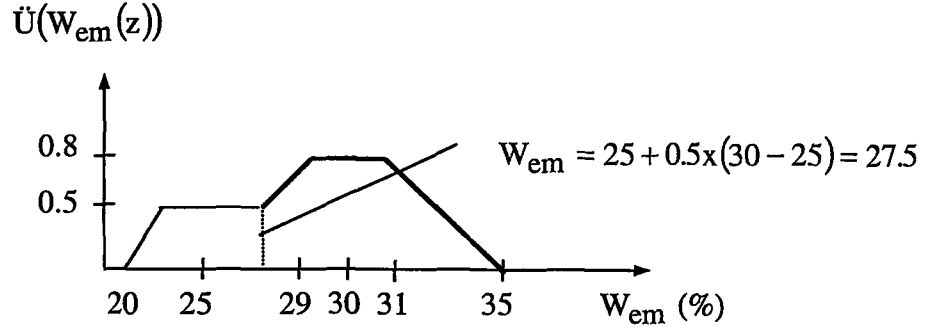
$$W_{em} = \frac{\int [\ddot{U}(W_{em}(z)) \cdot W_{em}(z)]_{EB} \cdot dW_{em}(z)}{\int \ddot{U}(W_{em}(z)) \cdot dW_{em}(z)} \quad (3.17)$$



Şekil 3.22. En büyük alan merkezi ile durulaştırmanın emme kapasitesinin belirlenmesine uygulanması

7. En büyük ilk veya son üyelik derecesi: Bu yöntemde, tüm çıktıların birleşimi olarak ortaya çıkan bulanık kümede, en büyük üyelik derecesine sahip olan bulanık alt kümenin en küçük (veya en büyük) emme kapasitesi değerini seçme esasına dayanır. Şekil 3.23 'de gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$W_{em} = [EB[\ddot{U}(W_{em}(z))]]_{EK[W_{em}(z)]} \text{ veya } EB[W_{em}(z)] \quad (3.18)$$



Şekil 3.23. İlk ve son en büyük üyelik dereceleri ile durulaştırma

Bütün bulanıklık işlemlerinin sonucunda, ulaşılan harmanlanmış çıkarımların durulaştırılması ile sayısal değerlerin elde edilmesi, mühendislerin tasarım, kontrol ve planlama işlemlerinde kullanabilmeleri için gereklidir. Burada sunulan durulaştırma yöntemlerinden hangisinin en iyi olduğu, kullanıcının ilgilendiği sorunla ilişkili olarak, bazı durumları önceden bilmesine bağlıdır. İncelenen olayın sürekli olup olmadığı, durulaştırmadan sonra varılan sonucun belirsiz, ikilemli veya çok cevaplı olmaması, basit olması, sonuçların makul ve mantıklı olması önemlidir. Ayrıca, en önemli şart, durulaştırma sonucunda elde edilen tek değer, ölçülmüş verilerle uyum sağlaması önemlidir. Böylece, sübjektif bilgilerin işlenip daha basit bir şekilde modelleme yapılması mümkün olmaktadır. Dolayısıyla, kişilerin deneyim, tecrübe, sezgi, görüş vb. özelliklerinden kaynaklanan bilgileri de modellemelerde objektif bulanık kurallar olarak katılabilecektir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Giriş

Bu bölümde, çalışmanın amacına yönelik olarak kullanılan zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarına, bulanık mantık modeli kurallarına ve bu kurallarla oluşturulmuş bilgisayar programının akış şeması verilmiştir. Öncelikle, çalışmada kullanılan zemin numuneleri tanımlanmış ve sonra X-Ray analizleri ile mineralojisi belirlenmiştir. Sıkıştırılmış numuneler üzerinde ödometre deney sistemi kullanılarak emme kapasitesi, sabit hacimli şişme ve serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra, bulanık metodun kullanılarak tahmini emme kapasitesi ve şişme basıncının elde edilmesi için, bulanık kuralların oluşturulması ve bunların Fortran 5.1 programlama dilinde programlanması ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.

4.2. Labotatuvar Deney Sonuçları

Yapılan sınıflandırma deneyleri ile kullanılan üç zemin numunesinin de Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre CH sınıfına girdiği tespit edilmiştir. Yapılan X-Ray analizleri ile her üç numunede de hakim kil mineralinin simektit + klorit olduğu belirlenmiştir.

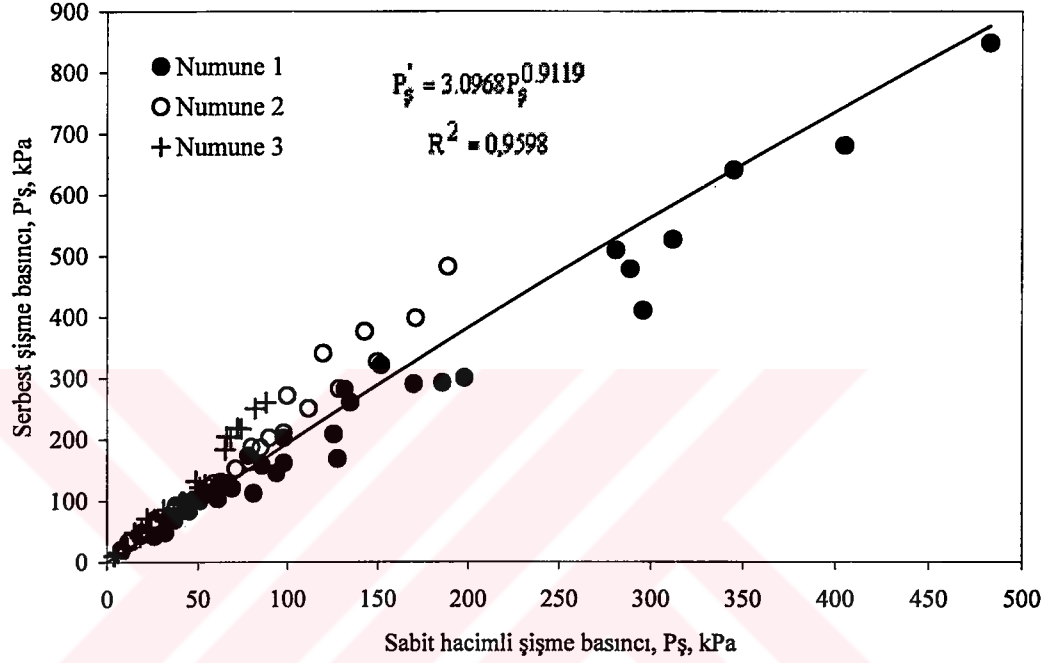
Farklı başlangıç şartlarında hazırlanan; başlangıç kuru birim hacim ağırlığının ve başlangıç su muhtevasının; emme kapasitesine (W_{em}), sabit deformasyonlu şişme basıncına (P_s), şişme yüzdesine (S) ve serbest şişme basıncına (P'_s) etkisinin araştırıldığı deneysel çalışmaların sonuçları Çizelge 4.1 'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sıkıştırılmış numunelerin ödometre deney yöntemi ile ölçülmüş emme kapasitesi ve şişme deney sonuçları

γ_k kN/m ³	W_o (%)	Numune 1				Numune 2				Numune 3			
		W_{em} (%)	$P_{\text{ş}}$ (kPa)	Serbest şişme		W_{em} (%)	$P_{\text{ş}}$ (kPa)	Serbest şişme		W_{em} (%)	$P_{\text{ş}}$ (kPa)	Serbest şişme	
				S %	$P_{\text{ş}}$ (kPa)			S %	$P_{\text{ş}}$ (kPa)			S %	$P_{\text{ş}}$ (kPa)
11.5	15	65	126	18	208	56	79	14	463	50	42	12	86
	20	60	98	13.5	161	55	65	12.1	128	49	33	11	75
	25	58	86	10.7	157	50	50	11	103	44	24	9	52
	30	50	53	9.1	112	46	26	8.6	63	40	18	7.5	41
	35	48	33	3.6	69	42	19	3.1	48	36	10	2.2	22
	40	44	26	1.5	42	40	8	0.9	20	34	4	0.5	10
13.0	15	62	152	18.5	321	51	90	14.2	202	45	51	13	110
	20	57	135	15	260	50	80	12.5	187	43	43	11.6	96
	25	55	98	12.1	202	45	59	11.4	128	42	39	9.5	88
	30	49	63	10.1	130	42	38	9.0	92	40	22	8	71
	35	46	51	4.8	100	41	26	3.6	68	35	10	2.6	24
	40	42	32	2.1	48	39	12	1.1	32	32	6	0.8	15
14.0	15	61	281	20	509	50	120	15	340	42	68	13.4	203
	20	56	198	15.8	300	48	100	13	271	41	54	12	126
	25	54	132	13	281	45	71	11.8	152	39	42	10	98
	30	48	78	11.8	173	42	48	9.7	102	36	31	8.4	85
	35	43	61	5	103	39	26	4.1	58	33	15	3	48
	40	42	37	2.9	68	36	18	1.4	43	27	9	0.9	22
15.0	15	60	345	20.6	640	48	143	16	376	42	74	14	217
	20	52	296	16.8	410	46	112	14.2	250	40	65	12.8	183
	25	50	170	13.7	290	43	85	12.3	486	38	51	11	122
	30	44	94	12.2	145	40	56	10.4	122	35	40	9	94
	35	40	69	5.7	120	36	38	4.3	89	30	19	3.5	51
	40	36	45	3.2	83	33	21	1.5	46	25	11	1	24
16.0	15	57	405	21.8	680	46	171	17.6	398	41	82	15	250
	20	50	289	18.2	478	44	129	15.8	282	40	66	13.9	204
	25	47	186	15.1	292	40	98	13.2	210	38	49	11.6	132
	30	42	128	12.8	168	36	62	11.3	126	34	41	9.5	98
	35	38	81	6.6	112	34	41	4.5	91	30	32	3.7	67
17.0	15	54	483	22.1	848	44	189	18	482	37	88	15.6	260
	20	48	312	20.2	526	42	150	16.4	326	35	72	14	218

Çizelge 4.1'e bakıldığında, başlangıç su muhtevasının etkisinin görülmesi için, sabit bir kuru birim hacim ağırlıkta, başlangıç su muhtevasının artması ile emme kapasitesi, şişme basıncı ve şişme yüzdesinin azaldığı görülmektedir. Kuru birim hacim ağırlığın etkisinin görülmesi için, sabit bir başlangıç su muhtevasında, kuru birim hacim ağırlık değişimine bakıldığında kuru birim hacim ağırlığın artması ile emme kapasitesinin azaldığı, şişme basıncı ve şişme yüzdesinin ise arttığı görülmektedir.

Deformasyonun engellenmediği ikinci grup şişme deneylerinden belirlenen şişme basınçları (P'_s) ile deformasyonun engellendiği birinci grup şişme deneylerinden elde edilen şişme basıncı (P_s) değerleri arasındaki ilişki çizilerek Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Sabit deformasyonlu şişme basıncı ile serbest şişme basıncı ilişkisi

Bu ilişki, aynı başlangıç koşullarında hazırlanmış numuneler üzerinde yapılmış olan sabit deformasyonlu şişme basınçları ile serbest şişme basınçlarının karşılaştırılması ile elde edilmiştir. Serbest şişme basınçlarının sabit deformasyonlu şişme basınçlarından yüksek olduğu görülmektedir. İki grup şişme deney sonuçlarından elde edilen sonuçlar arasında yapılan regresyon analizlerinden Denklem 4.1 elde edilmiştir.

$$P'_s = 3.0968P_s^{0.9119} \quad (4.1)$$

Burada, P'_s serbest şişme basıncı ve P_s ise, sabit deformasyonlu şişme basıncıdır.

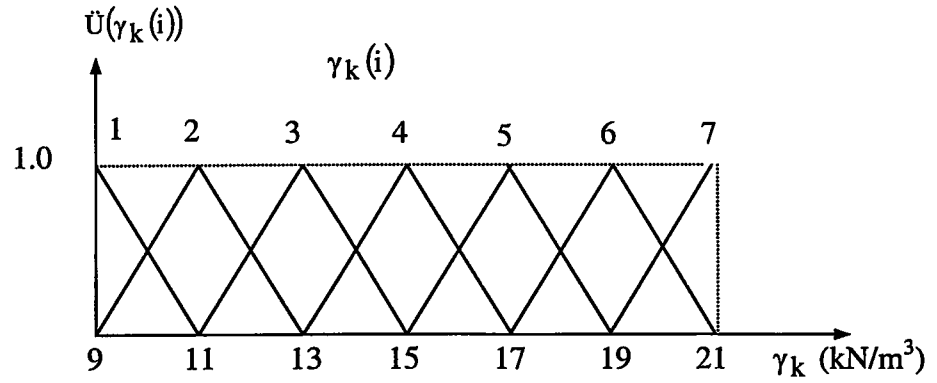
4.3. Emme Kapasitesi ve Şişme Basıncının Bulanık Mantık Metodu İle Modellenmesi

Sıkıştırılmış bir kilin emme kapasitesinin ve şişme basıncının laboratuarda belirlenmesi için yapılan deneyler uzun zaman almaktadır. Ayrıca, laboratuvar koşullarından, ölçüm aletinden ve deneyi yapan kişiden kaynaklanan bazı aksaklıklar ve özellikle sıkıştırılmış numunelerde fabrik deney sonuçlarının güvenilirliğini etkileyebilmektedir. Bu nedenle, laboratuvardaki ölçüm sonuçlarından elde edilen değerler, yaklaşık veya bulanık değerler olabilir.

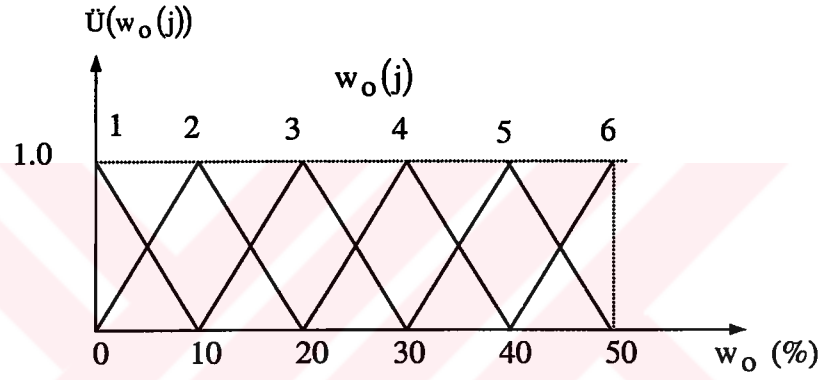
Bir kilin emme kapasitesine ve şişme basıncına etki eden çeşitli parametreler vardır. Bunlardan bazıları; zemin cinsi, plastisite indisi, boşlukların çapı, danelerin yapısı ve büyüklüğü, mineraloji, zeminin permeabilitesi, su muhtevası, kuru birim hacim ağırlığı, zemindeki su akımının hızı, sürşarj yükü, tabaka kalınlığı, kuruma- ıslanma devir sayısı, kuruma derecesi olarak sayılabilir (Koorevaar vd, 1983; Krahn ve Fredlund, 1972; Fredlund ve Rahardjo, 1993). Kilin emme kapasitesinin ve şişme basıncının belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmada, kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi faktörleri seçilmiştir. Bu faktörlerin seçilmesinin nedeni, kolaylıkla belirlenebilmeleri ve bunlardan yararlanarak emme kapasitesinin ve şişme basıncının tahmin edilebilmesidir.

Sıkıştırılmış bir kilin emme kapasitesi ve şişme basıncına etki eden faktörler plastisite indisi, başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkla sınırlandırıldıktan sonra, bu parametrelerin bulanık mantık modellemesi yöntemine uygun bir şekilde bulanıklaştırılması gerekmektedir. Bu üç parametrenin alt ve üst sınır değerleri ile bulanık alt kümelerin sınır değerleri yapılan deneysel çalışmalara ve literatürde verilen değerlere bağlı alınarak belirlenmiştir (Chen, 1975; Mitchell, 1976; Snethen, 1977; Nelson ve Miller, 1992; Keskin, 1993; Keskin vd., 1998).

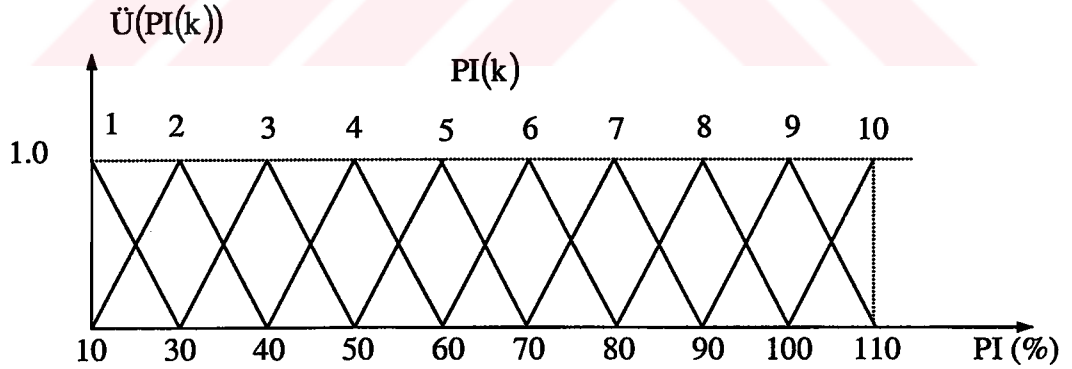
Girdi olarak düşünülen parametrelerden; kuru birim hacim ağırlık (γ_k) bulanık kümesi 7 alt kümeye, su muhtevası (w_o) bulanık kümesi 6 alt kümeye ve plastisite indisi (PI) bulanık kümesi de 10 alt kümeye ayrılmıştır. Bunlar Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 'de görülmektedir.



Şekil 4.2. Kuru birim hacim ağırlık alt kümeleri

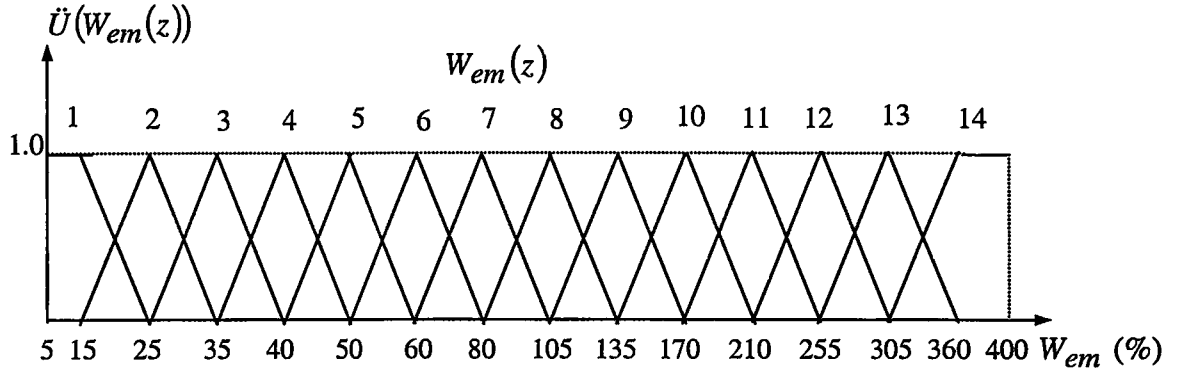


Şekil 4.3. Başlangıç su muhtevası alt kümeleri



Şekil 4.4. Plastisite indisi alt kümeleri

Bu üç bulanık kümeden emme kapasitesinin tahmin edilmesi için, emme kapasitesi değerlerinin de bulanık kümeler halinde tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 4.5 'de emme kapasitesi bulanık kümesi gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Emme kapasitesi alt kümeleri

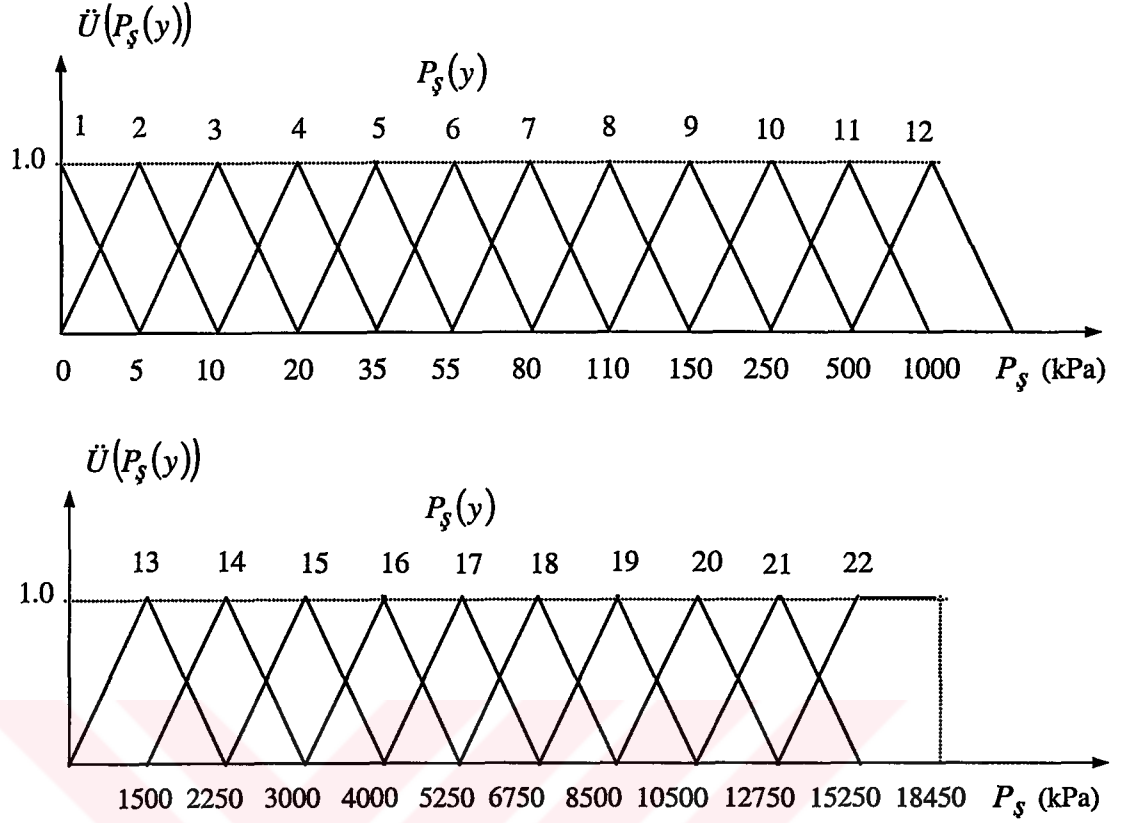
Bu üç parametrenin rastgele değerlerinde, emme kapasitesinin tahmin edilmesi için bilgisayar programına ihtiyaç duyulduğu açıktır. Bunun bir bilgisayar programıyla yapılabilmesi için bir kural tabanının oluşturulması gerekmektedir. Fortran 5.1 programlama dilinde yazılan bilgisayar programı $7 \times 6 \times 10 = 420$ adet kurala sahiptir. Bu kurallardan bir tanesi aşağıda örnek olarak verilmiştir:

IF $\gamma_k(i) = \gamma_k(3)$ and $w_o(j) = w_o(4)$ and $PI(k) = PI(5)$ THEN

$$W_{em} \text{ is } EB[W_{em}(4), W_{em}(5)] \quad (4.2)$$

Bu denklem, kuru birim hacim ağırlık değerinin 3 no'lu kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümesinde, başlangıç su muhtevası değerinin 4 no'lu su muhtevası bulanık alt kümesinde ve plastisite indisinin de 5 no'lu plastisite indisi bulanık alt kümesinde olması durumunu göstermektedir. Bu durumda, emme kapasitesi 4 ve 5 no'lu emme kapasitesi bulanık alt kümelerinden oluşmaktadır. Emme kapasitesi değerinin sayısal bir değer olarak elde edilebilmesi için, bulanık çıktının Bölüm 3.4 de verilen durulaştırma metotlarından uygun olan bir tanesi ile durulaştırılması gerekmektedir.

Benzer şekilde, bu üç bulanık kümeden (Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4) şişme basıncının tahmin edilmesi için, şişme basıncı değerlerinin de bulanık kümeler halinde tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla, Şekil 4.6 'da şişme basıncı bulanık kümesi gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Şişme basıncı alt kümeleri

Burada, $\bar{U}(P_s(y))$ şişme basıncı bulanık kümelerinin üyelik derecelerini, $P_s(y)$ şişme basıncı bulanık alt küme gruplarını ve y indisi ise, şişme basıncı bulanık kümesinin ait olduğu alt kümeyi göstermektedir.

Bu üç parametrenin rastgele değerleri için şişme basıncının tahmini olarak belirlenebildiği bir bilgisayar programı yazılmıştır. Programda kullanılan $7 \times 6 \times 10 = 420$ adet kuraldan bir tanesi aşağıda örnek olarak verilmiştir:

IF $\gamma_k(i) = \gamma_k(3)$ and $w_o(j) = w_o(4)$ and $PI(k) = PI(5)$ THEN

$$P_s \text{ is } EB[P_s(1), P_s(2), P_s(3)] \quad (4.3)$$

Bu denklem, kuru birim hacim ağırlık değerinin 3 no'lu kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümesinde, başlangıç su muhtevası değerinin 4 no'lu su muhtevası bulanık alt kümesinde ve plastisite indisinin de 5 no'lu plastisite indisi bulanık alt

kümesinde olması durumunu göstermektedir. Şişme basıncının 1, 2 ve 3 no'lu şişme basıncı bulanık alt kümelerinden oluşmaktadır. Şişme basıncı değerinin sayısal bir değer olarak elde edilebilmesi için, bulanık çıktının Bölüm 3.3.6 'da verilen durulaştırma metotlarından uygun bir tanesi ile durulaştırılması gerekmektedir.

4.3.1. Bulanık Model Kuralları

Bulanık mantık modelinin tanıtılması ve bu modelin sıkıştırılmış killerin emme kapasitelerinin ve şişme basınçlarının tahmin edilmesine uygulanması ile ilgili temel bilgilerden yukarıda bahsedilmiştir. Emme kapasitesinin tahmin edilmesi için oluşturulan bulanık model kuralları Çizelge 4.2 'de verilmiştir. Erol ve Dhowian (1990), Erol (1990a,b) ve Abduljawwad vd. (1998) çalışmalarında, sabit deformasyonlu şişme basıncı deney sonuçlarının arazideki sonuçlarla daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Şişme basınçlarının tahmin edildiği bulanık modelde, şişme basıncı alt kümeleri ve bulanık kurallar, sabit deformasyonlu şişme basıncı deneylerinden elde edilen sonuçlara göre yapılmıştır.

Bu Çizelgedeki kurallar laboratuarda ölçülmüş emme kapasiteleri değerlerine ve literatür bilgilerine dayanılarak oluşturulmuştur. Emme kapasitesi bulanık alt kümesinin oluşturulmasında; bu çalışmada yapılan 93 adet emme deneylerinin sonuçlarından ve literatürden alınan 130 adet sıkıştırılmış zeminlere ait emme kapasitesi deney verilerinden yararlanılmıştır. Şişme basıncı bulanık alt kümelerinin tespit edilmesinde ise yapılan 93 adet deney sonuçlarından ve literatürden alınan 148 adet sıkıştırılmış zeminlere ait sabit hacimli şişme basıncı deney sonuçlarından yararlanılmıştır (Keskin vd., 1992; Kanno ve Wakamatsu, 1992; Keskin vd. 1994; Kandemir ve Erol, 1996; Keskin vd., 1997, Keskin ve Çimen, 1998; Göksan, 1998, Keskin vd., 1999; Yıldırım vd., 1999; Yıldırım vd., 2000; Keskin ve Çimen, 2000; Azam ve Abduljawwad, 2000; Çokça ve Çora, 2001; Çimen ve Keskin 2001).

Çizelge 4.2. Emme kapasitesi tahmini için oluşturulmuş bulanık model kuralları

Y _k alt küme numarası	w _o alt küme numarası	PI alt küme numarası									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	4-5	5-6	6-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12	11-13	12-14
	2	3-5	4-6	5-7	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13
	3	3-4	4-5	5-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12	11-13
	4	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
	5	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12
	6	1	1-3	2-4	3-5	4-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11
2	1	3-5	4-6	5-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12	10-13	11-14
	2	3-4	4-5	5-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12	11-13
	3	2-4	3-5	4-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12	10-13
	4	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12
	5	1	1-3	2-4	3-5	4-6	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12
	6	1	1-2	1-4	2-5	3-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11
3	1	2-5	3-6	4-7	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12	9-13	10-14
	2	2-4	3-5	4-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12	10-13
	3	1-4	2-5	3-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12	9-13
	4	1-3	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12
	5	1	1-2	1-4	2-5	3-6	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12
	6	1	1	1-3	2-4	3-5	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11
4	1	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12	11-13
	2	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12	10-13
	3	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12
	4	1-2	1-3	2-4	3-5	4-6	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12
	5	1	1	1-3	2-4	3-5	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11
	6	1	1	1-2	1-4	2-5	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11
5	1	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12	10-13
	2	1-4	1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12	9-13
	3	1-2	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12
	4	1	1-2	1-4	2-5	3-6	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12
	5	1	1	1-2	1-4	2-5	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11
	6	1	1	1	1-3	1-5	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11
6	1	1-3	1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12	9-13
	2	1-2	1-4	1-6	2-7	3-8	4-9	5-10	6-11	7-12	8-13
	3	1	1-3	1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12
	4	1	1	1-3	1-5	2-6	3-8	4-9	5-10	6-11	7-12
	5	1	1	1	1-3	1-5	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11
	6	1	1	1	1-2	1-4	2-7	3-8	4-9	5-10	6-11
7	1	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12
	2	1-2	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12
	3	1	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11
	4	1	1	1-3	2-4	3-5	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11
	5	1	1	1	1-3	2-4	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10
	6	1	1	1	1-2	1-4	3-6	4-7	5-8	6-9	7-10

Çizelge 4.2, Bölüm 3.3 'de anlatılan ve Bölüm 4.3.1 'de bulanık alt kümeleri verilen kuru birim hacim ağırlık, plastisite indisi, başlangıç su muhtevası ve emme kapasitesi bulanık kümeleri kullanılarak elde edilmiştir. Çizelge 4.2 'de 7 farklı kuru birim hacim ağırlık ($9.0-21.0 \text{ kN/m}^3$), 6 farklı başlangıç su muhtevası (%0-%50) ve 10 farklı plastisite indisi (%10-%110) bulanık alt kümeleri için elde edilmiş $7 \times 6 \times 10 = 420$ adet kural mevcuttur. Emme kapasitesi bulanık kümesi ise, 14 bulanık alt kümeden ($W_{em} = \%5 - \%400$) meydana gelmiştir. Örneğin, 1 No'lu kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümesi ($\gamma_k = 9 \text{ kN/m}^3 - 11 \text{ kN/m}^3$), 3 No'lu başlangıç su muhtevası bulanık alt kümesi ($W_o = \%0 - \%20$) ve 3 No'lu plastisite indisi bulanık alt kümesi ($PI = \%20 - \%40$) kuralına göre, numunenin tahmini emme kapasitesi değeri 5 ($W_{em} = \%40 - \%60$), 6 ($W_{em} = \%50 - \%80$) ve 7 no'lu ($W_{em} = \%60 - \%105$) emme kapasitesi bulanık alt kümelerinden meydana gelmektedir. Bu kurallar ve bulanık mantık hesaplama kuralları, Fortran 5.1 programlama dilinde yazılmıştır. Buna göre, sıkıştırılmış bir kil numunesinin sahip olduğu kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine göre emme kapasitesini tahmin etmek mümkün olmaktadır. Çizelge 4.2 'deki kurallardan birkaç tanesi aşağıda örnek olarak yazılmıştır:

IF $\gamma_k(i) = \gamma_k(1)$ and $w_o(j) = w_o(1)$ and $PI(k) = PI(1)$ THEN

W_{em} is EB[$W_{em}(4), W_{em}(5)$]

and

IF $\gamma_k(i) = \gamma_k(1)$ and $w_o(j) = w_o(1)$ and $PI(k) = PI(2)$ THEN

W_{em} is EB[$W_{em}(5), W_{em}(6)$]

.....

IF $\gamma_k(i) = \gamma_k(1)$ and $w_o(j) = w_o(2)$ and $PI(k) = PI(3)$ THEN

W_{em} is EB[$W_{em}(5), W_{em}(6), W_{em}(7)$] (4.4)

Denklem 4.4 'ün ilk ifadesi, kuru birim hacim ağırlık değerinin 1 no'lu kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümesinde, başlangıç su muhtevası değerinin 1 no'lu su muhtevası bulanık alt kümesinde ve plastisite indisinin de yine 1 no'lu plastisite indisi bulanık alt kümesinde olması durumunda, emme kapasitesinin 4 ve 5 no'lu emme kapasitesi bulanık alt kümelerinden oluştuğunu göstermektedir.

Benzer şekilde; şişme basıncının tahmin edilmesi için oluşturulmuş bulanık model kuralları Çizelge 4.3. 'de verilmiştir. Bu kurallar, deneysel çalışmalardan elde edilen sabit hacimli şişme basıncı değerleri ile literatürdeki bilgilere göre oluşturulmuştur. Çizelge 4.3.'de killerin birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi değerleri için hazırlanmış, yine toplam $7 \times 6 \times 10 = 420$ adet kural mevcuttur. Bu kurallar ve bulanık mantık hesaplama kuralları, Fortran 5.1 programlama dilinde yazılarak, sıkıştırılmış bir kil numunesinin sahip olduğu kuru birim hacim ağırlığı, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine göre şişme basıncının tahmini mümkün olmaktadır.

Çizelge 4.3. Şişme basıncı tahmini için oluşturulmuş bulanık model kuralları

Y _k alt küme numarası	w _o alt küme numarası	PI alt küme numarası									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21
	2	1	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	3	1	1-4	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19
	4	1	1-3	1-5	3-6	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17
	5	1	1-2	1-3	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
	6	1	1	1-2	1-3	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14
2	1	1	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
	2	1	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21
	3	1	2-4	4-5	6-7	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	4	1	1-4	2-5	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18
	5	1	1-2	1-4	2-5	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17
	6	1	1	1-2	1-4	2-5	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15
3	1	1	6-7	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
	2	1	5-6	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21
	3	1	3-5	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20
	4	1	1-5	3-6	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19
	5	1	1-3	1-4	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17
	6	1	1-2	1-3	1-4	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15
4	1	1	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20	19-22	21-24
	2	1	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19	18-21	20-22
	3	1	3-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20	19-22
	4	1	2-4	4-6	6-7	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	5	1	1-3	2-4	4-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18
	6	1	1	1-2	2-4	4-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16
5	1	1	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22
	2	1	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-22
	3	1	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
	4	1	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21
	5	1	1-3	3-5	5-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19
	6	1	1-2	1-3	3-5	5-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17
6	1	1	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19	18-21	20-22	22
	2	1	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20	19-22	21-22
	3	1	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19	18-21	20-22
	4	1	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
	5	1	1-4	3-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20
	6	1	1-2	1-4	3-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18
7	1	1	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-22	22
	2	1	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22
	3	1	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-22
	4	1	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
	5	1	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	6	1	1-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18

Çizelge 4.3.'deki kurallardan birkaç tanesi aşağıda örnek olarak yazılmıştır:

IF $\gamma_k(i) = \gamma_k(1)$ and $w_o(j) = w_o(1)$ and $PI(k) = PI(2)$ THEN

$P_{\S}$ is $EB[P_{\S}(3), P_{\S}(4), P_{\S}(5)]$

and

IF $\gamma_k(i) = \gamma_k(1)$ and $w_o(j) = w_o(2)$ and $PI(k) = PI(2)$ THEN

$P_{\S}$ is $EB[P_{\S}(2), P_{\S}(3), P_{\S}(4)]$

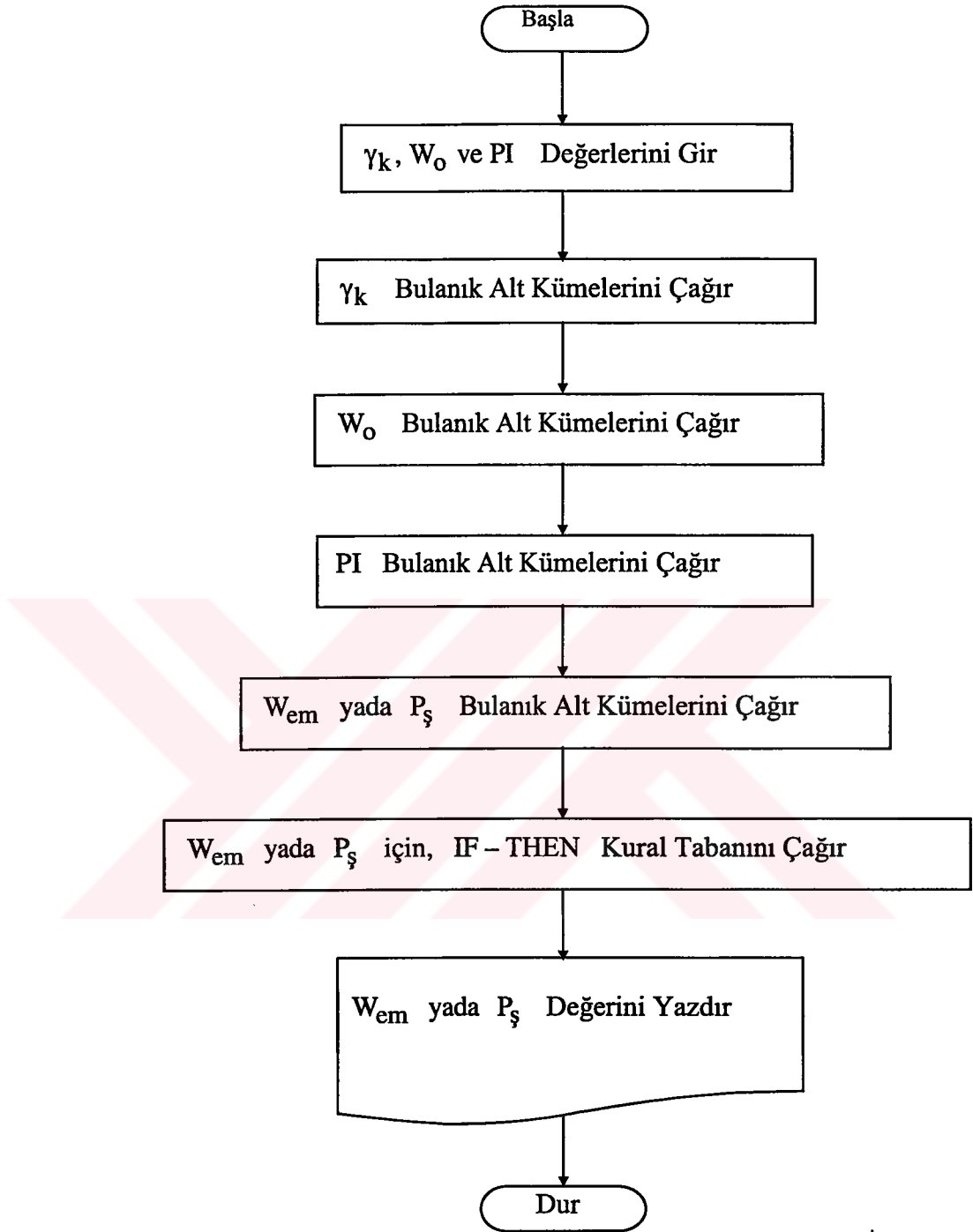
.....

IF $\gamma_k(i) = \gamma_k(1)$ and $w_o(j) = w_o(6)$ and $PI(k) = PI(5)$ THEN

$P_{\S}$ is $EB[P_{\S}(4), P_{\S}(5), P_{\S}(6)]$ (4.5)

Denklem 4.5 'in ilk ifadesi, kuru birim hacim ağırlık değerinin 1 no'lu kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümesinde, başlangıç su muhtevası değerinin 1 no'lu su muhtevası bulanık alt kümesinde ve plastisite indisinin ise 2 no'lu plastisite indisi bulanık alt kümesinde olması durumunda, şişme basıncının 3, 4 ve 5 no'lu şişme basıncı bulanık alt kümelerinden oluştuğunu göstermektedir.

Çizelge 4.2 'deki ve Çizelge 4.3 'deki bulanık kurallar Fortran 5.1 dilinde yazılarak killi zeminlerin hem emme kapasitelerinin ve hem de şişme basınçlarının tahmin edilebilmesi için iki farklı program yazılmıştır. Bilgisayar programlarında, sıkıştırılmış bir kilin kuru birim hacim ağırlığı, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi değerleri girildiğinde kısa bir zamanda (10-15 sn içerisinde) emme kapasitesi ve şişme basıncı tahmin edilebilmektedir. Bulanık modellerden belirlenmiş emme kapasitesi ve şişme basıncı değerleri Çizelge 4.4 'de verilmiştir. Hazırlanan programlar Ek 2 ve Ek 3 'de verilmiştir. Hazırlanan programların akış şeması ise Şekil 4.7 'de görülmektedir.



Şekil 4.7. Sıkıştırılmış killi zeminlerin emme kapasitesi ve şişme basınçlarının tahmini için Fortran 5.1 dilinde yazılmış programların akış şeması

4.4. Deney Sonuçları İle Bulanık Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sıkıştırılmış bir kilin emme kapasitesinin ve şişme basıncının tahmin edilmesi için oluşturulmuş bulanık modelden elde edilen tahmini emme kapasitesi ve şişme basıncı değerleri, deneylerden elde edilen emme kapasitesi ve şişme basıncı değerleri ve model ile deney sonuçları arasındaki hata miktarları Çizelge 4.4 'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 'de gösterilen hata miktarları, Denklem 4.6 ve Denklem 4.7 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Hata(emme)} = \frac{W_{em}^* - W_{em}}{W_{em}} \quad (%) \quad (4.6)$$

$$\text{Hata(şişme)} = \frac{P_{ş}^* - P_{ş}}{P_{ş}} \quad (%) \quad (4.7)$$

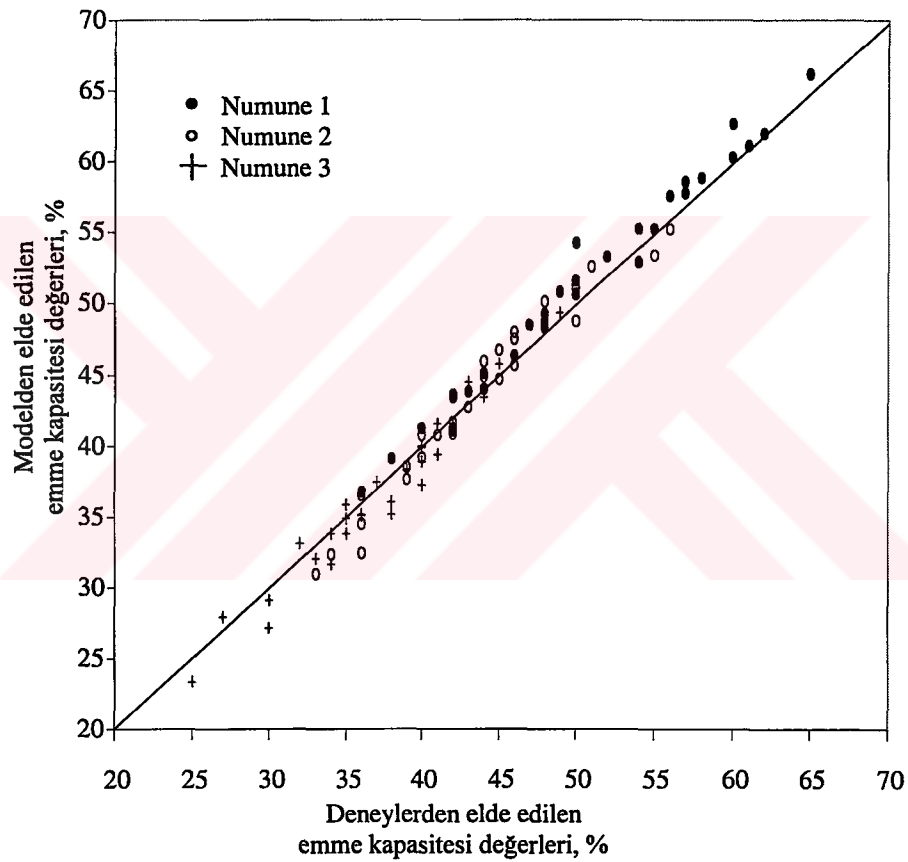
Burada, W_{em}^* ve $P_{ş}^*$, bulanık mantık modelinden elde edilen emme kapasitesi ve sabit hacimli şişme basıncı değerlerini, W_{em} ve $P_{ş}$ ise, deneysel çalışmalardan elde edilen emme kapasitesi ve şişme basıncı değerlerini göstermektedir.

Emme kapasitesi tahminlerinde maksimum hata miktarı $\pm\%10$ (yüksek başlangıç su muhtevası değerlerinde), ortalama hata miktarı ise $\pm\%2.69$ olarak tespit edilmiştir. Şişme basıncı tahminlerinde ise maksimum hata miktarı $\pm\%39.17$ (yüksek başlangıç su muhtevası değerlerinde), ortalama hata miktarı ise $\pm\%9.73$ olarak bulunmuştur.

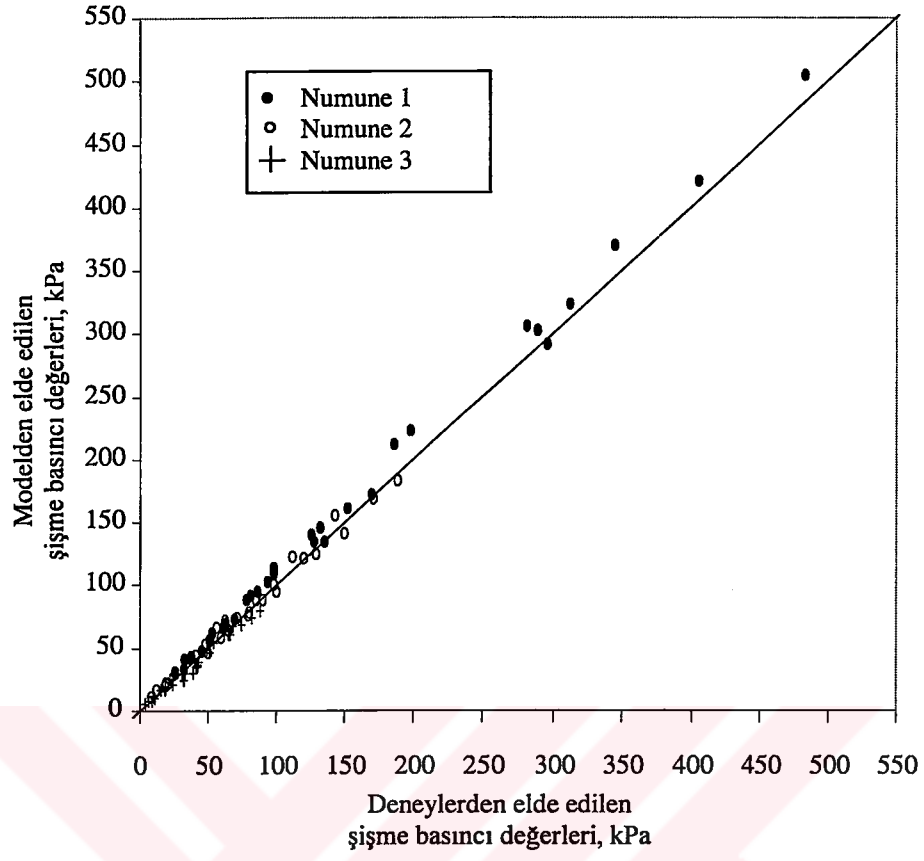
Çizelge 4.4. Deney sonuçları, bulanık modelden tahmin edilen sonuçlar ve hata miktarları

γ_k kN/m ³	Wo %	Numune 1					Numune 2					Numune 3				
		W _{em} %	W [*] _{em} %	Hata (Em) %	P _ş kPa	P [*] _ş kPa	Hata (Şiş) %	W _{em} %	W [*] _{em} %	Hata (Em) %	P _ş kPa	P [*] _ş kPa	Hata (Em) %	P _ş kPa	P [*] _ş kPa	Hata (Şiş) %
11.5	15	65	66.2	1.85	126	140.6	11.59	56	55.2	-1.43	79	76.1	-3.67	42	36.2	-13.81
	20	60	62.7	4.50	98	108.0	10.2	55	53.4	-2.91	65	64.3	-1.08	33	29.4	-10.91
	25	58	58.8	1.38	86	95.4	10.93	50	48.8	-2.40	50	46.7	-6.60	24	20.5	-14.58
	30	50	54.2	8.40	53	58.5	10.38	46	45.6	-0.87	26	30.7	18.08	18	16.6	-7.78
	35	48	49.3	2.71	33	41.1	24.55	42	40.8	-2.86	19	22.5	18.42	10	11.5	15.00
13.0	40	44	44.0	0.00	26	30.3	16.54	40	39.2	-2.00	8	10.7	33.75	4	5.5	37.50
	15	62	62.0	0.00	152	161.0	5.92	51	52.6	3.14	90	88.1	-2.11	45	46.9	-8.04
	20	57	58.6	2.81	135	134.6	-0.30	50	51.0	2.00	80	77.9	-2.62	43	38.9	-9.53
	25	55	55.2	0.36	98	106.0	8.20	45	46.7	3.78	59	58.7	-0.51	39	29.5	-24.36
	30	49	50.8	3.67	63	69.5	10.32	42	43.6	3.81	38	42.7	12.37	22	25.8	17.27
14.0	35	46	46.3	0.65	51	56.0	9.80	41	40.7	-0.73	26	29.6	13.85	10	12.3	23.00
	40	42	41.0	-2.38	32	33.5	4.69	39	38.5	-1.28	12	16.7	39.17	6	7.8	30.00
	15	61	61.1	0.16	281	306.0	8.90	50	51.3	2.60	120	121.9	1.58	42	67.6	-0.59
	20	56	57.6	2.86	198	219.0	10.60	48	48.7	1.46	100	94.5	-5.50	41	53.7	-0.56
	25	54	52.9	-2.04	132	145.6	10.30	45	44.7	-0.67	71	73.7	3.80	54	35.5	-15.48
15.0	30	48	48.3	0.62	78	85.1	8.97	42	40.8	-2.86	48	52.9	10.21	36	29.3	-5.48
	35	43	43.8	1.86	61	66.0	8.20	39	37.6	-3.59	26	29.5	13.46	15	16.7	11.33
	40	42	41.2	-1.9	37	41.7	12.70	36	32.4	-10.00	18	20.1	11.67	9	8.1	-10.00
	15	60	60.3	0.50	345	370.1	7.28	48	50.1	4.38	143	155.8	8.95	74	68.3	-7.70
	20	52	55.3	2.50	296	291.7	-1.45	46	47.5	3.26	112	122.2	9.11	65	60.5	-6.92
16.0	25	50	50.6	1.20	170	172.6	-1.53	43	42.7	-0.70	85	88.7	4.35	51	46.5	-8.82
	30	44	45.0	2.27	94	102.7	9.26	40	39.2	-2.00	56	62.1	10.2	40	38.5	-3.75
	35	40	41.2	3.00	69	73.2	6.09	36	34.5	-4.17	38	43.5	14.47	19	18.0	-5.26
	40	36	36.7	1.94	45	47.6	5.78	33	31.0	-6.06	21	22.6	7.62	11	9.9	-10.00
	15	57	57.8	1.40	405	420.3	3.78	46	48.0	4.35	171	169.5	-0.88	82	74.0	-9.76
17.0	20	50	51.6	3.20	289	302.2	4.57	44	44.9	2.05	129	124.8	-3.26	66	60.8	-7.88
	25	47	48.5	3.19	186	203.6	9.10	40	40.7	1.35	98	100.0	2.04	49	48.2	-1.63
	30	42	43.4	3.33	128	135.0	5.47	36	36.5	1.39	62	68.3	9.70	41	35.5	-13.41
	35	38	39.1	2.89	81	87.2	7.65	34	32.3	-5.00	41	44.1	7.56	32	23.8	-25.63
	15	54	55.2	2.22	483	504.7	4.49	44	45.9	4.32	189	183.2	-3.07	88	79.8	-9.32
	20	48	48.8	1.67	312	324.1	3.88	42	41.6	-0.95	150	141.4	-5.73	72	71.1	-1.25

Bulanık modelden elde edilen tahmini emme kapasitesi değerleri ile deneylerden elde edilen emme kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması, ayrıca Şekil 4.8 'de grafik olarak ta gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, bulanık modelden elde edilen tahmini emme kapasitesi değerleri ile deneylerden elde edilen emme kapasitesi değerleri uyum içerisindedir. Benzer karşılaştırma, şişme basıncı değerleri için de yapılmış ve Şekil 4.9 'da verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere, bulanık modelden elde edilen tahmini şişme basıncı değerleri ile deneylerden elde edilen şişme basıncı değerleri yine uyum içerisindedir.



Şekil 4.8. Deneylerden elde edilen emme kapasitesi değerleri ile bulanık mantık modelinden elde edilen emme kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.9. Deneylerden elde edilen şişme basıncı değerleri ile bulanık mantık modelinden elde edilen şişme basıncı değerlerinin karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, killi zeminlerin emme kapasitelerinin ve şişme basınçlarının bulanık mantık yöntemi kullanılarak tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Killi zeminlerin emme ve şişme davranışları üzerinde zemin cinsi, mineralojik yapısı, kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası, doygunluk derecesi, permeabilite, tabii veya sıkıştırılmış zemin olması, gerilme tarihçesi gibi birçok parametre etkili olmaktadır. Çalışmada, emme kapasitesi ve şişme basıncı değerinin tahmininde, bu parametrelerden; kilin plastisite indisi, kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevası gibi etkenler dikkate alınmıştır. Farklı plastisite indisine sahip kil numuneleri, farklı kuru birim hacim ağırlıkta ve farklı başlangıç su muhtevasında olacak şekilde kompaksiyonla hazırlanmışlardır. Bu numuneler üzerinde, ödometre deney sistemi kullanılarak emme kapasitesi ve şişme deneyleri yapılmıştır.

Daha sonra, emme kapasitesinin ve şişme basıncının tahmin edilebilmesi için, mühendislik çalışmalarında yeni ve kolay uygulanabilir bir yöntem olan, bulanık mantık metodu kullanılmıştır. Bulanık mantık metodunda girdi olarak; plastisite indisi, kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevası bulanık alt kümeleri kullanılmıştır. Bu amaçla; killerin plastisite indisi, kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevası değerleri alt gruplara ayrılmış ve bunlara bulanık alt kümeler denilmiştir. Bu alt kümelerin bulanık mantık metoduna girdi olarak alınması, emme kapasitesi ve şişme basıncı bulanık alt kümelerinin ise çıktı olarak elde edilmesi düşünülmüştür. Emme kapasitesi ve şişme basıncı bulanık alt kümeleri de bu çalışmadaki deneylerden elde edilen ve literatürden alınan sonuçlardan yararlanılarak oluşturulmuştur. Bulanık kümeler arasındaki girdi ve çıktı ilişkileri, hem emme kapasitesi hem de şişme basıncı tahminleri için ayrı ayrı olmak üzere, 420 'şer adet bulanık kuraldan oluşmaktadır. Sonunda, girdi ve çıktı alt kümeleri ile bulanık kurallar Fortran 5.1 programlama dilinde yazılmış ve bir kilin emme kapasitesinin ve şişme basıncının tahmini, kısa bir süre (yaklaşık 10-15sn) içerisinde yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Çalışmada incelenen kil numunelerinin üçü de Bileştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre CH sınıfına girmektedir.

2. Kil numuneleri üzerinde X-Ray analizleri yapılmış ve numunelerde hakim olan kil minerallerinin çokluk sırasına göre dizilişi elde edilmiştir. Buna göre; 1 No'lu numune, smektit + klorit, kuvars, kalsit, feldispat ve illit; 2 No'lu numune, smektit + klorit, kuvars, feldispat ve kalsit; 3 No'lu numune, smektit + klorit, kalsit, illit ve kuvars şeklinde dizilmektedir.

3. Sıkıştırılmış zeminlerin emme kapasiteleri ve şişme basınçları üzerinde plastisite indisi, başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık oldukça etkilidir.

4. Yapılan emme kapasitesi deneylerinden, sabit su muhtevasında ve sabit kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış zeminlerin plastisite indisleri arttıkça emme kapasitesi değerleri de artmıştır. Sabit kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış numunelerde, başlangıç su muhtevasının artmasıyla emme kapasitesinin azaldığı görülmüştür. Aynı başlangıç su muhtevasında, fakat farklı kuru birim hacim ağırlıklarda sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılan emme kapasitesi deney sonuçlarına göre, kuru birim hacim ağırlığın artmasıyla emme kapasitesi değerinin azaldığı belirlenmiştir.

5. Yapılan şişme deneylerinden, sabit su muhtevasında ve sabit kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış zeminlerin plastisite indisi arttıkça, zeminin şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinin de arttığı görülmüştür. Sabit kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış numunelerde ise, başlangıç su muhtevasının artmasıyla şişme basıncının ve şişme yüzdesinin azaldığı görülmüştür. Aynı su muhtevasında, fakat farklı kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılan şişme basıncı deney sonuçlarına göre, kuru birim hacim ağırlığın artmasıyla şişme basıncının ve şişme yüzdesinin arttığı belirlenmiştir.

6. Sabit başlangıç su muhtevasında, farklı kuru birim hacim ağırlıklı numunelerin emme kapasitesi değerleri arttıkça şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri azalmaktadır.

7. Farklı başlangıç su muhtevaları ve farklı plastisite indislerine göre emme kapasitesi ile şişme basıncı arasında nonlineer doğrusal bir ilişki vardır ve bu ilişkiler kuru birim hacim ağırlığına bağlı olarak değişmektedir.

8. Yapılan sabit deformasyonlu ve serbest şişme deneylerinden elde edilen şişme basınçları değerlerinin birbirinden farklı çıktığı ve serbest şişme basınçlarının sabit deformasyonlu şişme basınçlarından yüksek olduğu görülmüştür. Serbest şişme basıncı değerleri ile sabit deformasyonlu şişme basıncı değerleri arasında üstel bir ilişki elde edilmiştir.

9. Emme kapasitesi deneylerinden ve bulanık mantık modelinden elde edilen emme kapasitesi değerleri karşılaştırılmış; sonuçların uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Emme kapasitesinin tahmininde maksimum hata miktarı $\pm\%10$, ortalama hata miktarı ise $\pm\%2.69$ olarak elde edilmiştir. Şişme basıncının 40 kPa 'ın üzerinde olduğu durumlarda, bulanık mantık modelinden elde edilen şişme basınçları ile deneysel sonuçlar arasındaki maksimum hata miktarı $\pm\%10$ dolaylarındayken, daha düşük şişme basıncı değerlerinde maksimum hata miktarının $\pm\%30$ 'un üzerine çıktığı görülmüştür. Şişme basıncı tahmininde ortalama hata miktarı ise $\pm\%9.73$ olarak elde edilmiştir. Başlangıç su muhtevasının yüksek olması halinde zeminin doygunluk derecesi artmakta, şişme ve emme miktarı azalmakta, dolayısıyla bu durumlarda yöntem uygun olmamaktadır.

10. Emme kapasitesi ve şişme basıncı deneyleri oldukça uzun zaman alan deneylerdir. Bu çalışmada; sıkıştırılmış killi zeminlerin emme kapasitesi değerinin tahmin edilmesinde bulanık mantık metodunun kullanılabilirliği görülmüş, şişme basıncının tahmininde ise 40 kPa 'ın üzerinde şişmenin olduğu durumlarda bulanık mantık modelinin kullanılabileceği, daha düşük şişme potansiyeline sahip zeminlerde ise başarılı sonuçlara ulaşamadığı görülmüştür. Bulanık mantık metodu kullanılarak geliştirilen programın, çok kısa bir sürede sonuç verme avantajıyla, özellikle emme kapasitesi değerleri ile yüksek şişme potansiyelli zeminlerin şişme basıncı değerlerinin tespitinde kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abduljawwad, S.N., Al-Sulaimani, G.J., Basunbul, I.A., Al-Buraim, I., (1998). Laboratory and field studies of response of structures to heave of expansive clay, *Geotechnique*, 48(1), 103-121.
- Aitchison, G.D., (1961). Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils, in pore pressure and suction in soils Conf., organized by British Nat. Soc. of Int. Soc. Soil Mech. Found. Eng. At Inst. Civil Eng. London, 47-52.
- Aitchison, G.D., (1965). Soil properties, shear strength and consolidation, in Proc. 6 th Int.Conf. Soil Mech. Found. Eng., Canada, Vol.3, 318-321.
- Altmeyer, W.T., (1955). Discussion of engineering properties of expansive clays, *Proc.Am Soc. Civil Eng.*, 81,17-19.
- Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A., (1990). A Constitutive model for partially saturated soils, 40(3), 405-430.
- ASTM, D4546, (1986). Standart Test Methods for one Dimensional Swell or Settlement Potential of Cheshire Soils, *Annual Book of ASTM Standarts*, 4(8), 992-1100.
- Aytekin, M., (1995). Zemin emme basıncı zarflarının belirlenmesi, *İMO Teknik Dergi*, 6(2), 937-945.
- Aytekin, M., Şenol, A., (2000). Finite element modelling of swelling behaviour of soils, *Advences in Civil Engineering 4 th. International Congres*, 3, 1353-1362.
- Azam, S., Abduljawwad, S.N., (2000). Influence of gypsification on engineering behavior of expansive clay, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6), 538-542.
- Basma, A.A., Al-Homoud, A.S., Malkawi, A.I.H., Al-Bashabsheh, M.A., 1996, Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays, *Applied clay science*, 11, 211-227.
- Bear, J., (1979). *Hydraulics of Groundwater*, Mcgraw Hill, New York, 569 p.
- Bekkouche, A., Djedid, A., Aissa Mamoune, S.M., (2000). An experimental investigation on the assessment of the swelling pressure, *Advences in Civil Engineering 4 th. International Congres*, 3, 715-720.
- Bishop, A.W., (1959). The principal of effective stress, lecture delivered in Oslo, Norway, published in *Technisk Ukeblad*, Vol.106, no.39, 859-863.

- Bishop, A.W., Blight, G.E., (1963). Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils, *Geotechnique*, Vol. 13, no.3, 177-197.
- Blight, G.E., (1961). Strength and Consolidation Characteristics of Compacted Soils, Ph.D. dissertation, Univ. of London, London, England, 217 p.
- Bolzon, G., Schrefler, B.A., Zienkiewicz, O.C., (1996). Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states, *Geotechnique*, 46(2), 279-289.
- Bortolan, G., Degani, R., (1985). A review of some methods for ranking fuzzy subsets, *Fuzzy Sets Syst.*, 15, 1-9.
- Brady, K.C., (1988). Soil suction and the critical state, *Geotechnique*, 38, 1, 117-120.
- Bumat, (2001). Bulanık küme, sistem ve teknolojisi, İTÜ Bulanık Mantık ve Teknolojisi (Bumat) Bülteni, sayı 1, 8-9.
- Buckingham, E., (1907). Studies of the movement of soil moisture, U.S.D.A. Bur. of soils, Bulletin no.38.
- Chen, F.H., (1965). The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soil, *Concluding Proc. Eng. Effects of Moisture Changes in Soils, Int. Res. Eng. Conf. Expansive Clay Soils, Supplementing the Symposium in Print, Texas A&M Press*, 152-171.
- Chen, F.H., (1988). *Foundations on Expansive Soil*, American Elsevier Science Publ., New York, 280p.
- Christian, J.T., Baecher, G.B., (1999). Point-estimate method as numerical quadrature, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(9), 779-786.
- Conciani, W., Hermann, P.S., Soares, M.M., (1996). The time domain reflectometry to study matrix suction, *Proceedings of the first international conference on unsaturated soils / Unsat'95 / Paris / France / 6-8 September 1995*, 3, Presses Del L'ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees, 1481-1486.
- Croney, D., Coleman, J.D., (1954). Soil structure in relation to soil suction (pF), *J. Soil Sci.*, 5, 1, 75-84.
- Croney, D., Coleman, J.D., Black, W.P.M., (1958). Movement and Distribution of Water in Soil in Relation to Highway Design and Performance, *Water and Its Conduction in Soils, Highway Res. Board, Special Report*, Washington DC, no. 40, 226-252.
- Croney, D., (1977). *The Design and Performance of Road Pavements*, Her Majesty's Stationery Office, London, 120 p.

- Çimen, Ö., Keskin, S.N., (2001). Emme kapasitesinin zamana bağlı ilerleyişinin bulanık mantıkla belirlenmesi, Mühendislikte Modern Yöntemler Sempozyumu, İstanbul, 64-71.
- Çokça, E., Birand, A., (1992). Killi zeminlerde büzülme ve şişme etkisiyle meydana gelen çatlak ve fisürler, , Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, İstanbul, 1-13.
- Çokça, E., Çora, Ö., (2001). Sıkıştırılmış doygum olmayan ODTÜ kampüs kilinin hacim değiştirme özellikleri, 10. Ulusal Kil Sempozyumu, 19-22 Eylül, Konya, 371-378.
- Daniel, D.E., (1983). Permeability test for unsaturated soil, Geotech. Testing J.(ASTM), 6(2), 81-86.
- Davies, J.T., Rideal, E.K., (1963). Interfacial Phenomena, 2nd ed. New York, 747 p.
- Day, R.W., (1994). Swell-shrink behavior of compacted clay, J. Geotech. Engineering, 120(3), 618-623.
- Day, R.W., Marsh, E.T., (1995). Triaxial a-value versus swell or collapse for compacted soil, J. Geotech. And Geoenv. Engineering, 121(7), 566-570.
- Delage, P., Graham, J., (1996). Mechanical behaviour of unsaturated soils: Understanding the behaviour of unsaturated soils requires reliable conceptual models, Proceedings of the first international conference on unsaturated soils / Unsat'95 / Paris / France / 6-8 September 1995, 3, Presses Del L'ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees, 1223-1256.
- Edlefsen, N.E., Anderson, A.B.C., (1943). Thermodynamics of soil moisture, Hilgardia, 15, 31-298.
- Ellis, G.W., Yao, C., Zhao, R., Penumadu, D., (1995). Stress-Strain Modeling of Sands Using Artificial Neural Networks, J. Geotechnical Engineering, 121(5), 429-435.
- El-Sohby, M.A., Rabba, E.A., (1981). Some factors affecting swelling of clayey soils, Geotech. Engineering, 12, 19-39.
- Erol, O., (1990a). Gerçek kabarmaların şişme- ödometre metodu ile karşılaştırılması, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 3. Ulusal Kongresi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 1-8.
- Erol, O., (1990b). Emme basıncı yöntemi ile şişme değeri tayini, T.M.M.O.B. İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi, 1(2), 99-105.
- Erol, O., Dhowian, A.W., (1990). Swell behaviour of arid climate shales from Saudi Arabia, Quaterly journal of Engr. Geology, 23, 243-254.

- Escario, V., (1980). Suction controlled penetration and shear tests, Proceedings of the international conference on expansive soils, vol.2, Denver, Colorado, 781-797.
- Fenton, G.A., (1999a). Estimation for stochastic soil models, J.Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(6),470-485.
- Fenton, G.A., (1999b). Random field modeling of CPT data, J.Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(6) ,486-498.
- Fleureau, J.M., Saoud, S.K., Soemitro, R., Taibi, S., (1993). Behaviour of clayey soils on drying- wetting paths, Can. Geotech. J. 30, 287-296.
- Fourie, A.B., Rowe, D., Blight, G.E., (1999). The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump, Geotechnique, 49(1), 1-13.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., (1977). Stress state variables for unsaturated soils, ASCE J. Geotech. Eng. Div. GT5, 103, 447-466.
- Fredlund, D.G., Xing, A., (1994). Equations for the soil-water characteristic curve, Can. Geotech., 31, 521-532.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons. Inc., New York, 517 p.
- Gadre, A.D., Chandrasekaran, V.S., (1994). Swelling of black cotton soil using centrifuge modeling, J. Geotech. Engineering, 120(5), 914-919.
- Gardner, W., Widtsoe, J.A., (1921). The movement of soil moisture, Soil Sci., 11, 215-232.
- Goh, A.T.C., (1994). Seismic liquefaction potential assessed by neural networks, J. Geotechnical Engineering, 120(9), 1467-1480.
- Goh, A.T.C., (1996a). Neural-network modeling of CPT seismic liquefaction data, J. Geotechnical Engineering, 122(1), 70-73.
- Goh, A.T.C., (1996b). Pile driving records reanalyzed using neural networks, J. Geotechnical Engineering, 122(6), 492-495.
- Göksan, T.S., (1998). Killi Zeminlerde Emme Kapasitesi ve Şişme Basıncı Arasındaki İlişki, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 55 s.
- Grim, R.E., (1962). Applied Clay Mineralogy, Mc Graw-Hill, New York, 422p.
- Guan, Y., Fredlund, D.G., (1997). Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction, Can. Geotech.J., 34, 604-614.

- Hamilton, J.M., Daniel, D.E., Olson, R.e., (1981). Measurements of hydraulic conductivity of partially saturated soils, in permeability and groundwater contaminant transport, ASTM, Special Tech. Publ. 746, 182-196.
- Hines, J.W., (1997). Matlab Supplement to Fuzzy and Neural Approaches in Engineering, John Wiley & Sons Inc., New York, 210 p.
- Ho, D.Y.F., Fredlund, D.G., Rahardjo, H., (1992). Volume change indices during loading and unloading of an unsaturated soils, Can. Geotech.J., 29, 195-207.
- Holtz, W.G., (1959). Expansive clays- properties and problems, in teoretical and practical treatment of expansive soils, 1th Conf. Mech.Soils, Golden, vol.54, no.4, 89-117.
- Holtz, W.G., Gibbs, H.J., (1956). Engineering properties of expansive clays, Trans.ASCE, 121, 641-663.
- Holland, J.E., Lawrence, C.E., (1980). Seasonal heave of Australian clay soil, Proc. 4th Int.Conf. Expansive Soils, Denver, CO 1, 302-321.
- Jennings, J.E., (1961). A revised effective stress law for use in the prediction of the behavior of unsaturated soils, in pore pressure and suction in soils, conf.organizedby the British Nat.Soc. of Int. Soc.Soil Mech. Found. Eng. at the Inst. Of Civil Eng.London, 26-30.
- Jimenez- Salas, J.A., (1996). Foundation and pavements on unsaturated soils-part two=Expansive clays, Proceedings of the first international conference on unsaturated soils / Unsat'95 / Paris / France / 6-8 September 1995, 3, Presses Del L'ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees, 1441-1464.
- Jo, H. Y., Katsumi, T., Benson, C. H., Edil, T. B., (2001). Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(7), 557-567.
- Jones, D.E., Holtz, W.G., (1973). Expansive soils - the hidden disaster, Civil Eng., ASCE, 43(8), 49-51.
- Juang C.H., Wey, J.L., Elton, D.J., (1991). Model for capacity of single piles in sand using Fuzzy sets, J. Geotechnical Engineering, 17(12), 1920-1931.
- Juang, C.H., Lee, D.H., Sheu, C., (1992). Mapping slope failure potential using Fuzzy sets, J. Geotechnical Engineering, 118(3), 475-494.

- Juang, C.H., Huang, X.H., Holtz, R.D., Chen J.W., (1996). Determination relative density of sands from CPT using Fuzzy sets, J. Geotechnical Engineering, 122(1), 1-6.
- Juca, J.F.T., Escario,V.,(1991). Variation of the modulus of determination of unsaturated soils with suction, Proceeding of the tenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence, 121-124.
- Juca, J.F.T., Frydman, S., (1996). Experimental techniques, Proceedings of the first international conference on unsaturated soils / Unsat'95 / Paris / France / 6-8 September 1995, 3, Presses Del L'ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees, 1257-1292.
- Kandemir, A., Erol, O., (1996). Emme basıncı- şişme parametreleri ilişkileri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 98-107.
- Kanno, T., Wakamatsu, H., (1992). Water uptake and swelling properties of unsaturated bentonite buffer materials, Can.Geotech.J., 29, 1102-1106.
- Kassif, G., Baker, R., (1971). Aging effect on swell potential of Compacted clays, , J. Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97, SM3.
- Keskin, S.N., (1989). Killerin Kıvam Limitlerine Etkiyen Faktörlerin Araştırılması, İTÜ Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 105 p.
- Keskin, S.N., (1993). İstanbul Neojen Kilinin Şişme Davranışlarına, Ön Konsolidasyonun, Minerolojik özelliklerin ve Çevresel Faktörlerin Etkisi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 152 p.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Ansal, M.A., (1992). Killi zeminlerde yanal şişme davranışları, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, İstanbul, 14-30.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H.,Acar, C., Ülker, R., Ansal, M.A., (1994). Aşırı konsolidasyon oranının zeminlerin şişme davranışına etkisi, , Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, O.D.T.Ü., Ankara, 70-76.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Göksan, T.S., (1997). Killi zeminlerde su emme kapasitesi- şişme basıncı ilişkisi, 8. Ulusal Kil Sempozyumu, D.P.Ü., Kütahya, 423-427.
- Keskin, S.N., Çimen, Ö., (1998). Killi zeminlerde minerolojik yapının şişme davranışına etkisi, Su Yapılarında Karşılaşılan Zemin Mekaniği Problemleri Semineri, D.S.İ. T.A.K.K. Dairesi Başkanlığı, Balıkesir,17-20.

- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Göksan, T.S., (1998a). Zeminlerin su emme kapasitesinin deneysel olarak incelenmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi, 61-68.
- Keskin, S.N., Çimen, Ö., Yıldırım, H., (1998b). Zeminlerde emme ve şişme özellikleri ile elektriksel çift tabaka ve minerolojik yapı arasındaki ilişki, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi, 164-170.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Göksan, T.S., (1999). Sıkıştırılmış killi zeminlerde su emme kapasitesinin ve şişme basıncının tahmini için bir yöntem, T.M.M.O.B. İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi, 10(2), 1925-1939.
- Keskin, S.N., Çimen, Ö., (2000). Kıvam limitleri değerlerinden yararlanarak killi zeminlerde emme kapasitesi ve şişme basıncı tahmini, Advances in Civil Engineering 4 th. International Congress, 3, 1089-1096.
- Keskin, S.N., Çimen, Ö., Yıldırım, H., (2000). A determination to suction capacity of clay with an empirical method, Proceedings of The First International Conference on Geotechnical Engineering Education and Training, Romania, 12-14 June 2000, 421-424.
- Khalili, N., Khabbaz, M.H., (1998). A unique relationship for χ the determination of the shear strength of unsaturated soils, Geotechnique, 48(5), 681-687.
- Kohgo, Y., Nakano, M., Miyazaki, T., (1993a). Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils, Soils and Foundations, 33(4), 49-63.
- Kohgo, Y., Nakano, M., Miyazaki, T., (1993b). Verification of the generalized elastoplastic model for unsaturated soils, Soils and Foundations, 33(4), 64-73.
- Koorevaar, P., Menelik, G., Dirksen, C., (1983). Elements of Soil Physics, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 228 p.
- Komine, H., Ogata, N., (1994). Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, Can. Geotech. J., 31, 478-490.
- Komine, H., Ogata, N., (1996). Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, Can. Geotech. J., 33, 11-22.
- Komine, H., Ogata, N., (1999). Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal, Soils and Foundations, 39(2), 83-97.
- Krahn, J. and Fredlund, D.G., (1972). On total matric and osmotic suction, J. Soil Sci., 114(5), 339-348.

- Lambe, T.W., (1958). The engineering behavior of compacted clay, ASCE J. Soil Mech., Found. Div., vol. 84, SM2, No. 1655, 1-35.
- Larsen, P.M., (1980). Industrial applications of fuzzy logic control, International J. Man-Machine Studies, 12(1), 3-10.
- Lee, C.C., (1990a). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller- part 1, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 20(2), 404-418.
- Lee, C.C., (1990b). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller- part 2, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 20(2), 419-435.
- Lim, T.T., Rahardjo, H., Chang, M.F., Fredlund, D.G., (1996). Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope, Can. Geotech.J., 33, 618-628.
- Lin, L., Benson, C.H., (2000). Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs, J. Geotech. And Geoenv. Engineering, 126(1), 40-49.
- Lloret, A., Alonso, E.E., (1980). Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behavior, Geotechnique, 30(4), 449-477.
- Mamdani, E.H., (1977). Applications of Fuzzy set theory to control systems: A survey, In Fuzzy Automata and Decision Processes, M.M. Gupta, G.N. Saridis and B.R. Gaines, eds., North-Holland, New York, 1-13.
- Marinho, F.A.M. and Pinto, C.S., (2000). Use of liquid limit state to generalize water retention properties of fine-grained soils-Comment, Geotechnique, 50(3), 295-296.
- Marinho, F.A.M., Pinto, C.S., (2000). Discussion: Use of liquid limit state to generalize water retention properties of fine- grained soils, Geotechnique, 50(3), 295-296.
- Mashour, M.M., Ibrahim, M.I., El-Emam, M.M., (1996). Variation of unsaturated soil shear strength paramaters with suction, Proceedings of the first international conference on unsaturated soils / Unsat'95 / Paris / France / 6-8 September 1995, 3, Presses Del L'ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees, 1487-1493.
- Mayne, P.W., (1980). Cam-clay predictions of undrained strength, J.Geotechnical Engineering, 106, GT11, 1219-1242.
- Mesri, G., Pakbaz, M.C., Cepeda-Diaz, A.F., (1994). Meaning, measurement and field application of swelling pressure of clay shales, Geotechnique, 44(1), 129-145.

- Mitchell, J.K., (1976). Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc., 422 p.
- Nawari, N.O., Liang, R., (2000). Fuzzy-based approach for determination of characteristic values of measured geotechnical parameters, *Can. Geotech. J.*, 37, 1131-1140.
- Nelson, J.D. and Miller, D.J., (1992). Expansive Soils Problem and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Wiley & Sons, 253 p.
- Ng, C.W.W., Pang, Y.W., (2000a). Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability, *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(2), 157-166.
- Ng, C.W.W., Pang, Y.W., (2000b). Experimental investigations of the soil- water characteristics of a volcanic soil, *Can. Geotech.J.*, 37, 1252-1264.
- Pachepsky, Y.A., Scherbakov, R.A., (1984). Determination of capillary hydraulic conductivity of soils and its dependence on suction, *J. Hydrology*, 69, 287-296.
- Rao, S. M., Revanasiddappa, K., (2000). Role of matric suction in collapse of compacted clay soil, *J. Geotech. And Geoenv. Engineering*, 126(1), 85-90.
- Rassam, D.W., Williams, D.J., (1999). Bearing capacity of desiccated tailings, *J. Geotech. And Geoenv. Engineering*, 125(7), 600-609.
- Raman, V., (1967). Identification of expansive soils from the plasticity index and the shrinkage index data, *Indian Eng.*, 11(1), 17-22.
- Reddi, L.N., Poduri, R., (1997). Use of liquid limit state to generalize water retention properties of fine- grained soils, *Geotechnique*, 47(5), 1043-1049.
- Richards, S.S., (1965). Soil suction measurements with tensiometers, *Methods of soil Analysis*, C.A., Agronomy, 9, 153-163.
- Richards, B.G., (1966). The significance of moisture flow and equilibria in unsaturated soils in relation to the design of engineering structures of built on shallow foundations in Australia, *Symp. Permeability Capilarity*, ASTM, Atlantic City.
- Ridley, A.M., Burland, J.B., (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction, *Geotechnique*, 43(2), 321-324.
- Sattler, P., Fredlund, D.G., (1989). Use of thermal conductivity sensors to measure matric suction in the laboratory, *Can. Geotech. J.*, 26, 491-498.

- Schofield, A.N., Wroth, C.P., (1968). Critical States Mechanics, McGraw Hill, London, 374 p.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., Lundgren, R., (1962). Prediction of Swelling potential for compacted clays, J. Soil Mechanics and Foundations Division, asce, 88, SM4, 107-131.
- Sezen, A., Ansal, M.A., (1993). Killi Zeminlerin İstatistiksel Analizi, 6. Ulusal Kil Sempozyumu, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 345-356.
- Shahu, J.T., Yudhbir, N.S., Rao, V.K., (1999). Effective Stress Behavior of Qouasi-Saturated Compacted Cohesive Soils, J. Geotechnical and geoenvironmental Engineering, 125(4), 322-329.
- Sivakumar, V., Wheeler, S.J., (2000a). Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay Part:1 Wetting and isotropic compression, Geotechnique, 50(4), 359-368.
- Sivakumar, V., Wheeler, S.J., (2000b). Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay Part:2 Wetting and isotropic compression, Geotechnique, 50(4), 369-376.
- Snethen, D.R., Johnson, L.D., Patrick, D.M., (1977). An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soils, Soils and Pavements Lab., U.S., Army Eng. Wareway Exp. Sta., Rep. No. FHWA-RE-77-94, NTISPB-289-164.
- Snethen, D.R., (1984). Evaluation on expedient methods for identification on classification of potentially expansive soils, Proc. 5 th Int. Conf.on expansive soils, Adelaide, 2226.
- Şen, Z., (1999). Mühendislikte Bulanık (Fuzzy) Modelleme İlkeleri, Basılmamış Ders Notları, İstanbul, 105 p.
- Tarantino, A., Mongiovi, L., Bosco, G., (2000). An Experimental investigation on the independent isotropic stress variables for unsaturated soils, Geotechnique, 50(3), 275-282.
- Toll, D.G., (1990). A Framework for unsaturated soil behaviour, Geotechnique, 40(1), 31-44.
- Tsoukalas, L. H. and Uhrig, R. E., (1997). Fuzzy and Neural Approaches in Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 455 p.
- Ülker, R., Yıldırım, H., Keskin, S.N., (1993). Killerin şişme davranışına ön yüklemenin ve minerolojinin etkisi, 6. Ulusal Kil Sempozyumu, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 323-334.

- Vanapalli, S.K., (1994). Simple Test Prosedures and Their Interpretation in Evaluating The Shear Strength of Unsaturated Soils, Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., Clifton, a.W., (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, Can. Geotech., 33, 379-392.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, (1999). The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till, Geotechnique, 49(2), 143-159.
- Velde, B., (1995). Orijin and Mineralogy of Clay: Clays and The Environment, Springer- Verlag Berlin Heidelberg, New York, 335 p.
- Viani, B.E., Roth, C.B., Low, P.F., (1985). Direct measurement of the relation between swelling pressure and interlayer distance in Li-Vermiculite, Clays and Clay Minerals, 33(3), 244-250.
- Wang, X., Benson, C.H., (1995). Infiltration and saturated hydraulic conductivity of compacted clay, J. Geotech. Engineering, 121(10), 713-722.
- Wayne, A.C., Osman, M.A., Elfatih, M.A., (1984). Constraction on expansive soils in Sudan, J. Construction Eng. Management, ASCE, 110, 359-374.
- White, N.F., Duke, H.R., Sunada, D.K., Corey, A.T., (1970). Physics of desaturation in porous materials, J. Irrigation and Drainage Division, ASCE, 96, IR2, 165-191.
- Wheeler, S.J., Sivakumar, V., (1995). An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil, Geotechnique, 45(1), 35-53.
- Xie, D.Y., Liu, F.Y., Han, X.L., Wu, L.Y., Zhao, Y.H., (1996). A new type of triaxial apparatus for unsaturated soil test, Proceedings of the first international conference on unsaturated soils / Unsat'95 / Paris / France / 6-8 September 1995, 3, Presses Del L'ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees, 1551-1558.
- Yıldırım, H., Keskin, S.N., Çimen, Ö., Kara, H.B., (1999). Zeminlerde farklı başlangıç kuru birim hacim ağırlık-emme kapasitesi- şişme basıncı ilişkisi, 10. Mühendislik Sempozyumu İnşaat Mühendisliği'99, S.D.Ü., Isparta, 421-426.
- Yıldırım, H., Keskin, S.N., Çimen, Ö., Göksan, T.S., (2000). Emme kapasitesi ve şişme basıncının belirlenmesinde yaklaşık çözüm, Zemin Mekaniği ve Tememl Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, İTÜ, İstanbul, 95-101.
- Zadeh, L.A., (1965). Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 338-353.

- Zadeh, L.A., (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 3(1), 28-44.
- Zadeh, L.A., (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Information Sci. Part I, 8(3), 199-249.
- Zhang, Z. and Tümay, M.T., (1999). Statistical to fuzzy aproach toward CPT soil clasification, J. Geotechnical and Geoenviromental Engineering, 125(3), 179-186.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : ÖMÜR ÇİMEN
Doğum Yeri :Beypazarı / Ankara
Doğum Yılı : 1973
Medeni Hali : Evli

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise : 1987-1990 Beypazarı Lisesi Beypazarı/Ankara
Lisans : 1990-1994 Akdeniz Üniversitesi, Isparta Mühendislik Fak.,
İnşaat Mühendisliği Bölümü.
Yüksek Lisans : 1994-1996 S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat
Mühendisliği Anabilim Dalı (Geoteknik).

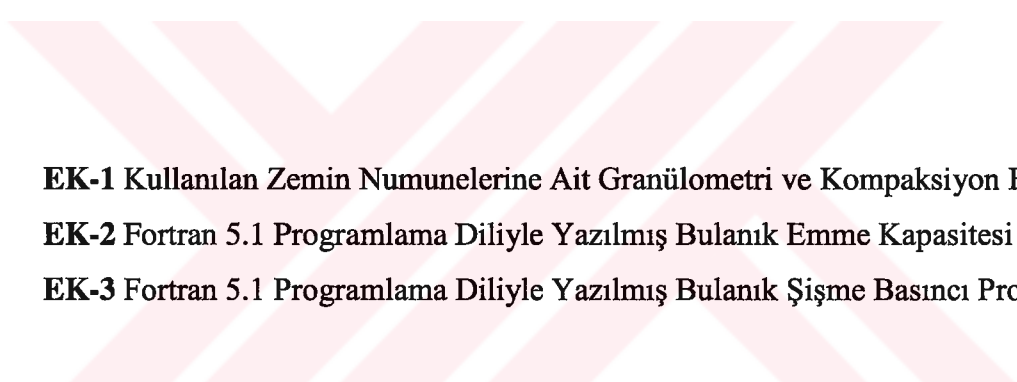
Yabancı Dil : İngilizce

İş Deneyimi:

1995- : S.D.Ü. Müh. Mim. Fak. İnşaat Müh. Böl.' de Araştırma Görevliliği



EKLER

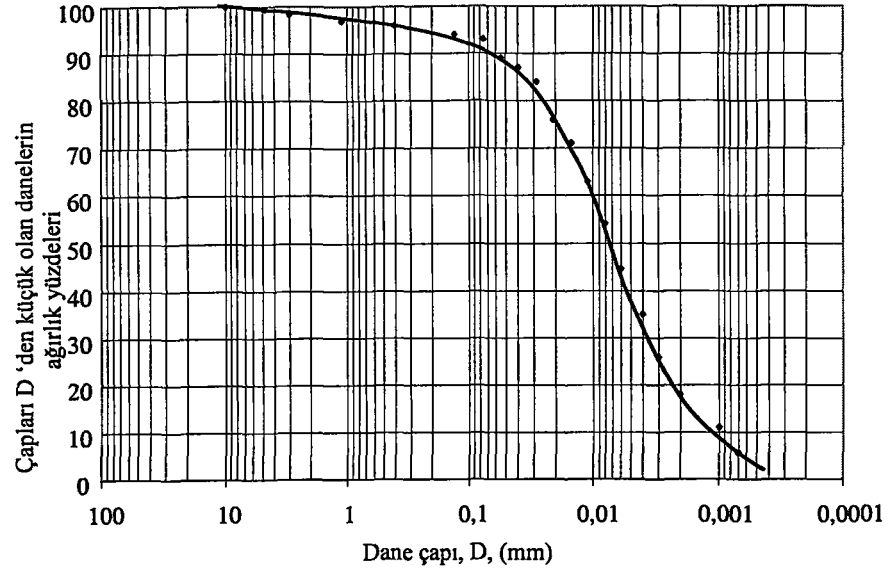


EK-1 Kullanılan Zemin Numunelerine Ait Granülometri ve Kompaksiyon Eğrileri

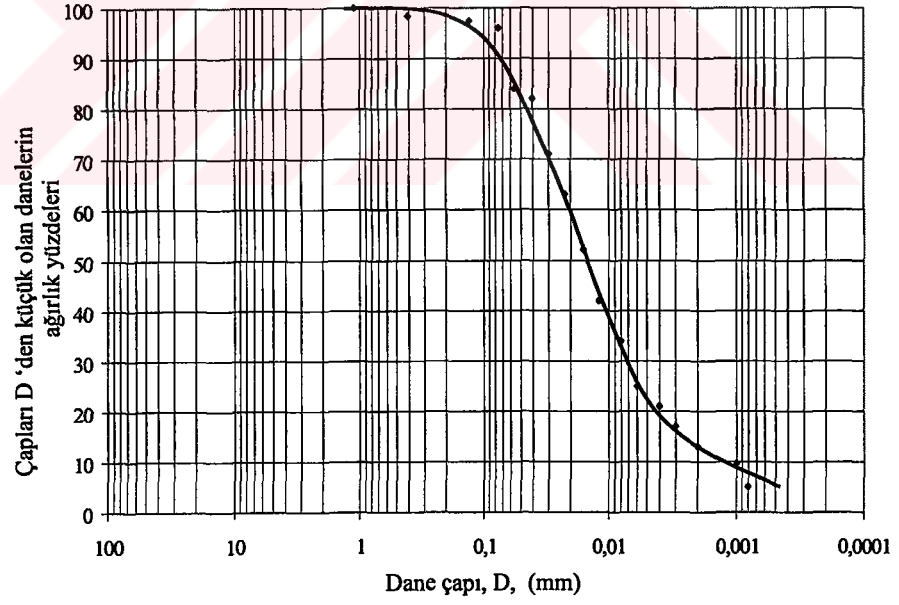
EK-2 Fortran 5.1 Programlama Diliyle Yazılmış Bulanık Emme Kapasitesi Programı

EK-3 Fortran 5.1 Programlama Diliyle Yazılmış Bulanık Şişme Basıncı Programı

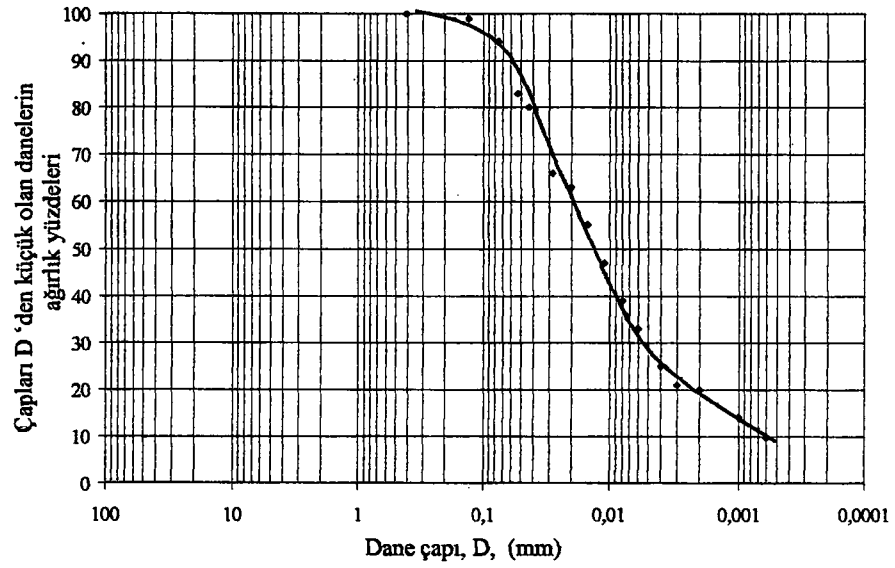
EK-1 Kullanılan Zemin Numunelerine Ait Granülometri ve Kompaksiyon Eğrileri



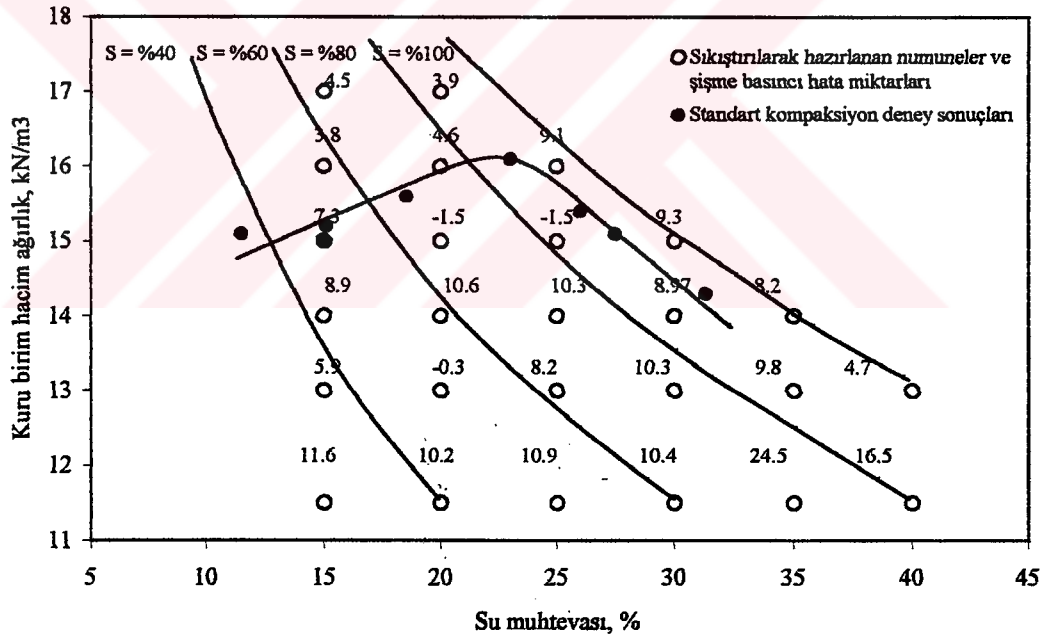
1.) 1 No'lu zemin numunesinin granülometri eğrisi



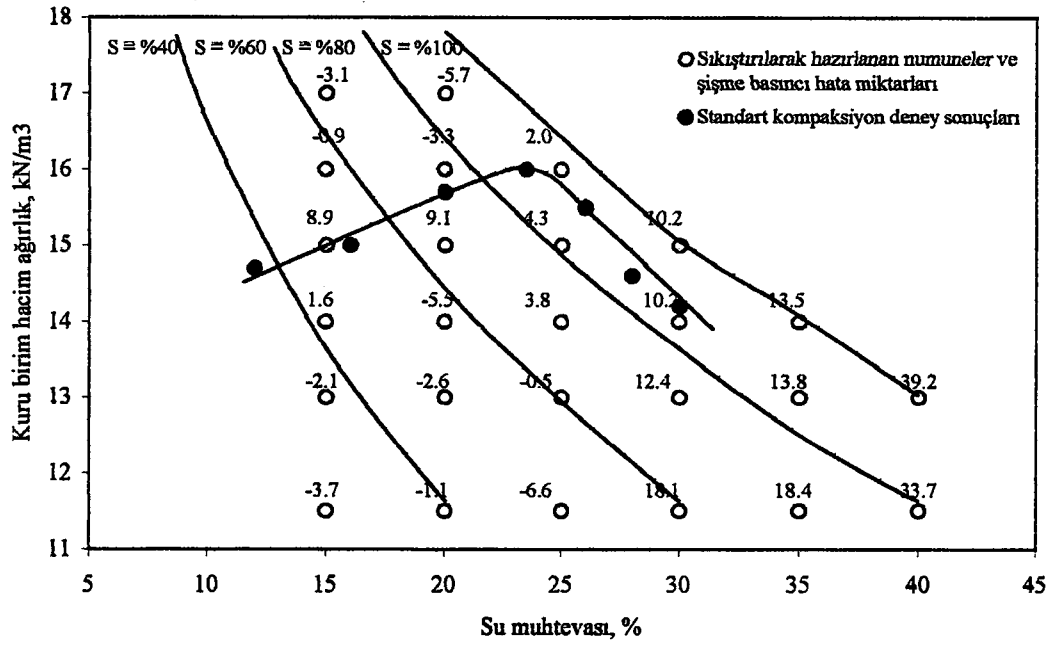
2.) 2 No'lu zemin numunesinin granülometri eğrisi



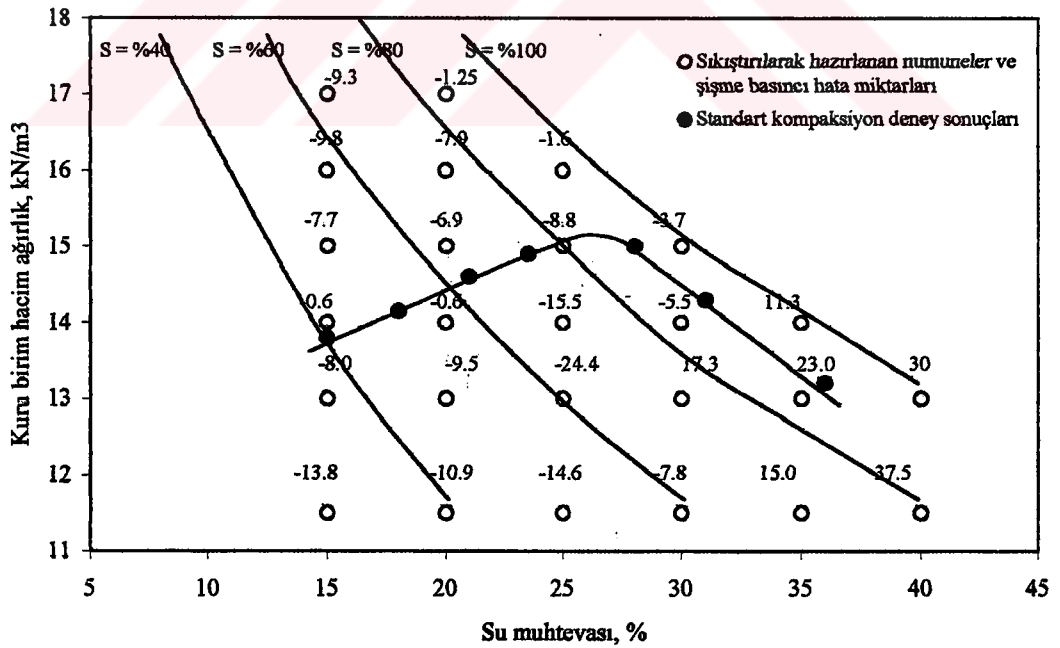
3.) 3 No'lu zemin numunesinin granülometri eğrisi



4.) 1 No'lu zemin numunesinin kompaksiyon eğrisi, doygunluk eğrileri ve deney ile model arasındaki şişme basıncı hata miktarları



5.) 2 No'lu zemin numunesinin kompaksiyon eğrisi, doygunluk eğrileri ve deney ile model arasındaki şişme basıncı hata miktarları



6.) 3 No'lu zemin numunesinin kompaksiyon eğrisi, doygunluk eğrileri ve deney ile model arasındaki şişme basıncı hata miktarları



EK-2 Fortran 5.1 Programlama Diliyle Yazılmış Bulanık Emme Kapasitesi Programı

```

C *****FUZZY LOGIC KULLANARAK *****
C KILI ZEMİNLERDE EMME KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ
C
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION GK(7,211),WO(6,51),PI(10,111)
EXTERNAL EM1,EM2,EM3,EM4,EM5,EM6,EM7,EM8,EM9,EM10,EM11
EXTERNAL EM12,EM13,EM14
PRINT*, ' Kuru Birim Hacim Ağırlık Değeri (10 ile çarparak gir) = ? kN/m3'
READ (*,*)MGK
PRINT*, ' Su Muhtevası Değeri (% olarak gir) = ?'
READ (*,*)MWO
PRINT*, ' Plastisite İndisi Değeri (% olarak gir) = ?'
READ (*,*)MPI
I=1
IGKBASI=90
DO 1 IGK=90,110
    GK(I,IGK)=1.-(IGK-IGKBASI)/20.
PRINT*,I,IGK/10.,GK(I,IGK)
1 CONTINUE
C PAUSE
IGKBASI=90
IGKORTASI=110
DO 2 I=2,6
    DO 3 IGK=IGKBASI,IGKORTASI+20
        IF (IGK.LE.IGKORTASI) THEN
            GK(I,IGK)=1.+(IGK-IGKORTASI)/20.
        ELSEIF (IGK.GT.IGKORTASI) THEN
            GK(I,IGK)=1.-(IGK-IGKORTASI)/20.
        ENDIF
PRINT*,I,IGK/10.,GK(I,IGK)
3 CONTINUE
C PAUSE
IGKBASI=IGKBASI+20
IGKORTASI=IGKORTASI+20
2 CONTINUE
I=7
DO 4 IGK=190,210
    GK(I,IGK)=1.+(IGK-IGKORTASI)/20.
PRINT*,I,IGK/10.,GK(I,IGK)
4 CONTINUE
C PAUSE
J=1
JWOBASİ=0
DO 5 JWO=0,10
    WO(J,JWO)=1.-(JWO-JWOBASİ)/10.
PRINT*,J,JWO,WO(J,JWO)
5 CONTINUE
C PAUSE
JWOBASİ=0
JWOORTASI=10
DO 6 J=2,5
    DO 7 JWO=JWOBASİ,JWOORTASI+10
        IF (JWO.LE.JWOORTASI) THEN
            WO(J,JWO)=1.+(JWO-JWOORTASI)/10.
        ELSEIF (JWO.GT.JWOORTASI) THEN
            WO(J,JWO)=1.-(JWO-JWOORTASI)/10.
        ENDIF
PRINT*,J,JWO,WO(J,JWO)
7 CONTINUE
C PAUSE
JWOBASİ=JWOBASİ+10
JWOORTASI=JWOORTASI+10
6 CONTINUE
J=6
DO 8 JWO=40,50
    WO(J,JWO)=1.+(JWO-JWOORTASI)/10.
PRINT*,J,JWO,WO(J,JWO)
8 CONTINUE
K=1
KPIBASİ=10
DO 9 KPI=10,30
    PI(K,KPI)=1.-(KPI-KPIBASİ)/20.
PRINT*,K,KPI,PI(K,KPI)

```

```

9 CONTINUE
C PAUSE
KPIBASI=10
KPIORTASI=30
K=2
    DO 10 KPI=KPIBASI,KPIORTASI+10
        IF (KPI.LE.KPIORTASI) THEN
            PI(K,KPI)=1.+(KPI-KPIORTASI)/20.
        ELSEIF (KPI.GT.KPIORTASI) THEN
            PI(K,KPI)=1.-(KPI-KPIORTASI)/10.
        ENDIF
        PRINT*,K,KPI,PI(K,KPI)
10 CONTINUE
C PAUSE
KPIBASI=KPIBASI+20
KPIORTASI=KPIORTASI+10
DO 11 K=3,9
    DO 12 KPI=KPIBASI,KPIORTASI+10
        IF (KPI.LE.KPIORTASI) THEN
            PI(K,KPI)=1.+(KPI-KPIORTASI)/10.
        ELSEIF (KPI.GT.KPIORTASI) THEN
            PI(K,KPI)=1.-(KPI-KPIORTASI)/10.
        ENDIF
        PRINT*,K,KPI,PI(K,KPI)
12 CONTINUE
C PAUSE
KPIBASI=KPIBASI+10
KPIORTASI=KPIORTASI+10
11 CONTINUE
K=10
DO 17 KPI=100,110
    PI(K,KPI)=1.+(KPI-KPIORTASI)/10.
    PRINT*,K,KPI,PI(K,KPI)
17 CONTINUE
C PAUSE
C CALL ALT (GK,WO,PL,MGK,MWO,MPL,UK,S)
    PRINT*, 'EMME KAPASİTESİ DEĞERİ:'
    PRINT*, E/UK
    STOP
END
C
C DO 10001 I=1,7
C ***** J=1 *****
IF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*(E4+E5)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*(E5+E6)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*(E6+E7)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E8+E9+E10)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E9+E10+E11)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E10+E11+E12)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E11+E12+E13)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E12+E13+E14)/3.
    UK=UK+U
***** J=2 *****
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E6+E7)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E7+E8)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E8+E9)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E9+E10)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E10+E11)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E11+E12)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E12+E13)/2.
    UK=UK+U
***** J=3 *****
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*(E3+E4)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*(E4+E5)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*(E5+E6)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E8+E9+E10)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E9+E10+E11)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E10+E11+E12)/3.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E11+E12+E13)/3.
    UK=UK+U
***** J=4 *****
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*(E2+E3)/2.
    UK=UK+U
ELSEIF (1.EQ.1.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*(E3+E4)/2.
    UK=UK+U

```

```

E=E+U*(E11+E12+E13)/3.
UK=UK+U
C ***** J=3 *****
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E10+E11+E12+E13)/4.
UK=UK+U
C ***** J=4 *****
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E10+E11+E13)/3.
UK=UK+U
C ***** J=5 *****
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11+E12)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12+E13)/5.
UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E1+E2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11)/3.
UK=UK+U
C ***** J=1 *****
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
UK=UK+U

```

```

E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11+E12)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12+E13)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E10+E11+E12+E13+E14)/5.
UK=UK+U
C ***** J=2 *****
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E10+E11+E12+E13)/4.
UK=UK+U
C ***** J=3 *****
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6+E7)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11+E12)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12+E13)/5.
UK=UK+U
C ***** J=4 *****
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12)/4.
UK=UK+U
C ***** J=5 *****
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E1+E2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11+E12)/5.
UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (LEQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN

```

```

E=E+U*(E2+E3+E4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
UK=UK+U
C ***** J = 1 *****
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E10+E11+E12)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E11+E12+E13)/3.
UK=UK+U
C ***** J=2 *****
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E10+E11+E12+E13)/4.
UK=UK+U
C ***** J=3 *****
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E10+E11+E12)/3.
UK=UK+U
C ***** J=4 *****
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E1+E2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12)/4.
UK=UK+U
C ***** J=5 *****
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN

```

```

E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11)/3.
UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E1+E2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
UK=UK+U
C ***** J=1 *****
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E10+E11+E12+E13)/4.
UK=UK+U
C ***** J=2 *****
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4+E5)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5+E6)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6+E7)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10+E11+E12)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E9+E10+E11+E12+E13)/5.
UK=UK+U
C ***** J=3 *****
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*(E1+E2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.

```

```

    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E9+E10+E11+E12)/4.
    UK=UK+U
C ***** J=4 *****
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*(E1+E2)/2.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E8+E9+E10+E11+E12)/5.
    UK=UK+U
C ***** J=5 *****
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*(E1+E2)/2.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E2+E3+E4+E5)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E8+E9+E10+E11)/4.
    UK=UK+U
C ***** J=6 *****
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4+E5)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E3+E4+E5+E6+E7)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
    UK=UK+U
C ***** J=1 *****
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4+E5)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*(E2+E3+E4+E5+E6)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E3+E4+E5+E6+E7)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E8+E9+E10+E11+E12)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E9+E10+E11+E12+E13)/5.
    UK=UK+U
C ***** J=2 *****
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*(E1+E2)/2.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4+E5+E6)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E2+E3+E4+E5+E6+E7)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E3+E4+E5+E6+E7+E8)/6.

```

```

    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8+E9)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9+E10)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10+E11)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11+E12)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E8+E9+E10+E11+E12+E13)/6.
    UK=UK+U
C ***** J=3 *****
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4+E5)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E2+E3+E4+E5+E6)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E3+E4+E5+E6+E7)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E8+E9+E10+E11+E12)/5.
    UK=UK+U
C ***** J=4 *****
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4+E5)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E2+E3+E4+E5+E6)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E3+E4+E5+E6+E7+E8)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8+E9)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9+E10)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10+E11)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11+E12)/6.
    UK=UK+U
C ***** J=5 *****
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4+E5)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E3+E4+E5+E6+E7)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10)/5.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E7+E8+E9+E10+E11)/5.
    UK=UK+U
C ***** J=6 *****
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
    E=E+U*E1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
    E=E+U*(E1+E2)/2.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
    E=E+U*(E2+E3+E4+E5+E6+E7)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
    E=E+U*(E3+E4+E5+E6+E7+E8)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
    E=E+U*(E4+E5+E6+E7+E8+E9)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
    E=E+U*(E5+E6+E7+E8+E9+E10)/6.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
    E=E+U*(E6+E7+E8+E9+E10+E11)/6.
    UK=UK+U
C ***** J=1 *****
    ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
    E=E+U*(E1+E2+E3)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
    E=E+U*(E2+E3+E4)/3.

```

C

```

ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E8+E9+E10)/3.
UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
E=E+U*E1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
E=E+U*(E1+E2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
E=E+U*(E1+E2+E3+E4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
E=E+U*(E3+E4+E5+E6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
E=E+U*(E4+E5+E6+E7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
E=E+U*(E5+E6+E7+E8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
E=E+U*(E6+E7+E8+E9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
E=E+U*(E7+E8+E9+E10)/4.
UK=UK+U
ENDIF
C
10001 CONTINUE
PRINT*, 'EMME KAPASİTESİ DEĞERİ:'
PRINT*, E/UK
STOP
END
FUNCTION EM1(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=5*10
LORTASI=15*10
LSONU=25*10
EM1=0.0
EMMM1=(LBASI+2*LORTASI)/30.
IF (U-1.)2113,2112,2113
2112 EM1=EMMM1
GOTO 2111
2113 DO 21 L=LBASI,LSONU
EMI=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EMI=(L*.1+EMMM1)/2.
PRINT*, EM1
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=(L*0.1+EMMM1)/2.
ENDIF
21 CONTINUE
2111 RETURN
END
FUNCTION EM2(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=15*10
LORTASI=25*10
LSONU=35*10
EM2=0.0
IF (U-1.)2213,2212,2213
2212 EM2=LORTASI*.1
GOTO 2211
2213 DO 22 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM2=L*.1
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM2=(L*.1+EM2)/2.
PRINT*, EM2
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ENDIF
22 CONTINUE
2211 RETURN
END
FUNCTION EM3(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=25*10
LORTASI=35*10
LSONU=45*10
EM3=0.0
IF (U-1.)2313,2312,2313
2312 EM3=LORTASI*.1
GOTO 2311
2313 DO 23 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM3=L*.1
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM3=(L*.1+EM3)/2.
PRINT*, EM3
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ENDIF
23 CONTINUE
2311 RETURN
END
FUNCTION EM4(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=30*10
LORTASI=40*10
LSONU=50*10
EM4=0.0
IF (U-1.)2413,2412,2413
2412 EM4=LORTASI*.1
GOTO 2411
2413 DO 24 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM4=L*.1
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM4=(L*.1+EM4)/2.
PRINT*, EM4
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ENDIF
24 CONTINUE
2411 RETURN
END

```

```

      ENDIF
24  CONTINUE
2411 RETURN
END
FUNCTION EM5(U)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=40*10
  LORTASI=50*10
  LSONU=60*10
  EM5=0.0
  IF (U-1.)2513,2512,2513
2512 EM5=LORTASI*.1
      GOTO 2511
2513 DO 25 L=LBASI,LSONU
      IF (L.LE.LORTASI) THEN
        EMI=1.+(L-LORTASI)/100.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM5=L*.1
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
        EMI=1.-(L-LORTASI)/100.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM5=(L*.1+EM5)/2.
        PRINT*,EM5
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ENDIF
25  CONTINUE
2511 RETURN
END
FUNCTION EM6(U)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=50*10
  LORTASI=60*10
  LSONU=70*10
  EM6=0.0
  IF (U-1.)2613,2612,2613
2612 EM6=LORTASI*.1
      GOTO 2611
2613 DO 26 L=LBASI,LSONU
      IF (L.LE.LORTASI) THEN
        EMI=1.+(L-LORTASI)/100.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM6=L*.1
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
        EMI=1.-(L-LORTASI)/100.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM6=(L*.1+EM6)/2.
        PRINT*,EM6
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ENDIF
26  CONTINUE
2611 RETURN
END
FUNCTION EM7(U)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=60*10
  LORTASI=80*10
  LSONU=100*10
  EM7=0.0
  IF (U-1.)2713,2712,2713
2712 EM7=LORTASI*.1
      GOTO 2711
2713 DO 27 L=LBASI,LSONU
      IF (L.LE.LORTASI) THEN

```

```

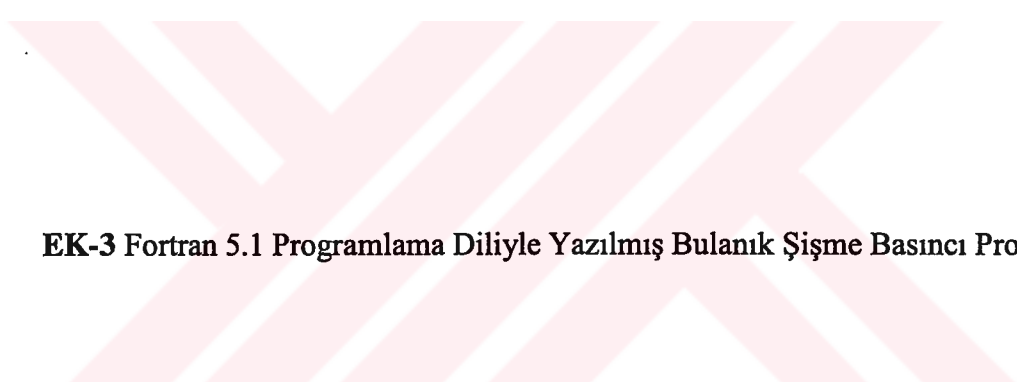
        EMI=1.+(L-LORTASI)/200.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM7=L*.1
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
        EMI=1.-(L-LORTASI)/200.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM7=(L*.1+EM7)/2.
        PRINT*,EM7
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ENDIF
27  CONTINUE
2711 RETURN
END
FUNCTION EM8(U)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=85*10
  LORTASI=105*10
  LSONU=125*10
  EM8=0.0
  IF (U-1.)2813,2812,2813
2812 EM8=LORTASI*.1
      GOTO 2811
2813 DO 28 L=LBASI,LSONU
      IF (L.LE.LORTASI) THEN
        EMI=1.+(L-LORTASI)/200.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM8=L*.1
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
        EMI=1.-(L-LORTASI)/200.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM8=(L*.1+EM8)/2.
        PRINT*,EM8
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ENDIF
28  CONTINUE
2811 RETURN
END
FUNCTION EM9(U)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=115*10
  LORTASI=135*10
  LSONU=155*10
  EM9=0.0
  IF (U-1.)2913,2912,2913
2912 EM9=LORTASI*.1
      GOTO 2911
2913 DO 29 L=LBASI,LSONU
      IF (L.LE.LORTASI) THEN
        EMI=1.+(L-LORTASI)/200.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM9=L*.1
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
        EMI=1.-(L-LORTASI)/200.
        IF (U.EQ.EMI) THEN
          EM9=(L*.1+EM9)/2.
        PRINT*,EM9
        ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
          EI=L*0.1
        ENDIF
      ENDIF

```

```

29 CONTINUE
2911 RETURN
END
FUNCTION EM10(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=140*10
LORTASI=170*10
LSONU=200*10
EM10=0.0
IF (U-1.)3013,3012,3013
3012 EM10=LORTASI*.1
GOTO 3011
3013 DO 30 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
EMI=1.+(L-LORTASI)/300.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM10=L*.1
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/300.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM10=(L*.1+EM10)/2.
PRINT*,EM10
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ENDIF
30 CONTINUE
3011 RETURN
END
FUNCTION EM11(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=180*10
LORTASI=210*10
LSONU=240*10
EM11=0.0
IF (U-1.)3113,3112,3113
3112 EM11=LORTASI*.1
GOTO 3111
3113 DO 31 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
EMI=1.+(L-LORTASI)/300.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM11=L*.1
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/300.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM11=(L*.1+EM11)/2.
PRINT*,EM11
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ENDIF
31 CONTINUE
3111 RETURN
END
FUNCTION EM12(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=225*10
LORTASI=255*10
LSONU=285*10
EM12=0.0
IF (U-1.)3213,3212,3213
3212 EM12=LORTASI*.1
GOTO 3211
3213 DO 32 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
EMI=1.+(L-LORTASI)/300.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM12=L*.1
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/300.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM12=(L*.1+EM12)/2.
PRINT*,EM12
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ENDIF
32 CONTINUE
3211 RETURN
END
FUNCTION EM13(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=265*10
LORTASI=305*10
LSONU=345*10
EM13=0.0
IF (U-1.)3313,3312,3313
3312 EM13=LORTASI*.1
GOTO 3311
3313 DO 33 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
EMI=1.+(L-LORTASI)/400.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM13=L*.1
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
EMI=1.-(L-LORTASI)/400.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM13=(L*.1+EM13)/2.
PRINT*,EM13
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=L*0.1
ENDIF
ENDIF
33 CONTINUE
3311 RETURN
END
FUNCTION EM14(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=320*10
LORTASI=360*10
LSONU=400*10
EM14=0.0
EMMM2=(2*LORTASI+LBASI)/30.
IF (U-1.)3413,3412,3413
3412 EM14=EMMM2
GOTO 3411
3413 DO 34 L=LBASI,LSONU
EMI=1.+(L-LORTASI)/400.
IF (U.EQ.EMI) THEN
EM14=(L*.1+EMMM2)/2.
PRINT*,EM14
ELSEIF (U.NE.EMI) THEN
EI=(L*0.1+EMMM2)/2.
ENDIF
34 CONTINUE
3411 RETURN
END

```



EK-3 Fortran 5.1 Programlama Diliyle Yazılmış Bulanık Şişme Basıncı Programı

```

C *****FUZZY LOGIC KULLANARAK *****
C KİLLİ ZEMİNLERDE ŞİŞME BASINCININ BELİRLENMESİ
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION GK(7,211),WO(6,51),PI(10,111)
EXTERNAL SI1,SI2,SI3,SI4,SI5,SI6,SI7,SI8,SI9,SI10,SI11,SI12
EXTERNAL SI13,SI14,SI15,SI16,SI17,SI18,SI19,SI20,SI21,SI22
PRINT*,' Kuru Birim Hacim Ağırlık Değeri (10 ile çarparak gir)= ? kN/m3'
READ(*,*)MGK
PRINT*,' Su Muhtevası Değeri (% olarak gir) = ?'
READ(*,*)MWO
PRINT*,' Plastisite İndisi Değeri (% olarak gir) = ?'
READ(*,*)MPI
I=1
IGKBASI=90
DO 1 IGK=90,110
    GK(I,IGK)=1.-(IGK-IGKBASI)/20.
PRINT*,I,IGK/10.,GK(I,IGK)
1 CONTINUE
IGKBASI=90
IGKORTASI=110
DO 2 I=2,6
    DO 3 IGK=IGKBASI,IGKORTASI+20
        IF (IGK.LE.IGKORTASI) THEN
            GK(I,IGK)=1.+(IGK-IGKORTASI)/20.
        ELSEIF (IGK.GT.IGKORTASI) THEN
            GK(I,IGK)=1.-(IGK-IGKORTASI)/20.
        ENDIF
PRINT*,I,IGK/10.,GK(I,IGK)
3 CONTINUE
IGKBASI=IGKBASI+20
IGKORTASI=IGKORTASI+20
2 CONTINUE
I=7
DO 4 IGK=190,210
    GK(I,IGK)=1.+(IGK-IGKORTASI)/20.
PRINT*,I,IGK/10.,GK(I,IGK)
4 CONTINUE
J=1
JWOBASİ=0
DO 5 JWO=0,10
    WO(J,JWO)=1.-(JWO-JWOBASİ)/10.
PRINT*,J,JWO,WO(J,JWO)
5 CONTINUE
JWOBASİ=0
JWOORTASİ=10
DO 6 J=2,5
    DO 7 JWO=JWOBASİ,JWOORTASİ+10
        IF (JWO.LE.JWOORTASİ) THEN
            WO(J,JWO)=1.+(JWO-JWOORTASİ)/10.
        ELSEIF (JWO.GT.JWOORTASİ) THEN
            WO(J,JWO)=1.-(JWO-JWOORTASİ)/10.
        ENDIF
PRINT*,J,JWO,WO(J,JWO)
7 CONTINUE
JWOBASİ=JWOBASİ+10
JWOORTASİ=JWOORTASİ+10
6 CONTINUE
J=6
DO 8 JWO=40,50
    WO(J,JWO)=1.+(JWO-JWOORTASİ)/10.
PRINT*,J,JWO,WO(J,JWO)
8 CONTINUE
K=1
KPIBASİ=10
DO 9 KPI=10,30
    PI(K,KPI)=1.-(KPI-KPIBASİ)/20.
PRINT*,K,KPI,PI(K,KPI)
9 CONTINUE
KPIBASİ=10
KPIORTASİ=30
K=2
DO 10 KPI=KPIBASİ,KPIORTASİ+10
    IF (KPI.LE.KPIORTASİ) THEN

```



```

S=S+U*(S11+S12+S13)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S15+S16+S17)/3.
UK=UK+U
C ***** J=5 *****
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3+S4+S5)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S3+S4+S5+S6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S7+S8+S9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S9+S10+S11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S11+S12+S13)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S15+S16+S17)/3.
UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S2+S3+S4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.1.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
UK=UK+U
C ***** J=1 *****
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S16+S17+S18)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S18+S19+S20)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S20+S21+S22)/3.
UK=UK+U
C ***** J=2 *****
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S3+S4+S5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S7+S8+S9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S9+S10+S11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S11+S12+S13)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S15+S16+S17)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S17+S18+S19)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S19+S20+S21)/3.
UK=UK+U
C ***** J=3 *****
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S2+S3+S4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S4+S5)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN

```

```

S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S16+S17+S18)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S18+S19+S20)/3.
UK=UK+U
C ***** J=4 *****
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3+S4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S2+S3+S4+S5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S16+S17+S18)/3.
UK=UK+U
C ***** J=5 *****
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3+S4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S2+S3+S4+S5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S4+S5+S6+S7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8+S9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10+S11)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12+S13)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14+S15)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16+S17)/4.
UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S1+S2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3+S4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S2+S3+S4+S5)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S4+S5+S6+S7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8+S9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10+S11)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12+S13)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.2.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14+S15)/4.
UK=UK+U
C ***** J=1 *****
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S6+S7)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S7+S8)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S9+S10)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S11+S12)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S13+S14)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S15+S16)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S17+S18)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S19+S20)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S21+S22)/2.
UK=UK+U
C ***** J=2 *****
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN

```

```

S=S+U*(S5+S6)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S6+S7)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S8+S9)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S10+S11)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S12+S13)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S14+S15)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S16+S17)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S18+S19)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S20+S21)/2.
UK=UK+U
C ***** J=3 *****
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S3+S4+S5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S5+S6)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S7+S8)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S9+S10)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S11+S12)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S13+S14)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S15+S16)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S17+S18)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S19+S20)/2.
UK=UK+U
C ***** J=4 *****
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3+S4+S5)/5.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S3+S4+S5+S6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S7+S8+S9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S9+S10+S11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S11+S12+S13)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S15+S16+S17)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S17+S18+S19)/3.
UK=UK+U
C ***** J=5 *****
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3+S4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S3+S4+S5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S7+S8+S9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S9+S10+S11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S11+S12+S13)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S15+S16+S17)/3.
UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3+S4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S3+S4+S5)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S7+S8+S9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S9+S10+S11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S11+S12+S13)/3.

```

```

    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.3.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
    UK=UK+U
C ***** J=1 *****
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*(S5+S6+S7+S8)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
    S=S+U*(S7+S8+S9+S10)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
    S=S+U*(S9+S10+S11+S12)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
    S=S+U*(S11+S12+S13+S14)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
    S=S+U*(S13+S14+S15+S16)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
    S=S+U*(S15+S16+S17+S18)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
    S=S+U*(S17+S18+S19+S20)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
    S=S+U*(S19+S20+S21+S22)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*(S21+S22)/2.
    UK=UK+U
C ***** J=2 *****
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*(S4+S5+S6+S7)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
    S=S+U*(S6+S7+S8+S9)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
    S=S+U*(S8+S9+S10+S11)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
    S=S+U*(S10+S11+S12+S13)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
    S=S+U*(S12+S13+S14+S15)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
    S=S+U*(S14+S15+S16+S17)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
    S=S+U*(S16+S17+S18+S19)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
    S=S+U*(S18+S19+S20+S21)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*(S20+S21+S22)/3.
    UK=UK+U
C ***** J=3 *****
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*(S3+S4+S5+S6)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
    S=S+U*(S5+S6+S7+S8)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
    S=S+U*(S7+S8+S9+S10)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
    S=S+U*(S9+S10+S11+S12)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
    S=S+U*(S11+S12+S13+S14)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
    S=S+U*(S13+S14+S15+S16)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
    S=S+U*(S15+S16+S17+S18)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
    S=S+U*(S17+S18+S19+S20)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*(S19+S20+S21+S22)/4.
    UK=UK+U
C ***** J=4 *****
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*(S2+S3+S4)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
    S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
    S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
    S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
    S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
    S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
    S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
    S=S+U*(S16+S17+S18)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*(S18+S19+S20)/4.
    UK=UK+U
C ***** J=5 *****
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*(S1+S2+S3)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
    S=S+U*(S2+S3+S4)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
    S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
    S=S+U*(S5+S6+S7+S8)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
    S=S+U*(S7+S8+S9+S10)/4.

```

```

    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
    S=S+U*(S9+S10+S11+S12)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
    S=S+U*(S11+S12+S13+S14)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
    S=S+U*(S13+S14+S15+S16)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*(S15+S16+S17+S18)/4.
    UK=UK+U
C
*****
*** J=6 *****
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
    S=S+U*(S1+S2)/2.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
    S=S+U*(S2+S3+S4)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
    S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
    S=S+U*(S5+S6+S7+S8)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
    S=S+U*(S7+S8+S9+S10)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
    S=S+U*(S9+S10+S11+S12)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
    S=S+U*(S11+S12+S13+S14)/4.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.4.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*(S13+S14+S15+S16)/4.
    UK=UK+U
C ***** J = 1 *****
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
    S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
    S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
    S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
    S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
    S=S+U*(S16+S17+S18)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
    S=S+U*(S18+S19+S20)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
    S=S+U*(S20+S21+S22)/3.

    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*22
    UK=UK+U
C ***** J=2 *****
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
    S=S+U*(S7+S8+S9)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
    S=S+U*(S9+S10+S11)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
    S=S+U*(S11+S12+S13)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
    S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
    S=S+U*(S15+S16+S17)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
    S=S+U*(S17+S18+S19)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
    S=S+U*(S19+S20+S21)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*(S21+S22)/2.
    UK=UK+U
C ***** J=3 *****
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
    S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
    S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
    S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
    S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
    S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
    S=S+U*(S16+S17+S18)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
    S=S+U*(S18+S19+S20)/3.
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
    S=S+U*(S20+S21+S22)/3.
    UK=UK+U
C ***** J=4 *****
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
    S=S+U*S1
    UK=UK+U
    ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
    S=S+U*(S3+S4+S5)/3.
    UK=UK+U

```

```

ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
  S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
  S=S+U*(S7+S8+S9)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
  S=S+U*(S9+S10+S11)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
  S=S+U*(S11+S12+S13)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
  S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
  S=S+U*(S15+S16+S17)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
  S=S+U*(S17+S18+S19)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
  S=S+U*(S19+S20+S21)/3.
  UK=UK+U
C ***** J=5 *****
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
  S=S+U*S1
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
  S=S+U*(S1+S2+S3)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
  S=S+U*(S3+S4+S5)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
  S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
  S=S+U*(S6+S7+S8+S9)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
  S=S+U*(S8+S9+S10+S11)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
  S=S+U*(S10+S11+S12+S13)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
  S=S+U*(S12+S13+S14+S15)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
  S=S+U*(S14+S15+S16+S17)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
  S=S+U*(S16+S17+S18+S19)/4.
  UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
  S=S+U*S1
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
  S=S+U*(S1+S2)/2.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
  S=S+U*(S1+S2+S3)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
  S=S+U*(S3+S4+S5)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
  S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
  S=S+U*(S6+S7+S8+S9)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
  S=S+U*(S8+S9+S10+S11)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
  S=S+U*(S10+S11+S12+S13)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
  S=S+U*(S12+S13+S14+S15)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.5.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
  S=S+U*(S14+S15+S16+S17)/4.
  UK=UK+U
C ***** J=1 *****
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
  S=S+U*S1
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
  S=S+U*(S6+S7+S8+S9)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
  S=S+U*(S8+S9+S10+S11)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
  S=S+U*(S10+S11+S12+S13)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
  S=S+U*(S12+S13+S14+S15)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
  S=S+U*(S14+S15+S16+S17)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
  S=S+U*(S16+S17+S18+S19)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
  S=S+U*(S18+S19+S20+S21)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
  S=S+U*(S20+S21+S22)/3.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
  S=S+U*S22
  UK=UK+U
C ***** J=2 *****
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
  S=S+U*S1
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
  S=S+U*(S5+S6+S7+S8)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
  S=S+U*(S7+S8+S9+S10)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
  S=S+U*(S9+S10+S11+S12)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
  S=S+U*(S11+S12+S13+S14)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
  S=S+U*(S13+S14+S15+S16)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
  S=S+U*(S15+S16+S17+S18)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
  S=S+U*(S17+S18+S19+S20)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
  S=S+U*(S19+S20+S21+S22)/4.
  UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN

```

```

S=S+U*(S21+S22)/2.
UK=UK+U
C ***** J=3 *****
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S4+S5+S6+S7)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8+S9)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10+S11)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12+S13)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14+S15)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16+S17)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S16+S17+S18+S19)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S18+S19+S20+S21)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S20+S21+S22)/3.
UK=UK+U
C ***** J=4 *****
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S16+S17+S18)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S18+S19+S20)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S20+S21+S22)/3.
UK=UK+U
C ***** J=5 *****
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3+S4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S3+S4+S5+S6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S5+S6+S7+S8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S7+S8+S9+S10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S9+S10+S11+S12)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S11+S12+S13+S14)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S13+S14+S15+S16)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S15+S16+S17+S18)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S17+S18+S19+S20)/4.
UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S1+S2+S3+S4)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S3+S4+S5+S6)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S5+S6+S7+S8)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S7+S8+S9+S10)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S9+S10+S11+S12)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S11+S12+S13+S14)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S13+S14+S15+S16)/4.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.6.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S15+S16+S17+S18)/4.
UK=UK+U
C ***** J=1 *****
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S7+S8+S9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S9+S10+S11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S11+S12+S13)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S15+S16+S17)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S17+S18+S19+S20)/3.
UK=UK+U

```

```

S=S+U*(S17+S18+S19)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S19+S20+S21)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S21+S22)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.1.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*S22
UK=UK+U
C ***** J=2 *****
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S16+S17+S18)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S18+S19+S20)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S20+S21+S22)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.2.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*S22
UK=UK+U
C ***** J=3 *****
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S5+S6+S7)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S7+S8+S9)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S9+S10+S11)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S11+S12+S13)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S13+S14+S15)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S15+S16+S17)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S17+S18+S19)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S19+S20+S21)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.3.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S21+S22)/2.
UK=UK+U
C ***** J=4 *****
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S5+S6)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S7+S8)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S9+S10)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S11+S12)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S13+S14)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S15+S16)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S17+S18)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S19+S20)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.4.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S21+S22)/2.
UK=UK+U
C ***** J=5 *****
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S2+S3+S4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.4) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S16+S18+S19)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.5.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S18+S19+S20)/3.
UK=UK+U
C ***** J=6 *****
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.1) THEN
S=S+U*S1
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.2) THEN
S=S+U*(S1+S2)/2.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.3) THEN
S=S+U*(S2+S3+S4)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.4) THEN

```

```

S=S+U*(S4+S5+S6)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.5) THEN
S=S+U*(S6+S7+S8)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.6) THEN
S=S+U*(S8+S9+S10)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.7) THEN
S=S+U*(S10+S11+S12)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.8) THEN
S=S+U*(S12+S13+S14)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.9) THEN
S=S+U*(S14+S15+S16)/3.
UK=UK+U
ELSEIF (I.EQ.7.AND.J.EQ.6.AND.K.EQ.10) THEN
S=S+U*(S16+S17+S18)/3.
UK=UK+U
ENDIF
10001 CONTINUE
RETURN
END
C
FUNCTION SII(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LORTASI=0
LSONU=5*20
SII=0.0
SIMM1=0.0
IF (U-1.)2113,2112,2113
2112 SII=SIMM1
GOTO 2111
2113 DO 21 L=LORTASI,LSONU
SII=1.-(L-1)/100.
IF (U.EQ.SII)THEN
SII=(L*.05+SIMM1)/2.
PRINT*,SII
ELSEIF (U.NE.SII) THEN
EI=(L*.05+SIMM1)/2.
ENDIF
21 CONTINUE
2111 RETURN
END
FUNCTION SI2(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=0
LORTASI=5*20
LSONU=10*20
SI2=0.0
IF (U-1.)2213,2212,2213
2212 SI2=LORTASI*.05
GOTO 2211
2213 DO 22 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
SII=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.SII)THEN
SI2=L*.05
ELSEIF (U.NE.SII) THEN
EI=L*.05
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
SII=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.SII) THEN
SI2=(L*.05+SI2)/2.
PRINT*,SI2
ELSEIF (U.NE.SII) THEN
EI=L*.05
ENDIF
ENDIF
22 CONTINUE
2211 RETURN
END
FUNCTION SI3(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=0
LORTASI=10*20
LSONU=15*20
SI3=0.0
IF (U-1.)2313,2312,2313
2312 SI3=LORTASI*.05
GOTO 2311
2313 DO 23 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
SII=1.-(L-LORTASI)/200.
IF (U.EQ.SII)THEN
SI3=L*.05
ELSEIF (U.NE.SII) THEN
EI=L*.05
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
SII=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.SII) THEN
SI3=(L*.05+SI3)/2.
PRINT*,SI3
ELSEIF (U.NE.SII) THEN
EI=L*.05
ENDIF
ENDIF
23 CONTINUE
2311 RETURN
END
FUNCTION SI4(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=0
LORTASI=20*10
LSONU=30*10
SI4=0.0
IF (U-1.)2413,2412,2413
2412 SI4=LORTASI*.1
GOTO 2411
2413 DO 24 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
SII=1.-(L-LORTASI)/200.
IF (U.EQ.SII)THEN
SI4=L*.1
ELSEIF (U.NE.SII) THEN
EI=L*.1
ENDIF
ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
SII=1.-(L-LORTASI)/100.
IF (U.EQ.SII) THEN
SI4=(L*.1+SI4)/2.
PRINT*,SI4
ELSEIF (U.NE.SII) THEN
EI=L*.1
ENDIF
ENDIF
24 CONTINUE
2411 RETURN
END
FUNCTION SI5(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=15*10
LORTASI=35*10
LSONU=45*10
SI5=0.0
IF (U-1.)2513,2512,2513
2512 SI5=LORTASI*.1
GOTO 2511
2513 DO 25 L=LBASI,LSONU
IF (L.LE.LORTASI) THEN
SII=1.-(L-LORTASI)/200.
IF (U.EQ.SII)THEN

```

```

        SI5=L*.1
        ELSEIF (U.NE.SII) THEN
            EI=L*0.1
        ENDIF
        ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
            SII=1.-(L-LORTASI)/100.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SI5=(L*.1+SI5)/2.
            PRINT*,SI5
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L*0.1
            ENDIF
        ENDIF
25  CONTINUE
2511 RETURN
END
FUNCTION SI6(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=35*10
LORTASI=55*10
LSONU=65*10
SI6=0.0
IF (U-1.)2613,2612,2613
2612 SI6=LORTASI*.1
    GOTO 2611
2613 DO 26 L=LBASI,LSONU
        IF (L.LE.LORTASI) THEN
            SII=1.+(L-LORTASI)/200.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SI6=L*.1
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L*0.1
            ENDIF
            ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
                SII=1.-(L-LORTASI)/100.
                IF (U.EQ.SII) THEN
                    SI6=(L*.1+SI6)/2.
                PRINT*,SI6
                ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                    EI=L*0.1
                ENDIF
            ENDIF
26  CONTINUE
2611 RETURN
END
FUNCTION SI7(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=60*10
LORTASI=80*10
LSONU=90*10
SI7=0.0
IF (U-1.)2713,2712,2713
2712 SI7=LORTASI*.1
    GOTO 2711
2713 DO 27 L=LBASI,LSONU
        IF (L.LE.LORTASI) THEN
            SII=1.+(L-LORTASI)/200.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SI7=L*.1
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L*.1
            ENDIF
            ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
                SII=1.-(L-LORTASI)/100.
                IF (U.EQ.SII) THEN
                    SI7=(L*.1+SI7)/2.
                PRINT*,SI7
                ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                    EI=L*.1
                ENDIF
            ENDIF
27  CONTINUE
2711 RETURN

```

```

END
FUNCTION SI8(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=90*10
LORTASI=110*10
LSONU=120*10
SI8=0.0
IF (U-1.)2813,2812,2813
2812 SI8=LORTASI*.1
    GOTO 2811
2813 DO 28 L=LBASI,LSONU
        IF (L.LE.LORTASI) THEN
            SII=1.+(L-LORTASI)/200.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SI8=L*.1
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L*.1
            ENDIF
            ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
                SII=1.-(L-LORTASI)/100.
                IF (U.EQ.SII) THEN
                    SI8=(L*.1+SI8)/2.
                PRINT*,SI8
                ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                    EI=L*.1
                ENDIF
            ENDIF
28  CONTINUE
2811 RETURN
END
FUNCTION SI9(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=110
LORTASI=150
LSONU=170
SI9=0.0
IF (U-1.)2913,2912,2913
2912 SI9=LORTASI
    GOTO 2911
2913 DO 29 L=LBASI,LSONU
        IF (L.LE.LORTASI) THEN
            SII=1.+(L-LORTASI)/40.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SI9=L
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L
            ENDIF
            ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
                SII=1.-(L-LORTASI)/20.
                IF (U.EQ.SII) THEN
                    SI9=(L+SI9)/2.
                PRINT*,SI9
                ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                    EI=L
                ENDIF
            ENDIF
29  CONTINUE
2911 RETURN
END
FUNCTION SI10(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=150
LORTASI=250
LSONU=350
SI10=0.0
IF (U-1.)3013,3012,3013
3012 SI10=LORTASI
    GOTO 3011
3013 DO 30 L=LBASI,LSONU
        IF (L.LE.LORTASI) THEN
            SII=1.+(L-LORTASI)/100.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SI10=L

```

```

        ELSEIF (U.NE.SII) THEN
            EI=L
        ENDIF
        ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
            SII=1.-(L-LORTASI)/100.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SII0=(L+SII0)/2.
            PRINT*,SII0
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L
            ENDIF
        ENDIF
30 CONTINUE
3011 RETURN
END
FUNCTION SII1(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=300
LORTASI=500
LSONU=700
SII1=0.0
IF (U-1.)3113,3112,3113
3112 SII1=LORTASI
GOTO 3111
3113 DO 31 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
        SII=1.+(L-LORTASI)/100.
        IF (U.EQ.SII) THEN
            SII1=L
        ELSEIF (U.NE.SII) THEN
            EI=L
        ENDIF
        ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
            SII=1.-(L-LORTASI)/200.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SII1=(L+SII1)/2.
            PRINT*,SII1
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L
            ENDIF
        ENDIF
31 CONTINUE
3111 RETURN
END
FUNCTION SII2(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=600
LORTASI=1000
LSONU=1800
SII2=0.0
IF (U-1.)3213,3212,3213
3212 SII2=LORTASI
GOTO 3211
3213 DO 32 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
        SII=1.+(L-LORTASI)/400.
        IF (U.EQ.SII) THEN
            SII2=L
        ELSEIF (U.NE.SII) THEN
            EI=L
        ENDIF
        ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
            SII=1.-(L-LORTASI)/800.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SII2=(L+SII2)/2.
            PRINT*,SII2
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L
            ENDIF
        ENDIF
32 CONTINUE
3211 RETURN
END

```

```

FUNCTION SII3(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=1100
LORTASI=1500
LSONU=2300
SII3=0.0
IF (U-1.)3313,3312,3313
3312 SII3=LORTASI
GOTO 3311
3313 DO 33 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
        SII=1.+(L-LORTASI)/400.
        IF (U.EQ.SII) THEN
            SII3=L
        ELSEIF (U.NE.SII) THEN
            EI=L
        ENDIF
        ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
            SII=1.-(L-LORTASI)/800.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SII3=(L+SII3)/2.
            PRINT*,SII3
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L
            ENDIF
        ENDIF
33 CONTINUE
3311 RETURN
END
FUNCTION SII4(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=1850
LORTASI=2250
LSONU=3050
SII4=0.0
IF (U-1.)3413,3412,3413
3412 SII4=LORTASI
GOTO 3411
3413 DO 34 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
        SII=1.+(L-LORTASI)/400.
        IF (U.EQ.SII) THEN
            SII4=L
        ELSEIF (U.NE.SII) THEN
            EI=L
        ENDIF
        ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
            SII=1.-(L-LORTASI)/800.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SII4=(L+SII4)/2.
            PRINT*,SII4
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L
            ENDIF
        ENDIF
34 CONTINUE
3411 RETURN
END
FUNCTION SII5(U)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
LBASI=2600
LORTASI=3000
LSONU=3800
SII5=0.0
IF (U-1.)3513,3512,3513
3512 SII5=LORTASI
GOTO 3511
3513 DO 35 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
        SII=1.+(L-LORTASI)/400.
        IF (U.EQ.SII) THEN
            SII5=L
        ELSEIF (U.NE.SII) THEN

```

```

      EI=L
    ENDIF
    ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
      SII=1.-(L-LORTASI)/800.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SII5=(L+SII5)/2.
      PRINT*,SII5
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L
      ENDIF
    ENDIF
35  CONTINUE
3511 RETURN
END
FUNCTION SII6(U)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=3600
  LORTASI=4000
  LSONU=4800
  SII6=0.0
  IF (U-1.)3613,3612,3613
3612 SII6=LORTASI
  GOTO 3611
3613 DO 36 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
      SII=1.+(L-LORTASI)/400.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SII6=L
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L
      ENDIF
    ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
      SII=1.-(L-LORTASI)/800.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SII6=(L+SII6)/2.
      PRINT*,SII6
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L
      ENDIF
    ENDIF
36  CONTINUE
3611 RETURN
END
FUNCTION SII7(U)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=4850
  LORTASI=5250
  LSONU=6050
  SII7=0.0
  IF (U-1.)3713,3712,3713
3712 SII7=LORTASI
  GOTO 3711
3713 DO 37 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
      SII=1.+(L-LORTASI)/400.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SII7=L
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L
      ENDIF
    ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
      SII=1.-(L-LORTASI)/800.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SII7=(L+SII7)/2.
      PRINT*,SII7
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L
      ENDIF
    ENDIF
37  CONTINUE
3711 RETURN
END
FUNCTION SII8(U)

```

```

  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=6350
  LORTASI=6750
  LSONU=7550
  SII8=0.0
  IF (U-1.)3813,3812,3813
3812 SII8=LORTASI
  GOTO 3811
3813 DO 38 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
      SII=1.+(L-LORTASI)/400.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SII8=L
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L
      ENDIF
    ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
      SII=1.-(L-LORTASI)/800.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SII8=(L+SII8)/2.
      PRINT*,SII8
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L
      ENDIF
    ENDIF
38  CONTINUE
3811 RETURN
END
FUNCTION SII9(U)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=7700
  LORTASI=8500
  LSONU=10100
  SII9=0.0
  IF (U-1.)3913,3912,3913
3912 SII9=LORTASI
  GOTO 3911
3913 DO 39 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
      SII=1.+(L-LORTASI)/800.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SII9=L
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L
      ENDIF
    ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
      SII=1.-(L-LORTASI)/1600.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SII9=(L+SII9)/2.
      PRINT*,SII9
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L
      ENDIF
    ENDIF
39  CONTINUE
3911 RETURN
END
FUNCTION SI20(U)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  LBASI=9700
  LORTASI=10500
  LSONU=12100
  SI20=0.0
  IF (U-1.)4013,4012,4013
4012 SI20=LORTASI
  GOTO 4011
4013 DO 40 L=LBASI,LSONU
    IF (L.LE.LORTASI) THEN
      SII=1.+(L-LORTASI)/800.
      IF (U.EQ.SII) THEN
        SI20=L
      ELSEIF (U.NE.SII) THEN
        EI=L

```

```

        ENDIF
        ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
            SII=1.-(L-LORTASI)/1600.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SI20=(L+SI20)/2.
            PRINT*,SI20
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L
            ENDIF
        ENDIF
40 CONTINUE
4011 RETURN
END
FUNCTION SI21(U)
    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    LBASI=11150
    LORTASI=12750
    LSONU=15950
    SI21=0.0
    IF (U-1.)4113,4112,4113
4112 SI16=LORTASI
    GOTO 4111
4113 DO 41 L=LBASI,LSONU
        IF (L.LE.LORTASI) THEN
            SII=1.+(L-LORTASI)/1600.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SI21=L
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L
            ENDIF
        ELSEIF (L.GT.LORTASI) THEN
            SII=1.-(L-LORTASI)/3200.
            IF (U.EQ.SII) THEN
                SI21=(L+SI21)/2.
            PRINT*,SI21
            ELSEIF (U.NE.SII) THEN
                EI=L
            ENDIF
        ENDIF
41 CONTINUE
4111 RETURN
END
FUNCTION SI22(U)
    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    LBASI=13650
    LORTASI=15250
    LSONU=18450
    SI22=0.0
    SIMM2=(2*LORTASI+LBASI)/3.
    IF (U-1.)4213,4212,4213
4212 SI22=SIMM2
    GOTO 4211
4213 DO 42 L=LBASI,LSONU
        SII=1.+(L-LORTASI)/1600.
        IF (U.EQ.SII) THEN
            SI22=(L+SIMM2)/2.
        PRINT*,SI22
        ELSEIF (U.NE.SII) THEN
            EI=(L+SIMM2)/2.
        ENDIF
42 CONTINUE
4211 RETURN
END

```