

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOPRAK DOLGU YAPILARIN
PROJELENDİRİLMESİNDE
GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR**

Aziz Barış ESENER

Yüksek Lisans Tezi

DENİZLİ-2005

**TOPRAK DOLGU YAPILARIN
PROJELENDİRİLMESİNDE
GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarafından Kabul Edilen
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

Aziz Barış ESENER

Tez Savunma Tarihi: 8.8.2005

DENİZLİ-2005

TEZ SINAV SONUÇ FORMU

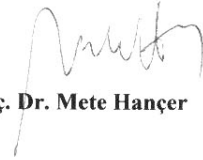
Bu tez tarafımızdan okunmuş kapsamı ve niteliği açısından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. Devrim ALKAYA

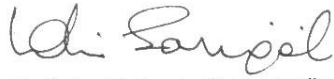


Yrd. Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN



Yrd. Doç. Dr. Mete Hançer

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
10.08.2005 tarih ve 16/12... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve yapmış olduğum tez çalışması sürecinde benden desteğini ve katkılarını esirgemeyen danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Devrim ALKAYA'ya, tez konumu belirlemem döneminde bana fikirleriyle yardımcı olan ve yaptığım laboratuvar çalışmalarında bana destek sağlayan Yrd. Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN'e, laboratuvar çalışmalarımda bana yol gösteren ve her koşulda yardımcı olan Jeoloji Yüksek Mühendisi Sefer BARAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince bana her türlü maddi ve manevi desteği veren, aileme teşekkür ederim.

Aziz Barış ESENER

ÖZET

Mühendislik hizmetleri pahalı ve bulunması zor olan kile alternatif olarak geçirimsizlik amaçlı dolgularda kullanılabilir bir zemin elde etmek amacı ile yapılan bu çalışmada; katkı malzemesi olarak bentonit ve çimento, ana malzeme olarak da kum seçilmiştir. Katkı malzemesi olarak bentonit ve çimentonun seçilmesinin ana sebebi, geçirimsizlik fonksiyonlarının bulunması ve kolaylıkla elde edilebilmeleridir. Denizli ili Buldan ilçesi Yenicekent beldesindeki kum ocaklarının değerlendirilmesi ve bölgede geçirimsizlik amaçlı yapılabilecek bir dolgu yapısı için ön çalışma teşkil etmesi amacıyla ve ucuz olması nedeniyle kum, deneylerde ana malzeme olarak tercih edilmiştir.

Geçirimsizlik amaçlı tabaka elde etmek amacı ile yapılan çalışmada esas kriter permeabilite olmak koşuluyla, tüm karışımlara düşen seviyeli permeabilite, standart proktor ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Bentonitin su adsorbe edebilme özelliğinin yüksek olması nedeni ile bentonit-kum karışımların tümü likit limit, %10 ve %20'i bentonit katkılı karışımlar da konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur.

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan üç tip karışım arasından %10 bentonit katkılı karışım, katı atık depolama tesislerinin kil şilteleri ve toprak dolgu barajların kil çekirdekleri için gerekli olan sınır şartları sağlayan en ekonomik çözüm olmuştur.

Aziz Barış ESENER

SUMMARY

In this research; which was prepared to have a soil that can be used in fills aiming impermeability as an alternative to clay that is difficult to find and that has expensive engineering services; bentonite and cement were chosen as admixture and sand was chosen as the main material. The main purpose of choosing bentonite and cement as admixture is that they are impermeable and easy to find. Sand is chosen as main material on experiments in order to take into account to use the available sand pits in Yenicekent in Denizli and to have a pre-investigation for an impermeable fill. The other reason for choosing the sand, as a main material, it is cheap.

In this study where the aim is to have an impermeable soil in which the most important criteria is impermeability; falling head permeability, standard proctor and unconfined compression test were applied to all mixtures. Since water absorption of bentonite is high, liquid limit test was applied to all sand-bentonite mixtures and consolidation test was applied to sand-bentonite mixtures having %10, %20 of bentonite.

According to the result of the tests, the mixture including %10 bentonite+%90 sand is the most economical solution and the most ideal alternative mixture that satisfies the limit values needed for clay core of earth fill dams and clay liner system of solid waste storage areas.

Aziz Barış ESENER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İçindekiler	VII
Şekiller Dizini	XI
Çizelgeler Dizini	XVI
Simgeler Dizini	XVIII

Birinci Bölüm

GİRİŞ

1.1 Giriş	1
1.2 Amaç ve Kapsam	1
1.3 Yöntem	1
1.4 Tezin Düzenlenişi	2

İkinci Bölüm

GEÇİRİMSİZ DOLGULAR

2.1 Giriş	3
2.2 Toprak Dolgu Barajlar	3
2.2.1 Toprak Dolgu Gövdeler	5
2.2.2 Kil Çekirdek	6
2.2.3 Toprak Dolgu Barajlarda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	7
2.2.4 Dolgu Malzemesinin Deprem Açısından Değerlendirilmesi	9
2.3 Küçük Toprak Dolgu Barajlar	11
2.3.1 Homojen Barajlar	11

2.3.2 Zonlu Barajlar	12
2.3.3 Geçirimsizlik Perdeli Barajlar	12
2.4 Katı Atık Depolama Tesisleri	13
2.4.1 Katı Atık Depolama Tesislerinin Amaçları	13
2.4.2 Çöp Depolama Alanları Seçimindeki Kriterler	14
2.4.3 Şilte Sistemleri	18
2.4.3.1 Doğal Kil Şilteler	21
2.4.3.2 Sıkıştırılmış Kil Şilteler	22
2.4.3.3 Geosentetik Kil Şilteler	22
2.5 Yapılan Çalışmalar	22

Üçüncü Bölüm

GEÇİRİMSİZLİK MALZEMESİ OLARAK BENTONİT

3.1 Giriş	25
3.2 Bentonitlerin Kökeni ve Oluşumu	26
3.3 Bentonitlerin Özellikleri	27
3.4 Bentonitlerin Kullanım Alanları	29
3.5 İnşaat Mühendisliğinde Bentonit Kullanımı ve Bazı Özellikleri	30

Dördüncü Bölüm

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Giriş	34
4.2 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	34
4.2.1 Bentonit	34
4.2.2 Çimento	35
4.2.3 Kum	35

4.2.3.1 Kumun Jeolojik Özellikleri	35
4.2.3.2 Kumun Sınıfının Belirlenmesi	36
4.3 Likit Limit Deneyi	40
4.3.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi	40
4.3.2 Bulgular	41
4.3.3 Likit Limit Deneyi Sonuçları	43
4.4 Kompaksiyon Deneyi	44
4.4.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi	45
4.4.2 Bulgular	46
4.4.3 Kompaksiyon Deneyi Sonuçları	51
4.5 Serbest Basınç Deneyi	55
4.5.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi	55
4.5.2 Bulgular	57
4.5.3 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	71
4.6 Permeabilite Deneyi	80
4.6.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi	80
4.6.2 Bulgular	81
4.6.3 Permeabilite Deneyi Sonuçları	81
4.7 Konsolidasyon Deneyi	83
4.7.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi	83
4.7.2 Bulgular	86
4.7.3 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları	89

Beşinci Bölüm

MALİYET ANALİZİ

5.1 Giriş	92
5.2 Maliyet Belirleme.....	92
5.3 Değerlendirme.....	96

Altıncı Bölüm**SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME**

6.1 Sonuçlar	98
6.2 Değerlendirme	100
KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1: Silindirle sıkıştırılmış toprak dolgu baraj tipleri	5
Şekil 2.2: Tipik katı atık depolaması tesisi kesiti	19
Şekil 2.3: Katı atık depolama tesisleri	20
Şekil 4.1: Kuru yapılan analizin granülometri eğrisi	38
Şekil 4.2: Yıkanarak yapılan analizin granülometri eğrisi	39
Şekil 4.3: Yıkanarak ve kuru elenen numunelerin karşılaştırılması	39
Şekil 4.4: %10 bentonit katkıli karışımının su muhtevası-vuruş sayısı grafiği	42
Şekil 4.5: %20 bentonit katkıli karışımının su muhtevası-vuruş sayısı grafiği	42
Şekil 4.6: %30 bentonit katkıli karışımının su muhtevası-vuruş sayısı grafiği	42
Şekil 4.7: %40 bentonit katkıli karışımının su muhtevası-vuruş sayısı grafiği	43
Şekil 4.8: %100 bentonitin su muhtevası-vuruş sayısı grafiği	43
Şekil 4.9: %Bentonit-likit limit değişim grafiği	44
Şekil 4.10: %10 bentonit katkıli karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği	47
Şekil 4.11: %20 bentonit katkıli karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği	47
Şekil 4.12: %30 bentonit katkıli karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği	48
Şekil 4.13: %40 bentonit katkıli karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği	48
Şekil 4.14: %100 bentonitin su muhtevası-K.B.H.A grafiği	49
Şekil 4.15: %100 kumun su muhtevası-K.B.H.A grafiği	49
Şekil 4.16: %5 çimento katkıli karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği	50
Şekil 4.17: %10 çimento katkıli karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği	50
Şekil 4.18: %10 bent.+ %5 çim. katkıli karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği ..	51
Şekil 4.19: Bentonit %'si ile max. K.BH.A değişimi	52
Şekil 4.20: Bentonit %'si ile optimum su muhtevası değişimi	52
Şekil 4.21: Çimento %'si ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değişimi	53
Şekil 4.22: Çimento %'si ile optimum su muhtevası değişimi	53

Şekil 4.23: Katkı cinsi ve yüzdesi-max. K.B.H.A değişimi	54
Şekil 4.24: Katkı cinsi ve yüzdesi-optimum su muhtevası değişimi	54
Şekil 4.25: Serbest basınç deneyi için numune hazırlama aşamaları	56
Şekil 4.26: %10 bentonit katkılı karışımın hemen kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	59
Şekil 4.27: %20 bentonit katkılı karışımın hemen kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	59
Şekil 4.28: %30 bentonit katkılı karışımın hemen kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	60
Şekil 4.29: %40 bentonit katkılı karışımın hemen kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	60
Şekil 4.30: %10 bentonit katkılı karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	61
Şekil 4.31: %20 bentonit katkılı karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	61
Şekil 4.32: %30 bentonit katkılı karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	62
Şekil 4.33: %40 bentonit katkılı karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	62
Şekil 4.34: %10 bentonit katkılı karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	63
Şekil 4.35: %20 bentonit katkılı karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	63
Şekil 4.36: %30 bentonit katkılı karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	64
Şekil 4.37: %40 bentonit katkılı karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	64
Şekil 4.38: %5 çimento katkılı karışımın hemen kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	65
Şekil 4.39: %10 çimento katkılı karışımın hemen kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	65

Şekil 4.40: %5 çimento katkılı karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	66
Şekil 4.41: %10 çimento katkılı karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	66
Şekil 4.42: %5 çimento katkılı karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	67
Şekil 4.43: %10 çimento katkılı karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	67
Şekil 4.44: %10 bentonit + %5 çimento katkılı karışımın hemen kırılması	
durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	68
Şekil 4.45: %10 bentonit + %5 çimento katkılı karışımın 1 hafta sonra	
kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	68
Şekil 4.46: %10 bentonit + %5 çimento katkılı karışımın 28 gün sonra	
kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	69
Şekil 4.47: %100 kumun hemen kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	69
Şekil 4.48: %100 kumun 1 hafta sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	70
Şekil 4.49: %100 kumun 28 gün sonra kırılması durumunda	
gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi	70
Şekil 4.50: %10 bentonit katkılı karışımın nihai gerilme değerinin	
zamanla değişimi	71
Şekil 4.51: %20 bentonit katkılı karışımın nihai gerilme değerinin	
zamanla değişimi	72
Şekil 4.52: %30 bentonit katkılı karışımın nihai gerilme değerinin	
zamanla değişimi	72
Şekil 4.53: %40 bentonit katkılı karışımın nihai gerilme değerinin	
zamanla değişimi	72
Şekil 4.54: Hemen kırılan numunelerin bentonit yüzdesi-nihai gerilme değişimi	73
Şekil 4.55: 1 hafta sonra kırılan numunelerin bentonit yüzdesi-nihai gerilme	

değişimi	73
Şekil 4.56: 28 gün sonra kırılan numunelerin bentonit yüzdesi-nihai gerilme	
değişimi	73
Şekil 4.57: Hemen, 1 hafta ve 28 gün sonra kırılan numunelerin	
bentonit yüzdesi-nihai gerilme değişimleri	74
Şekil 4.58: %5 çimento katkılı karışımın nihai gerilme değerinin	
zamanla değişimi	75
Şekil 4.59: %10 çimento katkılı karışımın nihai gerilme değerinin	
zamanla değişimi	75
Şekil 4.60: Hemen kırılan numunelerin çimento yüzdesi-nihai gerilme	
değişimi	75
Şekil 4.61: 1 hafta sonra kırılan numunelerin çimento yüzdesi-nihai gerilme	
değişimi	76
Şekil 4.62: 28 gün sonra kırılan numunelerin çimento yüzdesi-nihai gerilme	
değişimi	76
Şekil 4.63: Hemen, 1 hafta ve 28 gün sonra kırılan numunelerin	
çimento yüzdesi-nihai gerilme değişimleri	77
Şekil 4.64: %10 bentonit + %5 çimento katkılı karışımın nihai gerilme	
değerinin zamanla değişimi	78
Şekil 4.65: Hemen kırılan numunelerin nihai gerilme değerinin değişimi	78
Şekil 4.66: 1 hafta sonra kırılan numunelerin nihai gerilme değerinin değişimi	79
Şekil 4.67: 28 gün sonra kırılan numunelerin nihai gerilme değerinin değişimi	79
Şekil 4.68: Permeabilitenin bentonit oranı ile değişimi	82
Şekil 4.69: Permeabilitenin çimento oranı ile değişimi	82
Şekil 4.70: Permeabilitenin katkı oranlarına göre değişimi	83
Şekil 4.71: Numune halkasının ödometreye yerleştirilmesi	84
Şekil 4.72: %10 bentonit katkılı karışımın e-logP eğrisi	89
Şekil 4.73: %10 bentonit katkılı karışımın e-P eğrisi	89
Şekil 4.74: %20 bentonit katkılı karışımın e-logP eğrisi	90
Şekil 4.75: %20 bentonit katkılı karışımın e-P eğrisi	90

Şekil 4.76: % Bentonit-e değişim grafiği	91
Şekil 5.1: Karışım maliyetleri	95
Şekil 5.2: Fiyat karşılaştırması	97
Şekil 5.3: Kilin toplam maliyetinin mesafeye bağlı değişimi	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1: Kohezyonsuz baraj yapı malzemesinin fiziki özellikleri	7
Çizelge 2.2: Kohezyonlu baraj yapı malzemesinin fiziki özellikleri	8
Çizelge 2.3: Dolgu malzemesinin sınır değerleri	8
Çizelge 2.4: Serbest basınç dirençlerine göre killerin kıvamı	9
Çizelge 2.5: Homojen barajlar için şev eğimleri	12
Çizelge 4.1: Bentonitin kimyasal bileşenleri	35
Çizelge 4.2: P32,5 çimentosunun kimyasal bileşimi	35
Çizelge 4.3: Kuru elenen numunenin elekten geçen % hesabı	37
Çizelge 4.4: Kuru elenen numunelerin zemin sınıflandırılması	38
Çizelge 4.5: Yıkılarak elenen numunenin elekten geçen % hesabı	38
Çizelge 4.6: Yıkılarak elenen numunelerin zemin sınıflandırılması	39
Çizelge 4.7: Likit limit deneyine ait bulgular	41
Çizelge 4.8: Karışımlardaki bentonit yüzdeleri ve likit limit değerleri	43
Çizelge 4.9: Proktor deneyine ait bulgular	46
Çizelge 4.10: Proktor deneyi sonuçları	51
Çizelge 4.11: Serbest basınç mukavemetleri	58
Çizelge 4.12 : Permeabilite değerleri	81
Çizelge 4.13.a: %10 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları	86
Çizelge 4.14.a: %20 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları	86
Çizelge 4.13.b: %10 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları	87
Çizelge 4.13.c: %10 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları	87
Çizelge 4.14.b: %20 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları	88
Çizelge 4.14.c: %20 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları	88
Çizelge 5.1: Malzeme fiyatları ve taşıma maliyetleri	92
Çizelge 5.2.a: Karışım özellikleri	93

Çizelge 5.2.b: 1 m ³ dolgudaki malzeme miktarları	93
Çizelge 5.2.c: 1 m ³ dolgudaki malzeme maliyetleri	94
Çizelge 5.2.d: 1 m ³ dolgudaki taşıma maliyetleri ve toplam maliyet	94
Çizelge 5.3: 1 m ³ kilin maliyeti	96
Çizelge 6.1.a: Deney sonuçlarının toplu gösterimi	99
Çizelge 6.1.b: Deney sonuçlarının toplu gösterimi	100
Çizelge 6.2: Kil çekirdek için, sınır şartların ve %10 bentonit katkı karışımın karşılaştırılması	101

SİMGELER DİZİNİ

GC	: Killi çakıllar, fena derecelenmiş çakıl-kum-kil karışımları
SC	: Killi kumlar, fena derecelenmiş kum-kil karışımları
CL	: İnorganik killer (düşük ile orta plastisitede)
CH	: Yüksek plastisiteli inorganik killer, yağlı killer
GW	: İyi derecelenmiş çakıl, çakıl-kum karışımları
GP	: Fena derecelenmiş çakıl, çakıl-kum karışımları
SW	: İyi derecelenmiş kumlar veya çakıllı kumlar
SP	: Fena derecelenmiş kumlar ve çakıllı kumlar
C_u	: Üniformluk katsayısı
C_c	: Derecelenme katsayısı
D_{10}	: Malzemenin ağırlıkça %10'nun geçtiği dane çapı
D_{30}	: Malzemenin ağırlıkça %30'nun geçtiği dane çapı
D_{60}	: Malzemenin ağırlıkça %60'nın geçtiği dane çapı
N	: Vuruş sayısı
W_n	: Tabii ağırlık (g)
V_k	: Kalıp hacmi (cm^3)
w_n	: Doğal birim hacim ağırlık (KN/m^3)
w_k	: Kuru birim hacim ağırlık (KN/m^3)
w_{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık (KN/m^3)
w_s	: Suyun birim hacim ağırlığı (KN/m^3)
w	: Tane birim hacim ağırlığı (KN/m^3)
w	: Su muhtevası (%)
w_n	: Deney sonu su muhtevası (%)
w_{opt}	: Optimum su muhtevası (%)
w_L	: Likit limit (%)
ϕ	: İçsel sürtünme açısı ($^\circ$)
R	: Çap (cm)
H	: Yükseklik (cm)

P_{\max}	: Kırılma anındaki yük (KN/m ²)
A	: Enkesit alanı (cm ²)
q_u	: Serbest basınç mukavemeti (KN/m ²)
c	: Kohezyon (KN/m ²)
a	: Cam borunun enkesit alanı (cm ²)
L	: Permeabilite kalıbının yüksekliği (cm)
Δt	: Zaman farkı (s)
k	: Permeabilite katsayısı (cm/s)
p	: Basınç (KN/m ²)
Δp	: Basınç kademesi (KN/m ²)
e	: Boşluk oranı
e_0	: Deney başlangıcındaki boşluk oranı
e_n	: Deney sonundaki boşluk oranı
Δe	: Boşluk oranı farkı
m_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı (m ² /KN)
a_v	: Sıkışma katsayısı (m ² /KN)

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1 Giriş

Geoteknik mühendisliğindeki gelişmeler, mühendisleri doğal malzemenin kullanılması konusunda yeni alternatifler geliştirmeye zorlamıştır. Doğal zemin üzerine yapılacak yapının gerektirdiği özellikleri sağlayamıyorsa, inşaat yerinin değiştirilmesi, uygun olmayan zeminin tabakasının kaldırılması gibi çözümler çoğu zaman ekonomik olmayan alternatifler olmuştur. Bu nedenle zemin özelliklerinin çeşitli katkı malzemeleri ile iyileştirilmesi uygun ve ekonomik bir çözüm olarak günümüz mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Yapılan bu çalışmada; geçirimsizlik amaçlı dolgularda kullanılan, bulunması zor ve mühendislik hizmeti pahalı olan kil yerine kullanılabilir alternatif bir zemin oluşturulması amaçlanmıştır. Deneylerde ana malzeme olarak kum kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak bentonit ve çimento ana malzemeyle karıştırılarak, geçirimsizliği gerekli şartlara uyan en ekonomik sızdırmazlık tabakasının elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Yöntem

Tezin amacına uygun olarak laboratuarda yapılan çalışmalarda karışım alternatifleri; kum-bentonit, kum-çimento, kum-bentonit-çimento olarak belirlenmiş ve karışımların permeabilite değerlerini elde edebilmek için standart proktor ve düşen seviyeli permeabilite deneylerinin yapılması, kum-bentonit karışımların likit limitlerinin belirlenmesi, %10, %20 bentonit katkılı karışımların konsolidasyon deneyine tabi

tutulması ve karışımların basınç dayanımlarını belirlemek amacı ile serbest basınç deneyinin yapılması uygun görülmüştür.

1.4 Tezin Düzenlenişi

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, geçirimsiz dolgular hakkında bilgiler ve daha önceden yapılmış çalışmalara genel bir bakış yer almaktadır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, sızdırmazlık amaçlı dolgularda sıkça kullanılan bentonit hakkında genel bilgiler ve inşaat mühendisliği açısından kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi bulunmaktadır.

Dördüncü bölümde, amaçlanan en ideal geçirimsiz zemin karışımına ulaşabilmek için yapılmış olan deneysel çalışmalar, ayrıntıları ve karşılaştırmalı grafikleri ile birlikte yer almaktadır.

Beşinci bölümde, karışımların maliyet analizi ve en ekonomik karışım maliyetinin kilin maliyeti ile karşılaştırılması yer almaktadır.

Son bölüm olan altıncı bölümde ise yapılmış olan çalışmanın sonuçlarının değerlendirmesi, en ideal karışımın belirlenmesi ve kullanılabilirliği konusu yer almaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM GEÇİRİMSİZ DOLGULAR

2.1 Giriş

İnsan yaşamının sürekliliği için gerekli olan sudan, en fazla faydayı sağlamak amacıyla yapılan su tutma tesislerinden biri olan toprak dolgu barajlar ve insan tüketiminin sonucunda doğan atıkların güvenli olarak saklandığı, hatta bunlardan maksimum faydanın sağlandığı katı atık depolama tesisleri, geçirimsizlik kriterinin ön planda olduğu iki mühendislik yapısıdır. Bu bölümde toprak dolgu barajların ve katı atık depolama tesislerinin geçirimsizlik şartı taşıyan bölümleri hakkında ve daha önceden yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmektedir.

2.2 Toprak Dolgu Barajlar

M.Ö. 4000 yıllarında Nil'de ilk baraj inşaa edilmiş. M.Ö. 2050'li yıllar da Nil'de Sed el-Kafera, M.Ö. 2000'de Çin'de Tu-Kiang barajları ilk yapılanlardan olup ağırlık türündedirler. M.Ö. 504 yılında Seylan'da ilk toprak dolgu baraj 21m yüksekliğinde 18 km uzunluğunda inşaa edilmiştir.

Toprak barajlar, doğada bulunan malzemelerin çok az işlemden geçirilerek kullanılmasıyla inşa edildikleri için yapımına en çok rastlanan baraj tipi olmuştur. Ayrıca toprak barajların çeşitli tipteki temellere oturtulabilme imkanını vermeleri de en çok tercih edilme sebepleridir.

Makine ile sıkıştırılan dolguda baraj gövdesi tabakalar halinde serilen toprak malzemenin silindirlerle sıkıştırılmasıyla inşa edilmektedir. Bu tip dolgu çeşitli kolaylık ve üstünlüklerinden dolayı en çok kullanılan yöntem olmuş, diğer metotların yerini almıştır.

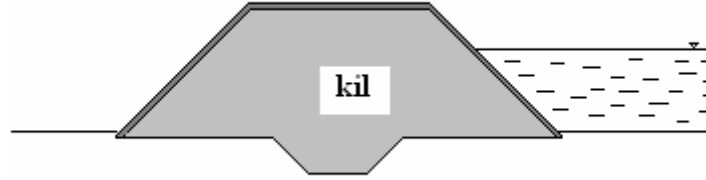
Silindire sıkıştırılmış dolgu; homojen, zonlu ve geçirimsizlik perdeli diye üçe ayrılmaktadır.

Homojen tipte, bütün baraj gövdesi bir tek cins topraktan teşkil edilmektedir. Baraj inşaatı teknolojik açıdan büyük kolaylıklar sağladığından ince daneli malzemenin bol olduğu yerlerde tercih edilir. Tüm baraj gövdesinde tam geçirimsiz bir zon olmadığı için inşaat süresince oluşan boşluk suyu basınçları kaybolmamaktadır. Bu nedenle yüksek barajlar için homojen tip önerilmez. Homojen barajların yüksekliği genelde 30 metrenin altındadır. Homojen barajlarda, baraj gövdesine boşluk suyu basınçlarını engellemek için gerekli yerlere drenler yerleştirilmeli ve sızma hattının mansap şevine uzaması önlenmelidir. Bu barajlarda geçirimsiz çekirdek teşkil edilmediği ve nispeten küçük kayma mukavemetine haiz olduklarından dolayı şev eğimi yatık olur.

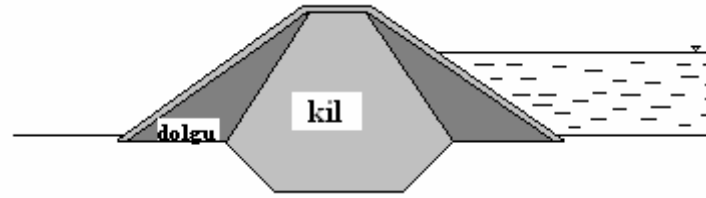
Zonlu tipte, baraj gövdesinin düşey doğrultuda bir kısmı geçirimsiz ve onu takip eden kısımları değişik permeabilitedeki bölümlerden oluşur. Gövde kesitinin merkez bölgesinde ince geçirimsiz bir çekirdek olan barajlar, merkez çekirdek tipli ve geçirimsiz çekirdeği eğimli olan barajlar, eğimli çekirdek tipli olarak adlandırılırlar. Zonlu barajlarda, geçirimsiz zon merkezde olup memba ve mansaba doğru geçirimsizliği gittikçe artan zonlar onu takip etmektedir. Permeabilite katsayılarının ve malzeme derecelenmesinin ani değişmesini önlemek için geçirimsiz çekirdeğin her iki tarafına ya yarı geçirimli zonlar ya da filtreler yerleştirilir ve bunları daha geçirimli malzemeler takip eder. Zonların bu şekilde ardışık yerleştirilmesi sonucu boşluk suyu basıncı azalır, sızma hattı alçalır ve kayma gerilmesi yüksek malzemelerin kullanılması ile de barajın emniyeti artar.

Geçirimsiz perdeli (diyafram) barajlar genelde geçirimli malzemenin çok olduğu, geçirimsiz malzemenin çok kısıtlı olduğu durumlarda yapılır. Baraj gövdesi geçirimli malzemenin, memba şevi ise yüzeyine serilen kilden teşkil edilen geçirimsiz bir kesitten oluşmaktadır. Diyafram düşey veya eğik bir şekilde yerleştirilebilir. Baraj gövdesinin tamamına yakını kayma gerilmesi yüksek malzemenin yapıldığı için diğer dolgu barajlara göre daha dik şevler oluşturulur. Fakat farklı oturmalarından dolayı

geçirimsiz tabakada çatlaklar oluşabileceği için baraj minimum oturma yapacak şekilde tasarlanmalı ve uygulanmalıdır.



a) Homojen tip



b) Zonlu tip



c) Geçirimsizlik perdeli tip

Şekil 2.1: Silindirle sıkıştırılmış toprak dolgu baraj tipleri

2.2.1 Toprak Dolgu Gövdeler

Toprak dolgu gövdeli barajlarda kabuk zonları toprak, kum, çakıl (nehir alüvyonu, teras depozitleri) ve benzeri nispeten ince daneli malzemelerden oluşturulur.

Toprak dolgu gövdeler merkezi çekirdekli veya eğik çekirdekli olabilir. Kil çekirdeğin memba ve mansap yüzlerinde kabuk dolgularının belirlediği tipte filtreler öngörülür. Çekirdeğin her iki tarafında çekirdeği destekleyen kabuk dolguları yer

almaktadır. Eğer merkezi kil çekirdek ince olarak projelendirilmiş ise, mansap Şevi biraz daha az eğimli dzenlenebilir.

Memba kabuk dolgusu yarı geęirimli olduđu zaman, rezervuarın ani seviye dűűűlerine karŐı yatay drenler tertip etmek gerekebilir. Mansap kabuk dolgusu yarı geęirimli ise, kaba filtrenin mansabında bir dűűey dren yer almalıdır. Mansap kabuk dolgusu altında teŐkil edilecek yatay dren zeminden ve filtrelerden sızacak suları mansaba geęirecektir. Bu yatay dren yamaçlarda da öngörűlmelidir.

Kabuk dolguları altında bulunan alűvyon, benzer nitelikte malzeme olduğu ięin genellikle kaldırılmaz. Yamaçlarda, yamaç molozu sağlam kayaya kadar sıyrılır. Yine yamaçlarda bulunan kum ve ęakıl altında uygun olmayan (yamaç molozu, diğer gevsek zemin tipleri vs.) formasyonlar yoksa yine olduğu gibi bırakılır. Bunların yűzeyi dolgu yapılmadan önce dűzeltilerek sıkıŐtırılmalıdır.

2.2.2 Kil ekirdek

Toprak dolgu barajlarda geęirimsiz kil çekirdek zonunda kullanılan malzemenin seęiminde, kil malzemenin aŐađıdaki kriterler dahilinde olmasına özen gűsterilir.

- Dane özgül ađırlıđı 26 KN/m^3 'den kűçük olmalı,
- Maksimum kuru birim ađırlık 16 KN/m^3 'den bűyűk olmalı,
- Optimum su muhtevası % 15-20 arasında olmalı,
- Likit limit % 40-50 arasında olmalı,
- Plastisite indisi 14-20 arasında olmalıdır.

Kret seviyesinde kil űst geniŐliđi minimum 4 metre alınır. Temel seviyesinde ana formasyona oturan kil geniŐliđi ise yűkseklіđin %50'sinden az olmamalıdır.

Dođal temel zemininde teŐkil edilen kazı (cut-off) hendeđinin taban geniŐliđi 10 metre alınmalıdır. Derin alűvyonlarda teŐkil edilen pozitif cut-off'larda kil çekirdek cut-off taban geniŐliđi; geęirimsiz dođal zeminde minimum 10 metre olarak teŐkil edilir. Dolgu barajlarda geęirimsiz çekirdek zonu genellikle merkezi kil çekirdek olarak

tasarlanır. Tasarım sırasında yapılacak olan stabilite sonuçlarına ve kabuk dolgu malzeme özelliklerine göre kum çakıl dolgu barajlarda minimum memba ve mansap kil sevi 1/1 'd i r.

Geçirimsiz kil dolgu zonu, kil malzemesinin özelliğine göre baraj tipi keçi ayağı silindiri ile veya vibrasyonlu silindiri 15-30 cm tabakalar halinde optimum su içeriğinde sıkıştırılır. Kuru arazi birim hacim ağırlığının laboratuvarında normal proktor deneyi ile bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlığı oranı %98'in altına düşmemelidir. Kil dolgu malzemesi; her türlü bitkisel toprak ve bitki köklerinden arındırılmış olmalıdır.

2.2.3 Toprak Dolgu Barajlarda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Diğer mühendislik yapılarındaki gibi barajların projelendirilmesi, ön etütleri ve analitik çalışmaları ihtiva eder. Dolgu barajların en belli başlı avantajlarından biri bölgede mevcut tabii yapı malzemesinden doğrudan doğruya istifade etmektir. Bu nedenle temel ve dolguda farklı statik ve dinamik yüklere ve değişik iklim şartlarına maruz kalan ve malzeme olarak kullanılan zemin tiplerinin, suda eriyen bileşikleri ihtiva etmemesi yanında jeolojik ve zemin mekaniği esaslarına göre istenen özellikte bulunması da gerekir. Çizelge 2.1, 2.2, 2.3'de yapı malzemelerinin karakteristik değerleri verilmektedir (Striegler, 1969).

Çizelge 2.1: Kohezyonsuz baraj yapı malzemesinin fiziki özellikleri

Malzeme	Dane birim hacim ağırlığı (KN/m ³)	Permeabilite (m/s)	Sıkıştırma sayısı x10 ⁴ (KN/m ²)	İçsel sürtünme açısı (°)
Keskin kenarlı taş	26,4-26,5	>10 ⁰	15 - 30	40°
Üniform çakıl	26,5	10 ⁰ - 10 ⁻²	10 - 20	35° - 40°
Çakıllı kum	26,5	10 ⁻¹ - 10 ⁻²	8 - 15	33° - 36°
Çok ince kum	26,4-26,7	10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻²	4 - 8	30° - 34°
Üniform	26,5	10 ⁻³ - 3.10 ⁻³	5 - 10	33° - 36°

Çizelge 2.2: Kohezyonlu baraj yapı malzemesinin fiziki özellikleri

Malzeme	Dane iriliği (%)	Dane birim hacim ağırlığı (KN/m ³)	Su alma kabiliyeti (%)	Permeabilite (m/s)	İçsel sürtünme açısı (°)	Kohezyon (KN/m ²)
Lem	4-20	26,8-27,4	40-70	10 ⁻⁸ – 10 ⁻¹⁰	25° - 33°	15-30
Lös	2-10	26,5-26,7	40-60	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁸	24° - 30°	10-20
Löslü Lem	5-20	26,7-27,0	40-60	10 ⁻⁸ – 10 ⁻⁹	24° - 28°	15-30
Kil	>50	>27,0	>80	<10 ⁻¹⁰	<15°	>50

Çizelge 2.3: Dolgu malzemesinin sınır değerleri

Malzeme		Kuru ağırlığı (KN/m ³)	Optimum su muhtevası	Dane birim hacim ağırlığı (KN/m ³)	Boşluk oranı
Çakıl	İyi tabakalı	21,0–22,5	0,06–0,04	26,5–26,7	0,26–0,18
	Kütlü tabakalı	19,0–21,0	0,10–0,05		0,40–0,26
	Üniform tabakalı	18,0–19,0	0,12–0,08		0,47–0,40
Kum	İyi tabakalı	18,0–20,0	0,12–0,08	26,5–26,6	0,47–0,32
	Kütlü tabakalı	18,0	0,08		0,47
	Üniform tabakalı	17,0–18,5	0,05–0,08		0,56–0,43
Lem		17,0–18,5	0,18–0,13	26,5–27,0	0,58–0,36
Lös		17,5–19,5	0,17–0,10	26,8–27,4	0,65–0,40
Killi Lem		15,0–17,5	0,27–0,16	26,9–27,5	0,88–0,80
Kil		15,0	0,25	27,0–27,8	0,50

Çizelge 2.4: Serbest basınç dirençlerine göre killerin kıvamı

Kıvam	Serbest basınç direnci (KNf/m ²)
Çok yumuşak	<25
Yumuşak	25 - 50
Orta	50 - 100
Katı	100 - 200
Çok Katı	200 - 400
Sert	> 400

Baraj gövdesinin oturacağı zemin özellikleri ve yapısı, bölgenin topografik durumu, dolguda kullanılacak malzemenin bulunabilirliği gibi faktörler sürekli değişiklikler göstereceği için toprak dolgu barajların imalatını standart çözüme kavuşturmak mümkün değildir.

2.2.4 Dolgu Malzemesinin Deprem Açısından Değerlendirilmesi

Dolguların çoğunda rastlanan özellik, dolgu malzemesinin ve temel zemininin kil olmasıdır. Dolguların çoğu düşük ya da orta plastisiteli killi malzemedir ve şevlerin farklılıklarına ve yapımındaki standardı kontrol edilmeyen kompaksiyon metotlarını göz önüne alarak, stabilitelerinde ana faktörün killi zemin olduğu sonucuna varılabilir. Dolgu malzemelerin killi oluşu sarsıntı sırasında çok az mukavemet kaybına uğramasına sebep olur.

Göçmüş ve hasar görmüş dolguların çoğunun kumlu zeminlerden oluştuğu bulunmuştur. Killi zeminlerle inşa edilmiş dolgularda, tam bir göçme yoktur. Merkez üssünden kısa mesafelerde bile, killi zeminlerden oluşan dolgularda tam bir göçme gözlenmemiştir. Ama merkez üssünden büyük mesafelerde, kumlu zeminlerden oluşan göçmüş dolguların sayısı çoktur. Bunların sonucu olarak kuvvetli sismik yükleme şartlarında killi zeminlerden yapılan dolguların stabilitesi yüksektir denilebilir. Killi zeminlerden yapılmış ve kaya temel üzerinde duran barajlar 8.25 şiddetinde, 0.35 ile 0.8g arasında ivmesi olan kuvvetli sarsıntıya büyük bir hasar olmadan dayanırlar.

Büyük kohezyonsuz malzemelerden (kum) oluşan büyük gövdeler eğer doygunsa, deprem sırasında mukavemetinin çoğunu kaybedebilirler ve istenilmeyen davranışlar gösterebilir.

Doygun konozyonsuz zeminlerden yapılmış barajlar, güçlü sarsıntıya maruz olduklarında göçmenin ya da hasarın ana sebebi; dolguda boşluk suyu basınçlarının oluşmasıdır. Bu boşluk suyu basınçlarının sonucu mukavemette düşüş olur. Hassas killer de dolgu malzemesi olarak kullanılacaksa çok dikkatli olunmalıdır. Deprem sarsıntısı sırasında onlarda da büyük mukavemet düşüşleri yaşandığı bilinmektedir.

Şekil değiştirmeye eğilimi az olan, az plastik killer kullanılmalıdır. Plastik killerden teşkil edilen şevlerde deprem sırasında sadece çekme çatlakları oluşur. Kumda bir miktar bel verme olur ama sağlam bir taban üzerine oturuyorsa şevler kaymaz. Aksi takdirde kaymalar olur.

Çok dik şevler eğer zayıf, gevşek kayalardan ve löslerden oluşuyorsa depremden çok zarar görürler. Sıvılaşma olabilir. Gevşek, doygun kum çökelekleri ve kaya döküntüleri deprem sırasında sıvılaşır. Kohezyonsuz, kuru ve gevşek durumdaki maddeler sarsıntıda yatay hale gelirler. İyi sıkıştırılmış, kohezyonsuz, kuru veya doygun durumdaki dolgular depremden etkilenmezler. Yumuşak, plastik olmayan, az plastik siltler depremden sıvılaşır. Kilden oluşan yatay şevler, dolgu altındaki kil çökelekleri depremden stabildir. Dolgunun altındaki kil tabakası, şevlerde gevşek kumla beraberse kayma olur. Sonuç olarak depremlerde dolgularda iki tip davranış gözlenir:

- Gevşek ve orta sıklık arası kumlu dolgularda çevrimsel yüklemekten dolayı boşluk suyu basıncı artışına eğilim varsa, boşluk suyu jeolojik yüke eşit olur, kayma mukavemetinde azalmalar ve sonuçta göçmeye kadar varan büyük hareketler olur.
- Sıkışmış killerde, killi kumlarda ve sıkı kumlarda boşluk suyu basıncı artışı fazla olmaz, çevrimsel birim deformasyonlar küçüktür ve malzeme statik drenajsız kayma mukavemetini korur. Sonuçta depremden sonra az deformasyon olur.

2.3 Küçük Toprak Dolgu Barajlar

Küçük bir barajın yapımında tek çeşit malzeme kullanılmışsa sızan suların mansap seviyeden dışarı kaçması kaçınılmazdır. Sızma hattı mümkün olduğu kadar alçakta tutulur. Çünkü doymuş malzemelerin yıkılmaya karşı bir dayanımı bulunmaktadır. Tabana yakın bir sızma hattı, düz şevler tasarımıyla ve toprağın iyi bir şekilde sıkıştırılmasıyla oluşturulabilir. Yüksek barajların tasarımı daha karışık olmakla birlikte 6 m' den yüksek barajların stabilitesini sağlamak için küçük açılı şevler oluşturulmalıdır. Fazla dik olmayan barajlar için ise daha dik şevler yapılabilir. Barajların yükseklikleri arttıkça şev eğimleri azalmaktadır. Şev eğimlerinin azalması sızma hattının izin verilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlar. Ek olarak güvenliği sağlamak için kret genişliği de artırılır. Yüksekliği 10 m' ye kadar olan barajlar için bazı tasarım ilkeleri aşağıda verilmiştir. Kullanılan kil malzemeler aşağıdaki özellikleri taşımalıdır:

- Sıkıştırıldığında geçirimsiz olmalıdır.
- Doymuşturulup sıkıştırıldığında iyi bir kesme dayanımına kavuşmalıdır. Bu şekilde daha dik şevlere izin verilebilir ve böylece yapım masraftan azaltılır.
- Doymuşturulup sıkıştırıldıktan sonra daha fazla sıkışmasına izin verilmemelidir. Böylece haznenin ilk kez dolması sırasında borulanma tehlikesi azaltılır.
- Kolayca sıkıştırılabilir. Uygun su içeriğine getirilmelidir. Uygun su içeriği zeminin birim hacim ağırlığının en fazla olduğu değerdir.

2.3.1 Homojen Barajlar

Homojen barajların bünyesinde % 20-30 arasında kil, kalan kısımlarında ise dengelenmiş silt, kum ve çakıl karışımı bulunur. Birleştirilmiş zemin sınıflandırılması göre GC, SC, CL, CH sınıfındaki zeminler tercih sırasında seçilebilir.

Çoğunlukla homojen barajların yükseklikleri azdır ve belli değerler ile sınırlandırılmıştır. 6 m'den yüksek barajlarda zonlu (parçalı) gövde önerilmektedir. Çünkü haznedeki olası bir ani boşalma sonucunda su seviyesi günde 100 mm'den fazla

düŖebilir. Küçük barajlar bu gibi gereksinimleri çoğunlukla karşılayamazlar. Birleştirilmiş zemin sınıflandırılmasındaki çeŖitli zeminlere göre bazı Ŗev eğimleri çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5: Homojen barajlar için Ŗev eğimleri

Baraj yüksekliği(m)	Konum	Eğim			
		GC	SC	CL	CH
≤ 3	memba	2,5:1	2,5:1	2,5:1	3:1
	mansap	2:1	2:1	2:1	2,5:1
3 - 6	memba	2,5:1	2,5:1	2,5:1	3:1
	mansap	2,5:1	2,5:1	2,5:1	3:1
6 - 10	memba	3:1	3:1	3:1	3,5:1
	mansap	2,5:1	3:1	3:1	3:1

2.3.2 Zonlu Barajlar

10 m' den yüksek zonlu barajların tasarımındaki bazı etmenler farklılık göstermektedir. Geçirimsiz kil çekirdek, uygun kil karışımlarından teşkil edilmelidir. Eğer birleştirilmiş zemin sınıflandırması kullanılmışsa kil çekirdekte, tercih sırasına göre GC, SC, CL ve CH sınıfındaki zeminler bulunmalıdır. Kil çekirdeğin taban genişliği baraj yüksekliğinden az olmamalıdır. 3 m' den yüksek barajlarda kret genişliği de 3m' den az olamaz. Ayrıca kil çekirdek, çekirdek hendeği ile geçirimsiz bir şekilde birleştirilmelidir. Dolguda geçirimli malzeme kullanılmalıdır. Tercih sırasına göre GW, GP, SW ve SP sınıfı zeminler uygundur. Bu dört malzemeden herhangi biri kullanıldığında memba ve mansap Ŗevleri 2:1 olmalıdır. Çekirdek ve dolgudaki malzemeler uygun su içeriğinde ve iyi sıkıştırılmış olmalıdır. Baraj sağlam bir temel üzerine inşa edilmelidir.

2.3.3 Geçirimsizlik Perdeli Barajlar

Geçirimsizlik perdesi baraj, sahası yakınındaki kullanılabilir kil miktarının sınırlı olması durumunda yapılabilir. Baraj gövdesi; kum, çakıl, kaya (GW, GP, SW, SP) gibi

geçirimli malzemelerden yapılır. İnce bir tabaka halinde memba şevine serilen kil, geçirimsiz bir kesit oluşturulmasını sağlar. Geçirimsizlik perdesi için fazla plastik olmayan killer ve kumlu kil karışımları (GC, SC, CL) tercih edilebilir. Bu karışım % 12-40 oranında kil içermelidir. Su içeriği ayarlanan bu malzemeler kullanılırsa daha fazla plastik killere göre yapıdaki değişikliklerle karşılaşma olasılığı azalır.

2.4 Katı Atık Depolama Tesisleri

20 y.y'ın ortalarına kadar hemen hemen tüm atıklar, kontrolsüz biçimde açık alanlara boşaltılmaktaydı. Hacmi azaltabilmek için atıkların yakılması sıkça rastlanılan bir uygulama idi. Atıklar önceden doğal topografyası uygun olan sahalara vahşi ve açık şekilde boşaltılmaktaydı. En çok kurumuş akarsu yatakları, taşkın havzaları ve ender de olsa terk edilmiş maden işletmeleri gibi yerler tercih edilmişlerdi. II. Dünya savaşının ardından "Sihhi Atık Depolama" uygulamalarının ilk örnekleri verilmeye başlanılmıştır.

2.4.1 Katı Atık Depolama Tesislerinin Amaçları

İnsan ihtiyaçlarının günden güne artması, teknoloji gelişiminin doğurduğu endüstriyel aktivitenin artmasıyla beraber tüketim sonucu ortaya çıkan atıkların çevreye verdiği zarar ve bu atıkların çevreyle bağının koparılmasının zorunluluğunu doğurmuştur. Atıkların zemini, yeraltı suyunu ve çevreyi kirletmemesi amacıyla tasarlanan katı atık depolama tesisleri son yıllarda ülkemizde de yaygın olarak uygulanmaya başlanılmıştır

Katı atık depolama tesislerinin içinde "çöp suyu sızıntısı" oluşup, oluşamayacağı katı atık depolama üniteleri için en sık akla gelen sorulardan biri olmaktadır. Burada tesisin içinde, çöp suyu sızıntısının oluşum mekanizmasının özelliklerinin iyi bilinmesi gerekliliği vardır. Tesisin, ekolojik dengeye ve yeraltı suyu kalitesine etkisinin başlıca nedenlerinden birinin bu tip gaz ve sıvı oluşumları olduğu belirtilmektedir. Tesisten sızıntı oluşumu, ani boşalmalar sebebiyle olabileceği gibi beklenen bir yayılmanın uzantısı olarak da ortaya çıkabilmektedir. Bu tür yayılmaları engellemek ve tesisi tecrit

edebilmek için şilte tipi geçirimsizlik sağlayabilecek engel tabakaları kullanılabilir.

Şilte tabakalarının işlevi geçirimsizliği sağlamak olmasına rağmen, hiçbir şilte tabakasının, oluşan kimyasallara karşı kesinlikle geçirimsiz diye nitelendirilmesi mümkün olamamaktadır. Tesisin içinde atıkların kimyasal bozulmaları sonucunda serbest kalan kimyasallar, kendilerine engel oluşturmak için teşkil edilen şilte tabakalarından advection ve difüzyon yolu ile geçmeye çalışmaktadırlar. Bir katı atık depolama tesisinden sonsuz zaman aralığı içinde, bünyesindeki kimyasalların sebep olduğu sızıntıyı geçirmemesi gibi idealize bir amacı gerçekleştirmesi beklenmemelidir.

2.4.2 Çöp Depolama Alanları Seçimindeki Kriterler

Sanayileşmiş ülkelerin çoğunda zemin ve yeraltı suyu kirliliğinin nedeni belediyelerin atık depolama sahalarıdır. Atık boşaltım alanının dizaynı çevresinde, çevre sızıntılarının ve atıkların izolasyonunu eniyilemek ve böylece halk sağlığındaki riski en aza indirmek oldukça önemlidir. Uygun arazi seçimi, dolgu alanı tasarımında önemli bir yer tutar. Dolgu alanı tasarımında, dizayn ve yapım arazi seçiminden sonra gelir. Dizayndaki ilke, alanın çevresel geoteknolojisi ve yapılabirliğidir. Bunu deponi alanının mukavemeti, stabilitesi ve geçirimsizliği izlemektedir.

Günümüze kadar depolama alanı seçiminde çevreci bir yaklaşımla konuya eğilimmemiştir. Seçilen deponi alanlarının doğal yapıya karşı oluşturabileceği etkilerin sonucu olarak olumsuz etkiler kendini göstermektedir. Bu tür olumsuz etkilerin önlenmesi için yer seçimi teknikleri geliştirilmiştir. Seçilecek depolama alanlarının olumsuz etkilerinin ortaya çıkarıldığı çalışmalar sonucunda düzenli depolama için uygun alan belirlenmeye çalışılır. Çalışmalar sırasında depolama alanlarının kapasitelerinin gözönünde bulundurulması uzun vadeli alan ihtiyacını azaltabilir.

Dünyadaki değerlendirilebilir arazilerin hızla azaldığı düşünülürse depolama alanlarının verimli kullanılması oldukça önemlidir. Seçilen alan üzerine depolama ünitesi inşaa edilirken kirlenmeyi minimum düzeye indirgeyen bir sistem seçilmelidir.

Düzenli depolama planlamasında temel amaç, depolama alanının çevre peyzajına uyum sağlayacak şekilde kullanıma verilmesidir. Dolgudan sızan yağışların oluşturduğu yıkama nedeniyle yeraltı ve yerüstü suları kirlenebilmektedir. Bu nedenle çevredeki suların sürekli olarak kontrol edilmesi, depolama alanlarının yeraltı su havzalarının ve zemin sularının toplama sınırları dışında yer alması gereklidir. Çünkü bunlar zamanla artan oranda su kirliliklerine yol açmaktadır. Depolama alanında oluşacak gürültünün planlama aşamasında gözönüne alınarak, çevrede gürültü engelleri veya geniş bir bandın ayrılması gerekmektedir.

Uygun depolama alanı seçiminde dikkate alınacak parametreler şu şekilde özetlenebilir:

- Meskun alanlara olan uzaklık,
- İçme ve kullanma suyu toplama alanlarının durumu (Deponi tabanı tabii yeraltı suyunun maksimum seviyesinden en az 1 metre yüksekte olmalıdır),
- Çevredeki yeraltı suyu hareketi,
- Jeolojik, geoteknik ve hidrojeolojik yapı,
- Çevredeki çığ, taşkın, heyelan ve erozyon riski,
- Tektonik yapı,
- Çevredeki trafik durumu,
- Depolama alanının çevreden görünüşü,
- Depolama alanının depolanma kapasitesi,
- İklim özellikleri itibari ile aşırı derecede metan vb sızıntı suyu üretecek bölgelerden kaçınma zorunluluğu gibi faktörler dikkate alınmalıdır.

Katı atıkların kontrolü yönetmeliğinde, çöp depolama sahalarının en yakın meskun bölgeye olan uzaklığı 1000 metre olarak verilmiştir. Dünya Sağlık Teşkilatı standartlarında ise bu değer minimum 2000 metre mesafeye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca taşkın riskinin yüksek olduğu yerlerde, heyelan, çığ ve erozyon bölgelerinde, içme, kullanma ve sulama suyu temin edilen yeraltı suları koruma bölgelerinde çöp depolama alanlarının kurulamayacağı hükme bağlanmıştır. Bu alanlar işletmeye açıldıktan sonra iskana açılmayacak şekilde planlanır ve etraflarına bina yapılmasına müsaade edilmez (Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 1991).

Çöp depolama alanlarının yer seçiminde; çevre kirliliği, insan sağlığı, işletme maliyetlerinin yanı sıra, projenin geoteknik açıdan uygulanabilirliğinin de incelenmesi gerekmektedir. Seçilecek alanların geoteknik açıdan ön incelenmesi amacı ile çöp depolama alanının;

- Jeolojisi,
- Hidrojeolojisi,
- Topografyası,
- Jeomorfolojisi,
- Kaplama malzemesinin özellikleri,
- Çevresel konular,
- Toprak mülkiyeti,
- Tarım topraklarına ve şehir merkezine uzak-yakın olması hakkındaki bilgiler elde edilerek yerinde yapılan gözlemlerle aday sahaların, heyelan durumu, yeraltı su seviyesi, rejimi, jeolojik yapıya uygun olarak sahada ve çevredeki zeminin tabakalaşma durumu, geçirimsiz tabaka ve kaplama malzemesi olarak kullanılması imkanları bakımından kıyaslanması yapılabilmektedir.

Yer seçimi doğru yapılmamış olan sahaların meydana getirebileceği başlıca olumsuzluklar şunlardır;

- Yeraltı ve yüzeysel su kirliliği,
- Depo gazının meydana getirdiği tehlike ve kirlilikler,
- Görüntü kirliliği,
- Haşere üremesi,
- Çevreye toz ve kötü koku yayılması olarak sayılabilir.

Depolama yeri seçiminde iki önemli zorlukla karşılaşılmaktadır. Bunlar;

- Depolama yerinin büyük bir yeri kapsamaması nedeni ve çevrenin peyzajını bozması nedeni ile uygun yerlerin çok sınırlı oluşu,
- Özellikleri tam olarak bilinmeyen sanayi çöplerinin yaratabileceği etkilerdir.

Depolama alanı seçilirken, bu kriterler dikkate alınmalı, meskun alanlara ve yeraltı sularına zarar vermeyecek olan alanlar seçilmelidir. Zararlı atık sınıfına giren atıklar evsel atıklardan ayrı toplanıp, bertaraf edilmeli veya depolanmalıdır.

Depolama alanının kullanım ömrü önemli bir konudur. Katı atık yönetmeliğinde bir depolama alanının kapasitesi genellikle alan bazında belirtilir. Evsel ve evsel katı atık özelliğindeki atıklar ile bunların atık su arıtma çamurlarını depolamak üzere inşaa edilen depo tesislerinin asgari kapasiteleri, nüfusu 100.000'den küçük olan yerleşim bölgelerinde 10 yıllık depolama ihtiyacını karşılayacak şekilde, nüfusu 100.000'den büyük olan yerlerde 500.000 m³ olarak planlanır (Katı Atık Yönetmeliği, Madde 25).

Dolgu dizaynının emniyeti arazi şartları ile uygunluk sağlamalıdır. Arazi şartları olarak aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Kullanılacak malzemenin arazi şartlarındaki davranışı,
- Kullanılacak metotların tespiti ve düzenlenmesi,
- Permeabilite için gereken sabitler, su muhtevası ve sızdırmazlık malzemesinin sıklığı,
- Seçilecek alanın boyutları.

Tüm yapı malzemeleri ve seçilen metodular için uygunluk kontrol edilmelidir. Malzemenin, ekipmanın ve metotların uygunluğu bu arazi şartları altında test edildikten sonra yapım başlamalıdır. Emniyet kalitesi laboratuvar ve arazi deneylerini kapsamaktadır. Depolama alanları aşağıda verilen şartları kapsmalıdır.

- Düşük permeabiliteli zemine sahip alan seçimi,
- Sızdırmaz malzeme tabakasının yerleştirilmesi ve kontrolü,
- Sızıntı olayının fazları,
- Sızıntı toplama ve dışarı boşaltma veriminin sağlanması.

Depolama yeri seçiminde çevresel etkilere karşı alınacak önlemleri kolaylaştıracak aşağıda verilen bazı ilkelere bağlı kalınmalıdır.

- Depolama yerinin tabanı geçirimsiz ise, taban sızdırmazlığı inşaa yapılmayabilir.

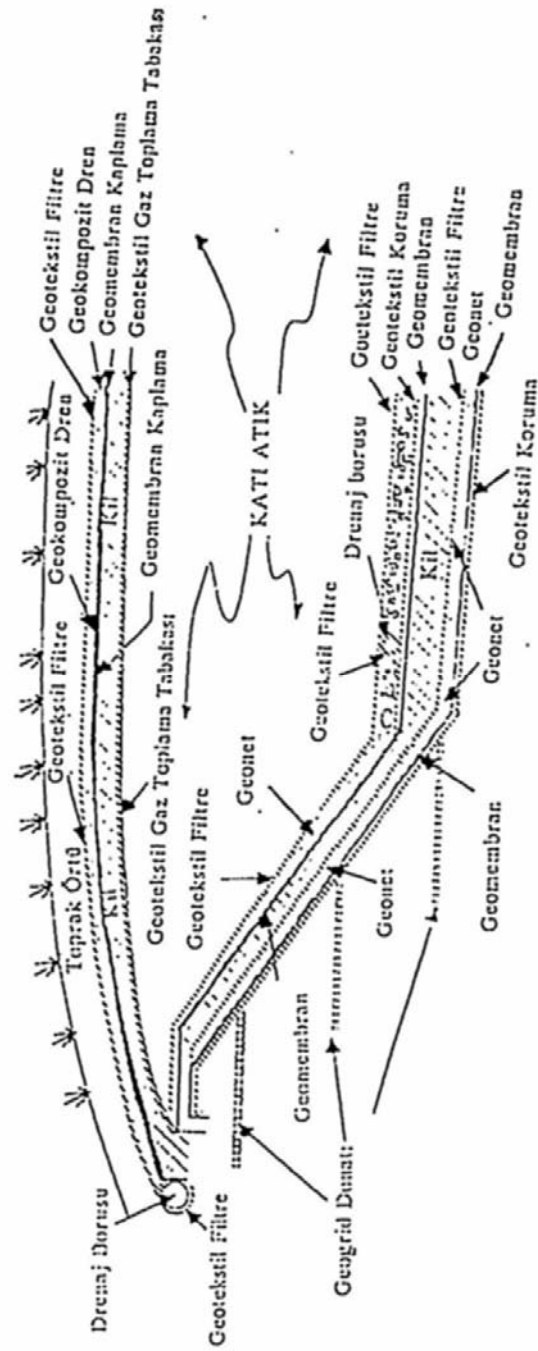
- Sızıntı suyu arıtma tesisine yada alıcı ortama akıtılabilirse, pompajdan kaçınılarak, uzun vadeli işletme giderleri azaltılmış olmaktadır.
- Depolama yerinin meskun yerlerden uzak seçilmesiyle, çevre etkileri gibi faktörlere karşı daha az önlem almak mümkün olabilmektedir. Ancak bu durumda taşıma giderlerinin artacağı gözden uzak tutulmamalıdır.

Bir düzenli depolama alanının maliyetini belirlerken tabaka sızdırmazlığı ve drenaj giderleriyle, işletme sırasındaki doldurma ve sıkıştırma giderlerinin deponi gazı ve sızıntı suyunun zararsız hale getirilmesi masrafları gözönünde tutulmalıdır.

2.4.3 Şilte Sistemleri

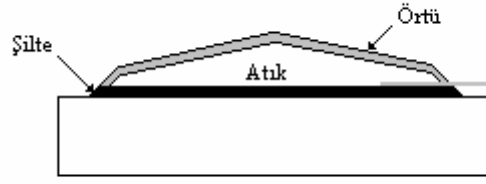
Atık depolama yapılarında temel prensip, atıklardan süzülen kimyasal maddelerin zemine geçmesinin engellenmesi olduğuna göre, katı atık depolarının tabanlarının geçirimsiz bir şilte malzemesi ile kaplanması gerekir. Geleneksel olarak geçirimsizlik amacıyla kullanılan malzeme, çok yüksek emiciliği ve düşük permeabilite özelliğinden dolayı kildir. Son yıllarda polimeri teknolojisinin gelişmesi ile sentetik malzemelerden (geosentetikler vb.) yapılan geçirimsizlik şilteleri de başarı ile uygulanmaktadır (Sharma, 1994). Şekil 2.2, tipik bir katı atık depo tesisinin kesitini göstermektedir. Şilte ve kaplama tabakaları doğal kil malzeme ve polimeri bazlı sentetik malzemelerin kompozit olarak kullanılmasından meydana gelebilmektedir. Sıkıştırılmış kil şilte sistemleri, doğal yapıları itibariyle düşük permeabiliteli malzemelerden oluşmaktadır. Atıklar bu malzemenin içine, üzerine veya hem üzerine hem içine birlikte yerleştirilebilirler. Şekil 2.3, katı atık depo tesislerinin her üç durum için kullanımını göstermektedir.

Doğal kil şilteler, kirletici taşınmasının yavaşlamasını sağlarlar. Atık depo sahasında kirletici hareketin yavaşlatılması amacıyla yeterli kalınlıkta, düşük permeabiliteli, dane çapı dağılımı olarak iyi derecelenmiş malzeme tercih edilmelidir. Ülkemizdeki uygulamalarda tabaka kalınlığı 60 cm'den az olmayan ve permeabilitesi en çok 10^{-8} m/s olan şiltelerin kullanılması zorunludur (Katı Atık Depolama Yönetmeliği,1992).

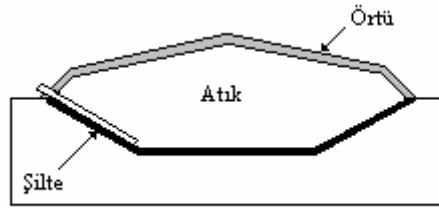


Şekil 2.2: Tipik katı atık depolaması tesisi kesiti

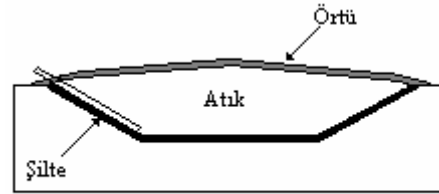
a) Yer seviyesi üstünde katı atık dolgusu



b) Yer seviyesi üstünde ve altında katı atık dolgusu



c) Yeraltında katı atık dolgusu



Şekil 2.3: Katı atık depolama tesisleri

Şiltelerin işlevi, geçirimsizliği sağlamak olmasına rağmen, hiçbir şiltenin atıkların tabanında oluşan kimyasallara karşı tamamen geçirimsiz diye nitelendirilmesi mümkün olmamaktadır. Tesisin içindeki atıkların kimyasal bozulmaları sonucunda serbest kalan kimyasallar, kendilerine engel oluşturmak için teşkil edilen şiltelerden difüzyon yolu ile geçmeye çalışmaktadırlar. Bir katı atık depolama tesisinden sonsuz zaman aralığı içinde, bünyesindeki kimyasalların sebep olduğu sızıntıyı geçirmemesi gibi bir amacı gerçekleştirmesi beklenmemelidir (Sharma, 1994). Düşük permeabiliteli, uygun zeminlerin olmadığı yerlerde eldeki zemin katkı maddeleri ilavesiyle geliştirilebilir. Bu tip şilte malzemelerine örnek olarak bentonit-kum karışımları, zemin-çimento ve zemin-asfalt karışımları verilebilir. Shick ve diğerleri (1994) mevcut tabii zeminin geoteknik

özelliklerini geliştirmek için yaptıkları çalışmada kum-çakıl malzemeye belli oranlarda bentonit ve kaolin katarak yeni bir malzeme elde etmişlerdir. *Bentokies* adını verdikleri bu malzemenin iyi derecelenmiş bir dane çapı dağılımı, özel bir karışım ve yerleştirme sistemi ile permeabilitesi 5×10^{-10} , 10^{-11} m/s seviyesine düşürülmüştür. Bu çalışmaya da kaynak olan malzeme, teknik yararları ve düşük fiyatları sebebiyle evsel ve endüstriyel atıkların depolandığı tesislerin sızdırmazlık şilte tabakasında yaygın biçimde kullanılmaktadır.

2.4.3.1 Doğal Kil Şilteler

Doğal kil şilteler, kil yönünden zengin, doğal yapıları itibariyle düşük permeabiliteli malzemelerden oluşmaktadır. Atıklar, doğal şiltenin üzerine veya içine gömülmektedir. Doğal şilteler normalde önemli miktarda kil mineraline ve 1×10^{-6} – 1×10^{-7} cm/s'den küçük yada eşit permeabiliteye sahip olmaktadır. Doğal şilteler günümüzde, tasarlanmış şilteleri çevreleyen kısımlar olarak kullanılmaktadır. Eski uygulamalarda atık depolama tesisinde sadece doğal şilteler bulunmaktaydı.

Doğal şiltelerin sürekli ortamlar olmamaları, kırıklık düzlemleri, girişimler, çatlaklar ve boşluklar içermeleri nedeniyle, permeabilitelerini uniform tutamamaları, oldukça kritik durumlar oluşturabilmektedir. Doğal şiltenin homojenliğinin ve uniformluğunun sürekliliği, yerel ve bölgesel hidrojeolojik koşulları içeren bir seri araştırma yapıldıktan sonra değerlendirilmelidir. .

Doğal şiltelerin sürekli ve düzenli jeolojik yapıları olduğunu ve permeabilitesinin tüm doğrultularda uniformluk gösterdiğini ispatlamak çok pahalıya mal olmakta ve çeşitli zorlukları bulunmaktadır. Bu nedenle doğal şiltelerin, katı atık depolama tesislerinden ve diğer atık yığınlarından kaynaklanacak kirliliğin yayılmasını engellemek için yalnız başlarına, kullanılmaları önerilmemektedir.

2.4.3.2 Sıkıştırılmış Kil Şilteler

Sıkıştırılmış kil şilteler, bentonit yada sentetik polimer gibi islenmiş, yada prefabrike birimler içerseler de, öncelikli olarak doğal malzemedan yapılmaktadırlar. Kil şilteler ince tabaka parçaları halinde inşaa edilmektedir. Yamaç şevleri, şeve paralel yada yatay tabakalardan oluşmaktadır. Şev eğimi 2.5:1 veya 3:1 den dik olan durumlarda, şeve paralel tabakalar yapılmaması önerilmektedir.

2.4.3.3 Geosentetik Kil Şilteler

Özel yöntemlerle fabrikalarda üretilmektedir. Katı atık depolama tesislerinin şilte ve örtü kısımlarında tecrit ve hidrolik engel olarak kullanılmaya başlanmıştır. Geosentetik kil şiltenin anatomisi iki geotekstil arasına veya tek geomembranın bir yüzüne sıkıştırılarak yapılmış kilden (özellikle bentonit) oluşmaktadır.

2.5 Yapılan Çalışmalar

Taneli zeminler ile bentonit gibi aktif killerin karıştırılıp sıkıştırılması mekanik stabiliteli ve geçirgenliği düşük karışımların hazırlanmasında kullanılan yöntemlerden biridir. Günümüze kadar bu şekilde değişik çalışmalar yapılmıştır. Farklı yapıdaki taneli zeminler, kohezyon özelliği kazandırılmak üzere bentonitin farklı oranları ile karıştırılmıştır. Böylece bentonitin tutucu ve geçirimsizlik özelliği ile taneli zeminlerin tek başına yapamadıkları taşıma kabiliyeti belirlenmiştir.

1995 yılında Pandian ve diğerleri, kum-bentonit karışımı ile ilgili bir çalışma yapmış ve deneysel sıkıştırma eğrilerini normalize etmiştir. Ayrıca likit limit ile bağlantılı olarak basınç ve hacim düzleminde kum-kil parametrelerinin normal sıkışma doğrultusunun eğimini tarif etmiştir.

Bentonit eklenmesi, sadece yüksek plastisite özelliğe sahip numunelerin sıkıştırılma özelliğini önemli ölçüde etkiler. Bu durum başlangıç değişimi ile bileşik tanelerin

dokularının varlığının incelenmesinin bir sonucu olarak tespit edilir. Çünkü her bir tanenin kuru birim hacim ağırlığı değişecek ve bu sayede sıkıştırma parametreleri de değişecektir. Bu yüzden kumlu halden killi hale geçişte bentonit oranının %2'lik değeri başlangıç değer olarak bilinmektedir (Magistris, 1998).

Bentonit artışı likit limit üzerinde lineer bir artış göstermektedir. Bentonit artışı plastik limit üzerinde az bir etkiye sahiptir (Magistris, 1998). Bununla birlikte bentonit oranı %2'yi aştığından zemin sınıflandırması ASTM-D 2487-9 standartlarına göre kuru kilden yağlı kile doğru değişir (ASTM, 1993).

Zemine bentonit eklenmesinin en önemli etkisi, eklendiği zeminin geçirimsizliğinde azalma meydana getirmesidir. Bu, temel olarak bentonitin yüksek minerolojik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yani bentonit su ile karıştırıldığında yaklaşık on katına kadar, iri taneli yapının boşluklarına dolar ve suyun boşluk içerisinden akmasını engeller (Magistris, 1998).

Seed, 1962 yılında sıkıştırılmış kum-kil mineral karışımının şişme potansiyelini belirlemek için bir takım laboratuvar deneyleri yapmıştır. Seed, yaptığı bu çalışmada optimum su muhtevasında kompaksiyona tabi tuttuğu kum-kil karışımlarının şişme potansiyellerini, kil yüzdesi ile ilişkilendiren bağıntılar kurmuştur.

1984 yılında yapılan bir çalışmada Wang, zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan özelliklerle ilgili olarak geçirgenliğin maksimum kuru sıkılık ve optimum su muhtevasına göre değişimini gösteren korelasyon eşitliklerini sunmuş ve sonuçları bir bilgisayar programı olarak elde etmiştir.

Kenney ve diğerleri (1992) yaptıkları laboratuvar çalışmalarında kum-bentonit karışımlarının geçirimsizliğinin, sıkışma su muhtevasına, sistem kimyasına, sistem kimyasındaki değişikliklere bağlı olduğu sonuçlarına ulaşmıştır. Yine Kenney'e göre düşük geçirimli bentonit-kum karışımlarının elde edilmesi, karışımda yeterli bentonit bulunması ve bu bentonitin, karışım içerisinde üniform dağılmış olmasına bağlıdır.

Kum-bentonit karışımlarında kum ve bentonit farklı görevler üstlenir. Kum, hazırlanan karışımın kuruma büzülmesini azaltır. Fakat hidrolik iletkenliğini etkilemez. Hidrolik iletkenliği etkileyen esas unsur bentonittir (Dixon,1987).

Kurumadan dolayı oluşan çatlamların duyarlılığı su muhtevası oranına ve karışımda kullanılan bentonitin miktarına bağlıdır. Bentonit oranı fazla olan karışımlarda su muhtevasının azalması yüzeysel çatlamlara neden olur (Stewart;1999).

Benson ve diğerleri (1994), sıkıştırılmış kil şilteler üzerinde kalite kontrol üzerine yapmış oldukları çalışmalarda seçilecek numune özelliklerini incelemiştir. Bu amaçla seçilecek olan numunenin dane boyutunun arazideki permeabiliteyi yansıtır biçimde olması gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Kullandıkları metod bir tablo vasıtasıyla uygulanmaktadır. Üzerinde kalite kontrol deneyleri yapılacak olan numune boyutu; zemin özellikleri, dane çapı dağılımı ve şiltenin tabaka sayısına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Sıkıştırılmış kil şiltelerin permeabilite dağılımı için Benson (1993), Kuzey Amerika'da 57 atık dolgu şilte sistemi üzerinde yaptığı çalışmada ortalama permeabilite değerinin $2,9 \times 10^{-9}$ ile 1×10^{-5} cm/sn arasında değiştiğini tespit etmiştir.

Benson ve diğerleri (1994), şilte sistemlerinin minimum tabaka kalınlığı üzerine yaptıkları çalışmalarda sıkıştırılmış kil şiltelerde sıvı akışını gözlemlemiştir. Yaptıkları araştırmalar neticesinde geçirgenliğin şilteyi oluşturan tabakalar arasında meydana geldiği ve bunun sebebinin de kalın tabakalarla ağır sıkıştırma koşullarının tabakaları çatlatması olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM GEÇİRİMSİZLİK MALZEMESİ OLARAK BENTONİT

3.1 Giriş

Bugün, bentonit adı verilerek kullanılan malzemeler çok eskiden beri faydalanılmakta olan bir kil türüdür. İnsanların ilk kullandığı ham maddelerden biri killerdir. Temizleme özellikleri, kolay şekillendirilebilmeleri, ısı etkisiyle mukavemet kazanmaları, su geçirmeyen tabakalar oluşturmaları gibi faydaları nedeniyle killer, değişik yöresel adlar altında ilk çağlardan beri kullanılmaya gelmiştir.

Bentonit ilk kez sabun kili olarak 1873'de William Taylor tarafından tanıtılmış, Rock Creek sahasındaki Ford Benton formasyonunun bulunmasıyla *bentonit* adını almıştır. 1874'te aynı özelliğe sahip kil minerali Fransa'nın Montmorillan bölgesinde bulunduğundan bu kil mineraline Montmorillonit adı verilmiştir. Suda hacimli ve jelimsi bir kütle vererek şişmesi ile ayrılan bu yeni kil daha sonra W.C. Knight tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Uygulama alanları hızla arttığından buna paralel olarak da üretimi artmıştır (Çakı, 1995).

Bentonit doğal haliyle yumuşak, suda hemen dağılan, el ile temas ettiğinde yağlı bir izlenim veren özelliktedir. Partiküllerin çok ince ve temas yüzeyinin büyük olması nedeni ile oldukça yüksek su alma gücüne sahiptir. Yağ ve gliserini kolaylıkla emer.

Ülkemizde oluşan bentonit yatakları, göl ortamında oluşan sedimanter ve fay zonlarına bağlı hidrotermal bentonit yatakları arasında ekonomik öneme sahip olanların hepsi kırık sistemlerine bağlı faylar boyunca oluşmuştur ve jenetik olarak hidrotermal kökene sahiptirler. Özellikle Türkiye'nin bentonit rezervinin yaklaşık % 70'i Çankırı bölgesinde bulunur. Güney Çankırı (Hancılı, Büyükhacıköy, Küçükacıköy) bölgesindeki büyük bentonit yatakları Üst Kretase yaşlı ofiyolitlerin Üst Miyosen yaşlı volkanik kayalarla oluşturduğu kontak zonu olan bindirme fayları boyunca meydana

gelmiştir. Kuzey Çankırı (Kurşunlu) bölgesindeki bentonitler Kuzey Anadolu Fay zonu boyunca bölgedeki değişik yerlerde, Tokat-Reşadiye, Çanakkale-Ayvacık, Kütahya-Başören, Eskişehir-Mihalıççık, Ordu-Ünye ve Fatsa bölgelerindeki bentonit yatakları ise fay sistemlerine bağlı olarak gelişmiştir.

Türkiye geniş alanlara yayılmış bentonit yataklarına sahiptir. Bu yatakların büyük bir bölümü ağartma toprağı ve döküm bentoniti kalitesindedir. Kütahya, Ünye-Fatsa gibi bölgelerde bulunan beyaz bentonit; özellikle kağıt, deterjan sanayileri ve yağların arıtılmasında kullanılan kalitedir.

3.2 Bentonitlerin Kökeni ve Oluşumu

Montmorilonit mineralinin baskın olduğu bentonitler, içinde bol camsı gereç bulunan volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal yolla ayrışması sonucu oluşurlar. Camsı gerecin duraysız oluşu, onun hidroliz yoluyla montmorilonite dönüşmesine neden olurken yan ürün olarak ortaya zeolit, silisyumdioksit ve eriyik halinde metal iyonları çıkar.

Bentonitler köken kayanın bileşimine uygun olarak sodyum, kalsiyum ve potasyum montmorilonitler halinde oluşur. En yaygın olarak kalsiyum bentonitlerin bulunması, kalsiyumun sodyum ve potasyumu ornatmış olabileceğine bağlanmaktadır. Kalsiyumun baskın olduğu çoğu hallerde bentonitle değişebilir iyon olarak az miktarda magnezyum bulunur.

Bentonit oluşumu için, çoğu köken kaya durumundaki volkanik külün belli miktarda alkali ve toprak alkali element içermesi gerekir. Eğer volkanik kül çok düşük miktarlarda alkali içeriyorsa uygun koşullarda halloysit ve allofan oluşumu beklenir (Akbulut, 1996).

Bol volkanik cam içeren lav ve tüfler üç yolla kile dönüşür (Millot, 1964):

- 1-Volkanik gaz ve buharların etkisiyle (hidrotermal alterasyon);
- 2-Çökel havzalarının sulu ortamlarında tüf ve volkanik küllerin değişmesiyle (transformasyon, neoformasyon, diyajenelik oluşum);
- 3- Volkanik tüf ve küllerin yağmur, rüzgâr gibi iklim koşulları altında ayrışmasıyla (yüzeysel alterasyon, meteorik alterasyon).

Jeolojik kesitlerde bentonite dönüşmemiş pek çok volkan külü yatakları bulunur. Külün bentonit haline gelebilmesi ancak suyla temas ettiği durumlarda mümkündür. Formasyonda suyun tatlı veya tuzlu oluşu daha önemlidir. Bentonitlerin çoğu marin formasyonu ile ilişkili olduğundan, bu malzemeye dönüşümün deniz suyunda meydana geldiği bir gerçektir (Erdinç, 1976).

3.3 Bentonitlerin Özellikleri

Bentonit killeri beyaz, gri, sarı, kahverengi, koyu pembe, sarımsı yeşil gibi çok değişik renklerde bulunabilir. Bu değişikliğe neden olarak montmorillonitin içerdiği Fe iyonunun iki veya üç değerli olması gösterilebilmektedir. Üç değerli demir içeren bentonitler sarı veya kahverengi olabiliyorken iki değerli demir içeren bentonitler mavi renktedirler. Yataktaki organik maddeler ve su muhtevası da rengi etkiler. Su muhtevasındaki artış bentonitin rengini koyulaştırır (Güngör, 1981).

Bentonit killerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri 100-150° C gibi düşük sıcaklıklarda kaybettiği fiziksel sudur. Killerin yüzeyindeki suyun iki mekanizmayla tutulduğu bilinmektedir. Adsorbe su ve değişebilir katyonların hidrasyonundan ileri gelen su. Birincisi Terzaghi, K.'ya (1948) göre su molekülünün dipol özelliğinden ileri gelir. İkinci neden ise değişebilir katyonların negatif kil yüzeyinden uzaklaşamayıp suyu çekmeleridir.

Montmorillonitin tetraedr katmanındaki Si^{+4} 'ün yerine Al^{+3} , oktaedr katmanındaki Al^{+3} 'ün yerine Mg^{+2} , Fe^{+2} , Zn^{+2} ve Li^{+1} iyonları alabilmektedir. Katyon değişimi

sonunda artı yük eksiği ortaya çıkarır. Bu yük eksikliği ise Na^+ , K^+ , Ca^{+2} iyonlarının su fazından kristal kafesine bağlanmalarıyla giderilebilir. Katyon değişim kapasitesi; 100gram kildeki milieşdeğer Na_2O miktarı olarak ifade edilir. Killerdeki değişebilir katyonlar H^+ , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , dir.

Sıvının akamaya karşı gösterdiği iç direnç *viskozite* olarak ifade edilir. Dışarıdan bünyeye alınan su, dışarıdaki serbest suyun azalmasına bu durumda, bentonit-su karışımı çamurun akmaya karşı bir iç sürtünme ve direncine neden olur. Viskozite basınçla artar, sıcaklıkla azalır. 1 cm aralıklı iki levha arasından akan sıvının akış hızını 1cm/sn arttırmak için gereken güç olarak tanımlanır, birimi santipuz (cp)'dir. Bentonitlerin ortalama viskoziteleri 15 cp civarındadır.

Bentonitlerin ve bentonitik killerin montmorillonit minerallerinden gelen bir tiksotropi özelliği vardır. *Tiksotropik* karakterleri, su içerikleri sabit kaldığı halde basınç ve sarsıntı gibi etkenler karşısında plastisitelerini değiştirebilmelerini, yüksek basınç altında akıcı hale gelebilmelerini sağlar.

Bentonitin en önemli özelliklerinden biri de *kolloidal* özelliğidir. Alüminyum silikatların kimyasal ayrışmasıyla montmorillonit mineraline dönüşmesi sürecinde silisyum ve alüminyum kolloid oluşturur. Yani bunlar 10-100 Angström arasında değişen molekül demetleri halinde dağıtıcı bir sıvı fazında dağılarak yarı saydam-yarı homojen bir karışım oluştururlar. Demir ve manganez oksitleri ise süspansiyon halindeki eriyikten kolloidler çöktürebilir. Sodyum bentonitin suyla karıştırılması sonucu kristal kafesinden ortaya çıkan elektrokimyasal enerji harekete geçerek, katmanların arasına su molekülleri bağlandığı için bentonitin şişme, viskozite, tiksotropi ve diğer kolloidal özelliklerini sağlar. Genelde çökelti miktarının % olarak ifadesidir.

Basınç altında şekil alan ve basınç ortadan kalktığında aldığı şekli koruyan kilin çamur yapma eğilimi *plastiklik* olarak tanımlanır. Sodyum smektitlerde plastik limit 75, likit limit 500; kalsiyum bentonitlerde plastik limit 90, likit limit 160 değerlerindedir.

3.4 Bentonitlerin Kullanım Alanları

Çok boyutlu ve değişik özelliklerinden dolayı, bentonitler çok geniş bir alanda kullanılmaktadır.

Seramik sanayinde bentonit, hamurun plastisitesini geliştirdiği için kullanılır. Bentonit içeren karışımda kurumadan kaynaklanan çatlamlar azalır, kuru mukavemet artar, piştikten sonra olan kırılabilirlik azalır.

Döküm sanayi bentonitlerin çok tüketildiği bir endüstri dalıdır. Bağlayıcı ve ince daneli kolloidal bentonitler kalıplarda kum danelerini bağlamakta kolaylık ve fazla mukavemet sağlar. Refrakter karakterli ve üretim esnasında çıkan çeşitli gazları geçirgen özelliğinden dolayı gazların ortamdan uzaklaşmasını sağlar.

Sondaj işlemlerinde; suya karşı geçirimsiz, yüksek su adsorpsiyonu olan, tiksotropi gösteren, yüksek jel teşkil edebilen bentonitler kullanılır. Sondajcılık sektöründe çok önemli bir maddedir. Bentonit matkap tarafından parçalanmış kaya parçacıklarını sirkülasyon yoluyla yüzeye taşınmasını sağlar. Sondaj esnasında delinen kuyunun cidarında sızdırmaz bir tabaka oluşturarak sondaj suyunun kaçmasını önler. Sondajın durması esnasında jel oluşturarak kırılan parçaların tabana çökerek kuyunun tıkanmasını ve tıjların sıkışmasını önler.

Kağıt endüstrisinde; tamamen kuvarzsız, sodyumlu, ince daneli, beyaz renkli, topraksız, sabun kayganlığında alkali bentonitler kullanılır. Kağıt hamuruna %1 oranında katılırlarsa, pigment, reçine ve balmumunun hamur içinde homojen dağılmasına ve ince bünyeli dayanıklı, temiz yüzeyli kağıdın elde edilmesi sağlanır.

Boya endüstrisinde; yağlı boyalarda, emayelerde, badanalarda, matbaa mürekkebinde renkli ve boyaları adsorbe özelliğe sahip, devamlı süspansiyon oluşturacak kadar ince daneli alkali bentonitler kullanılır.

Yağların renklerinin giderilmesinde; aktif veya asitle aktiveleştirilen bentonitler bu alanda kullanılır. Doğal olarak aktif olan bu bentonitler çok olmadığından genellikle HCl veya M_2SO_3 gibi asitlerle aktiveleştirilirler.

İlaç sanayinde; merhemlerde dolgu maddesi olarak ve kuvvetli ilaçların seyreltilmesinde alkali bentonitler kullanılır. Ayrıca diş macunu yapımında ve kozmetik sanayinde de kullanılır. Bentonit doğrudan temizleyici bir madde olup saf haliyle sabunun % 20-50 'si kadar etkilidir. Bu bakımdan sabun veya diğer temizleyicilerin yapımında da geniş şekilde yararlanır.

Gübre yapımında; bentonit kolloidal özelliği ve kation değişim kapasitesi, bitkinin gelişmesi için gerekli nemin sağlanmasında büyük rol oynar. Bentonit, gübrede çözünen tuzların ortamdan çabuk uzaklaşmasını önler. Sıvı gübrelerin veya süspansiyon şeklindeki gübrelerin yapımında stabilize maddesi olarak kullanılır.

Kataliz olarak; ağır petrol fraksiyonlarının katalitik olarak parçalanmasında alkilasyon, dehidrasyon ve izomerizasyon gibi reaksiyonlarda kataliz olarak kullanılır.

Yangın söndürücülerde; bentonitin yapısında çok miktarda su tutabilmesi özelliğinden yararlanır. Süspansiyon haline getirilen bentonit püskürtülerek yanan bölgelerin hava ile ilişkisi kesilir.

Portland çimentosu yapımında; Portland çimentosuna %1 oranında bentonit ilavesi mekanik direnci artırır, donma süresini azaltır.

3.5 İnşaat Mühendisliğinde Bentonit Kullanımı ve Bazı Özellikleri

Bentonit malzemesi inşaat mühendisliğinde çok su adsorbe etmesi ve su geçirmeyen bir jel oluşturması özelliklerinden yararlanır. Bentonit malzemesi inşaat mühendisliğinde;

- Zemin enjeksiyonlarında
- Diyafram duvarlarda
- Sondajlarda
- Düzenli depolama tesislerinin şilte tabakasında
- Baraj inşaatlarında kullanılmaktadır.

Şişme ve jel oluşturma özellikleri nedeniyle bentonitten, baraj yapılırken su kaçaklarını önlemede yararlanır. İnşaat mühendisliğinde kullanılacak bentonitin çok ince taneli, plastikliğinin ve tiksotropisinin yüksek olması gerekir. Bu alanda kullanılacak bentonitler üç kısım kum veya çakıla bir kısım olarak katılır.

Killi sahalarda yapılacak inşaatların planlanmasında ve inşaatında kil gereçlerinin özelliklerini bilmek çok önemlidir, inşaat işlerinde çok etkili olan bentonitlerin fiziksel özelliklerinin bilinmesi inşaat mühendislerince önem taşır.

Plastiklik, plastik indekslerinin yüksek oluşu nedeniyle bentonitlerin sodyumlu olanlarında sıkıştırılma, yırtılma dayanımı gibi konularda sorun yaratır. Ortamdaki değişimler bu bentonitlerin çeşitli katyonlar soğurmasına yol açarsa özelliklerinin değişmesine neden olur.

Aktivite, bir bentonit örneğinin plastik indeksinin 2 mikrondan küçük bölümünün kuru ağırlık %'sine oranıdır. Bu oran bazı Ca bentonitler için 1.20-1.34; Na bentonitler için 3.14-7.09 arasında bulunmaktadır. Yüksek aktivite değerli killer genelde çok su tutma, yüksek sıkıştırılma, düşük geçirgenlik ve büyük yırtılma dayanımı olan killerdir.

Su emme, sodyum bentonitte 16 saatle % 800'e çıkarken, kalsiyum bentonitte ilk dakikada % 200'e kadar hızlı bir artış gösterdikten sonra birden yavaşlayarak 16 saat sonunda % 200'ün az üzerine çıkmaktadır.

Serbest sıkıştırılma gücü, doğal bir örneğin kopmasına yetecek sıkıştırılma gücüdür. Bu değer sodyum bentonitler için 55.5 psi, kalsiyum bentonitler için 100.3 psi olarak belirlenmiştir.

Yırtılma dayanımı, kopmadan önceki yırtılma basıncı ile ölçülür. Kalsiyum bentonitin yırtılma dayanımı sodyum bentonitten fazla, kaolenden azdır. Yırtılma dayanımı iç sürtünme ve kohezyondan oluşur. Bentonitlerde iç sürtünme illit ve kaolendekinden düşük olmasına karşın, kohezyon onlardan yüksek olup yırtılma dayanımının % 80'ini sağlar. Plastik indeks arttıkça bentonitin iç sürtünmesi azalır.

Duyarlık, doğal serbest bir kilin dayanımının ayrı nem oranında yeniden kalıba dökülmüş gerecinin dayanımına oranı olarak tanımlanır. Bentonitlerin duyarlık değerleri 4-8 arasındadır. Daha yüksek değerli killerde bu rakam 16'ya kadar çıkar. Tiksotropik özelliklerinin sonucu olarak bentonitler dayanımlarına yeniden kavuşurlar.

Geçirgenlik, sodyum bentonitte oldukça düşüktür. Çok az miktarda sodyum bentonit ilâve edilen kumların geçirgenliği büyük ölçüde azalır. Kalsiyum bentonitin ise geçirgenlik üzerinde etkisi daha azdır. Bentonitin geçirgenliği önleme özelliklerinden yararlanılarak baraj ve gölet inşaatlarında, heyelan önleme yapılarının inşaatında, sızdırmazlık perdesi inşaatında, tünellerin yapımında, kazı şevleri ile bina temellerinin desteklenmesinde ve köprü, üst geçit ayaklarının inşaatında "diyafram duvarları" oluşturmada kullanılmaktadır. Diyafram duvarları, bentonit bulamaçlı duvarlardır. Bentonit bulamacı 0,03 - 0,04 t bentonit, 0,08 - 0,35 t çimento ve 0,85-0,9 t su karışımı ile hazırlanır. Kil çimento bulamaçlarında süspansiyondaki toplam çökelti miktarı hacimsel olarak % 4-5'ten fazla olmamalıdır. Plastik viskozitesi 10-20cp, birim hacim ağırlık 10,3-12,0 KN/m³ olmalıdır (Sağlamer ve İncecik, 1985).

Baraj ve göletlerde baraj gövdesi ya da bent gövdesinde kullanılacak gereç kireci az, iç sürtünme açısı yüksek, orta derecede plastik ve şişmeyen cinsten olmalıdır. Simektit killeri baraj ve bent gövdelerinde su ile temas etmeyecek konumda yani çekirdek kısmında dolgu gereci olarak kullanılmalı, zorunlu halde bent gövdesinin ağız kısmında veya freatik seviye üzerinde kullanılmalıdır (Kılıç vd., 1985).

Donma dayanımı, donma kuşağının içinde suyun hareketiyle sağlanır. Bentonitlerin geçirgenliği çok az olduğundan donma dayanımları diğer killerden düşüktür.

Sıkıştırılabilirlik ve pekleşme, yatay sınırlı bir örneğe uygulanan birim ağırlığın artması sonucu örneğin boşluk oranının azalmasına dayanır. Likit limite eşit nem oranındaki sodyum bentonit önce küçük bir basınç karşısında büyük bir hacim küçülmesi gösterir, daha sonraki basınç artışları karşısında ise daha küçük hacim küçülmeleri gösterir. Kalsiyum bentonitte sıkışma miktarı küçük olsa da uygulanan düşük basınçlar altında hacim küçülmesi oldukça fazladır. Bentonitlerde artan ağırlıklar altında pekleşme önce biraz azalır fakat kısa süre sonra ağırlık artışı pekleşme oranını fazla etkilemez.

Zemin iyileştirme, ağır yüke ve iklim koşullarına dayanıklılık kazandırmak için toprak taneciklerinin tutturulmasıdır. Bunun için bentonit gibi şişen killere kireç ilâve edilerek plastiklik indeksleri düşürülür. Zemin iyileştirme konusunda bentonitlere % 8 veya daha çok kireç karıştırmak gerekmektedir.

Kireç, zemindeki taneciklerle kimyasal tepkimeye girerek kalsiyum alüminat ve kalsiyum silikatlar oluşturur, yani çimentolaşmaya neden olur. Kireç söndürülmeden kullanılırsa havanın karbondioksiti ile tepkimeye girerek karbonat oluşturacağından, kirecin söndürülerek kullanılması yerinde olur.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Giriş

Deneyisel çalışmalarda, Buldan Yenicekent bölgesinden getirilen kumun kuru ağırlığının değişik oranlarında bentonit ve çimento ile karıştırılarak hazırlanan numunelerin, geçirimsizlik amaçlı dolguda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bentonit %10, %20, %30 ve %40 oranında kuru kuma karıştırılarak birinci grup karışım; çimento %5 ve %10 oranında kuru kum ile karıştırılarak ikinci grup karışım; bentonit %10 + çimento %5 oranında kuru kum ile karıştırılarak üçüncü grup karışım elde edilmiş ve laboratuvar çalışmalarında karışımlar; kompaksiyon, serbest basınç, lilit limit, konsolidasyon, permeabilite deneylerine tabi tutulmuş, karışımlardaki değişimler gözlenmiştir.

Bu bölüm içinde ilk olarak, deneylerde katkı malzemesi olarak kullanılacak olan bentonit ve çimentonun, ana malzeme olarak kullanılacak kumun bazı özellikleri tespit edildikten sonra karışımlarla ilgili olan deneysel çalışmalara geçilmiştir.

4.2 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

4.2.1 Bentonit

Katkı malzemesi olarak kullanılan, Karakaya firmasının üretmiş olduğu bentonit ile yapılan deneylerde doğal su muhtevasının %8,18, likit limitinin %359,38 olduğu belirlenmiştir. Geoteknik mühendisliğinde, kil minerallerinin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi için kullanılan X-Ray ışını elektron saçımı metodu ile bentonit üzerinde yapılan analiz sonucu çizelge 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1: Bentonitin kimyasal bileşenleri

Bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
%	58,64	15,24	3,96	4,48	2,39	3,22	1,02

4.2.2 Çimento

Deneylerde kullanılan Denizli Çimento'nun ürettiği katkı miktarı %43,62, klinker miktarı %56,38 olan P 32,5 çimentosunun kimyasal bileşenleri çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.2: P32,5 çimentosunun kimyasal bileşimi (Denizli Çimento)

Bileşenler	%
SiO ₂	33,53
Al ₂ O ₃	8,91
Fe ₂ O ₃	4,24
CaO	40,14
MgO	1,93
SO ₃	1,41
Na ₂ O	1,33
K ₂ O	2,23
Cl	0,012
Na ₂ O+0,658 K ₂ O	2,8

4.2.3 Kum

4.2.3.1 Kumun Jeolojik Özellikleri

Deney numunesinin alındığı kum ocağının jeolojisi incelendiğinde; çevredeki yüksek arazilerden yerçekimi, yüzeysel akış ve yan derelerle kısa mesafelerden taşınarak biriktirilmiş kolivyal topraklardan ve Buldan deresinin uzak mesafelerden taşıyıp biriktirdiği depozitlerden meydana gelmiştir. Arazi hafif eğimli (%4) etek arazi pozisyonundadır. Buldan deresi, yağışlara bağlı akmakta olup kum ocağının

kuzeydoğusundan geçmektedir. Bu dere güneydoğudan kuzeybatıya doğru akmakta olup ocağa 150 metre mesafededir. Dere yatağı genişliği 50-75 metre arasındadır.

4.2.3.2 Kumun Sınıfının Belirlenmesi

Deneylerde kullanılmak üzere Yenicekent'ten (DENİZLİ) getirilen, doğal su muhtevası % 0,92 olan kumun sınıfını belirlemek amacıyla granülometri analiz yapılmıştır.

Kum ocağından alınan numune etüvde 105 °C'ta 24 saat bekletildikten sonra eleme işlemi, iki şekilde yapılmıştır. İlk olarak numune kuru olarak elenmiş ve zemin sınıfı birleşik sınıflandırma sistemine göre belirlenmiştir. İkinci olarak kurutulan numune 200 nolu eleğin üzerine konularak yıkanmış ve eleğin üzerinde kil veya silt kalmayınca kadar bu işlem sürdürülmüştür. Daha sonra yıkanan numune etüvde kurutularak elenmiş ve zemin sınıfı belirlenmiştir.

Bunun yapılmasındaki amaç kuru eleme esnasında iri danelerin üzerine yapışan kil veya silt miktarının malzeme sınıfını değiştirecek oranda olup olmadığını incelenmesidir.

Granülometri eğrileri yorumlanırken iki parametreye bakılmıştır:

1. Üniformluk katsayısı;

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.1)$$

2. Derecelenme katsayısı;

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (4.2)$$

C_u : Üniformluk katsayısı

C_c : Derecelenme katsayısı

D_{10} : Malzemenin ağırlıkça %10'nun geçtiği dane çapı

D_{30} : Malzemenin ağırlıkça %30'nun geçtiği dane çapı

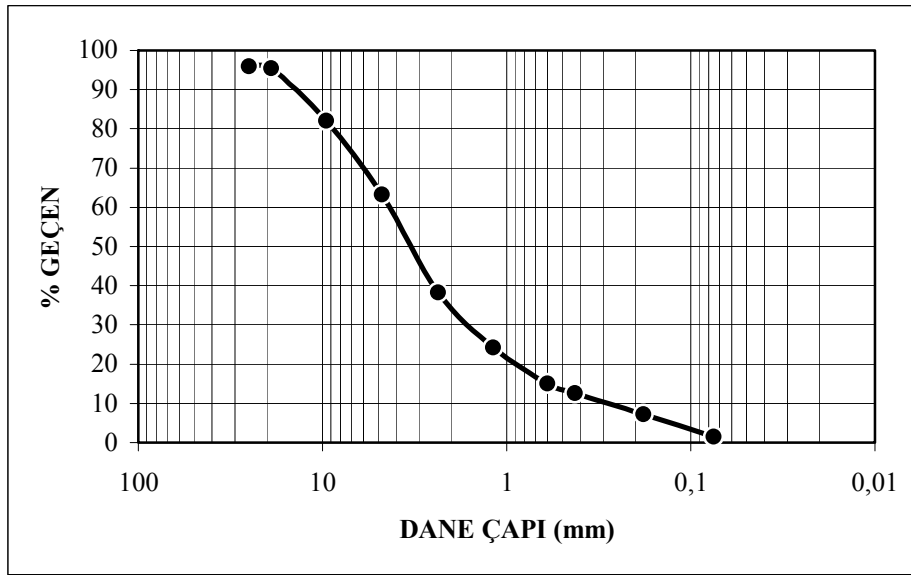
D_{60} : Malzemenin ağırlıkça %60'nın geçtiği dane çapı

Üniformluk katsayısı ve derecelenme katsayısından yararlanılarak malzemenin birleşik sınıflandırma abağındaki sınıfı tespit edilir.

Kuru ve yıkanarak yapılan analize ait veriler çizelge 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'da, malzemeye ait granülometri eğrileri şekil 4.1 ve 4.2'de verilmektedir. Şekil 4.3'de ise kuru ve yıkanarak elenen numunelerin granülometri eğrilerinin karşılaştırılması yer almaktadır.

Çizelge 4.3: Kuru elenen numunenin elekten geçen % hesabı

Numune no				1
Toplam kuru numune ağırlığı(g)				2774,11
Elek no	Elek açıklığı (mm)	Elek üstü(g)	Elekten geçen(g)	% Geçen
1	25	111,41	2662,7	95,98
3/4	19	13,53	2649,17	95,50
3/8	9,5	372,18	2276,99	82,08
4	4,75	524,79	1752,2	63,16
8	2,36	690,56	1061,64	38,27
16	1,18	390,3	671,34	24,20
30	0,6	254,66	416,68	15,02
40	0,425	69,01	347,67	12,53
80	0,18	145,95	201,72	7,27
200	0,075	161	40,72	1,47
		Elek toplamı(g)	2733,39	
		Pan(g)	40,72	



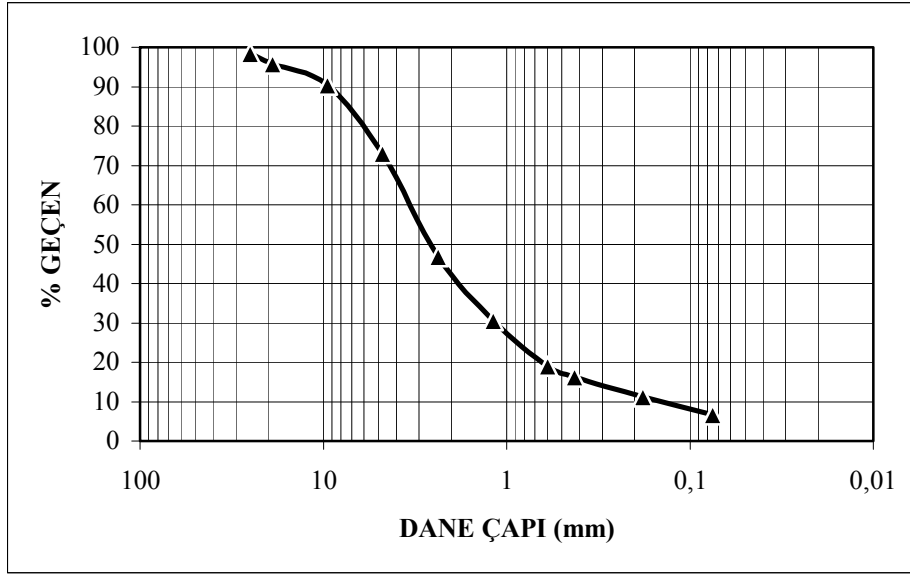
Şekil 4.1: Kuru yapılan analizinin granülometri eğrisi

Çizelge 4.4: Kuru elenen numunelerin zemin sınıflandırılması

Numune no	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c	Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Sınıfı
1	0,26	1,5	4	15,86	2,16	34,33	64,27	1,4	SW

Çizelge 4.5: Yıkılarak elenen numunenin elekten geçen % hesabı

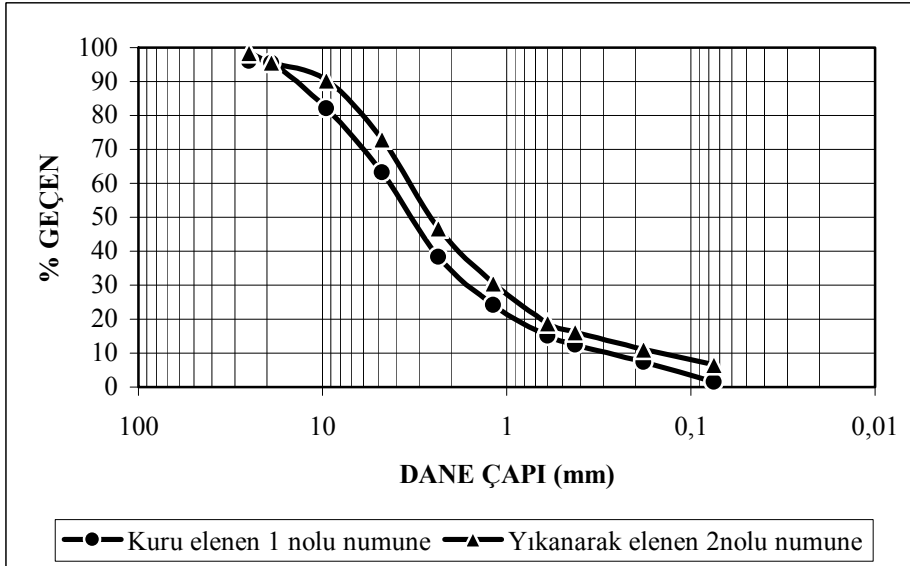
Numune no				2
Toplam kuru numune ağırlığı(g)				2244,24
Elek no	Elek açıklığı (mm)	Elek üstü(g)	Elekten geçen(g)	% Geçen
1	25	35,92	2269,56	98,44
3/4	19	63,03	2206,53	95,71
3/8	9,5	121,11	2085,42	90,45
4	4,75	403,14	1682,28	72,97
8	2,36	603,1	1079,18	46,81
16	1,18	373,21	705,97	30,62
30	0,6	268,94	437,03	18,96
40	0,425	61,82	375,21	16,27
80	0,18	117,62	257,59	11,17
200	0,075	104,75	152,84	6,63
		Elek toplamı(g)	2244,24	
		Pan(g)	152,84	



Şekil 4.2: Yıkanarak yapılan analiz granülometri eğrisi

Çizelge 4.6: Yıkanarak elenen numunelerin zemin sınıflandırılması

Numune no	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c	Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Sınıfı
2	0,17	1,15	3,4	20	2,28	20,4	72,97	6,63	SW



Şekil 4.3: Yıkanarak ve kuru elenen numunelerin karşılaştırılması

Yapılan analizlerde, malzeme sınıfının iki yöntemde de değişmediği ve birleşik sınıflandırma sistemine göre iyi derecelenmiş kum veya çakıllı kum (SW) olarak adlandırıldığı tespit edilmiştir.

Buldan Yenicekent'teki kum ocağından alınan numunenin doğal haldeki granülometrisiyle kullanılacak olması, deneylerdeki katkı malzemesi yüzdesini ve maliyeti arttıracığı için, çalışmaların da incelenmesiyle deneylerde 30 numaralı elekten geçen kısmın kullanılmasına karar verilmiştir. Katkı malzemesi oranını azaltarak ekonomik çözüm sağlanırken, kumun küçülen tane boyutu da istenilen permeabiliteye ulaşmakta kolaylık sağlayacaktır. Yapılan piknometre deneyi sonucunda, deneylerde kullanılacak olan kumun dane birim hacim ağırlığı $26,4 \text{ KN/m}^3$ olarak belirlenmiştir.

4.3 Likit Limit Deneyi

Yapılan araştırmalar ve çalışmaların incelenmesi neticesinde, bentonitin su adsorbe edebilme özelliğinin yüksek olması ve karışımlardaki bentonit oranının likit limitin değişiminde etkin bir rol oynadığı tespit edilmiş ve %10, %20, %30 ve %40 bentonit içeren kum- bentonit karışımlarının likit limit deneyleri yapılmıştır.

4.3.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi

Likit limit deneyleri Casagrande yöntemi ile yapılmıştır. Bu deney esnasında numunelere azar azar su verilerek numuneler yoğrulur ve suyun homojen karışmasına özen gösterilir. Casagrande aletinin tasına bir miktar numune yerleştirilir ve yerleştirme sırasında numunenin içinde hava kabarcıkları kalmamasına özen gösterilir. Tas içine yerleştirilen numunenin yüzeyi yatay olacak şekilde düzeltilir ve tas içine yerleştirilen numunenin en kalın kısmı yaklaşık olarak 1 cm olacak şekilde ayarlanır. Tas içerisine yerleştirilen numunenin ortasından standart oyuk açma bıçağı ile bir yarık açılır. Açılmış olan yarığın tabanındaki kapanma dikkatle izlenilir ve kapanmanın yaklaşık 1 cm olması durumunda çevirme işlemi durdurulur. Bu andaki su muhtevası ve vuruş sayısı (N) tespit edilir. Bu deney her numune için üçer kez tekrarlanır ve elde edilen

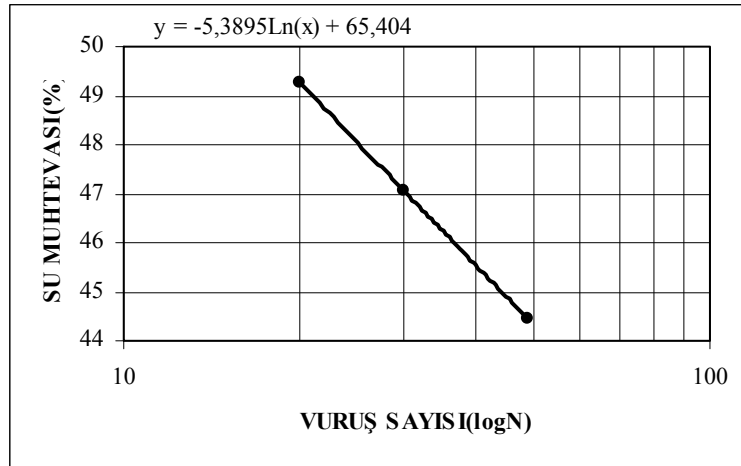
verilerle çizilen eğriden 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası değeri, likit limit olarak tespit edilir.

4.3.2 Bulgular

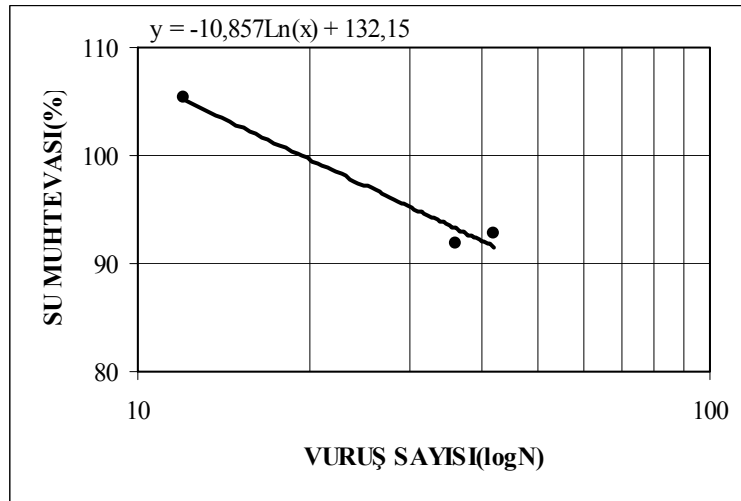
Yapılan deney neticesinde, bentonit oranlarına karşılık gelen su muhtevası değerleri çizelge 4.7’de verilmektedir. Bu bulgular yardımı ile likit limit değerlerini belirlemek amacıyla çizilen grafikler şekil 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8’de görülmektedir.

Çizelge 4.7: Likit limit deneyine ait bulgular

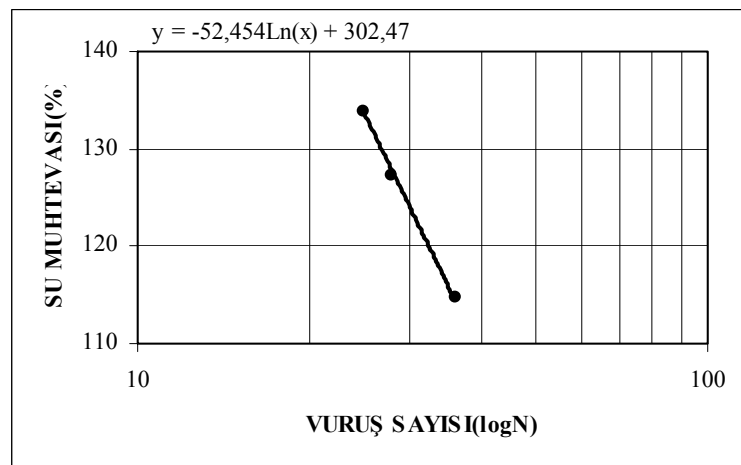
% Bentonit	Vuruş sayısı	Su muhtevası(%)
10	20	49,27
	30	47,05
	49	44,44
20	12	105,35
	36	91,76
	42	92,86
30	36	114,63
	28	127,24
	25	133,93
40	11	185,40
	22	179,28
	38	178,31
100	18	372,84
	23	353,01
	55	343,72



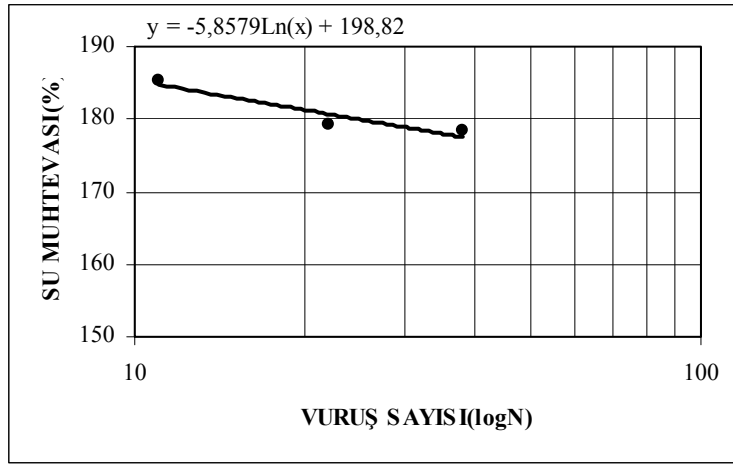
Şekil 4.4: %10 bentonit katkılı karışımının su muhtevası-vuruş sayısı grafiği



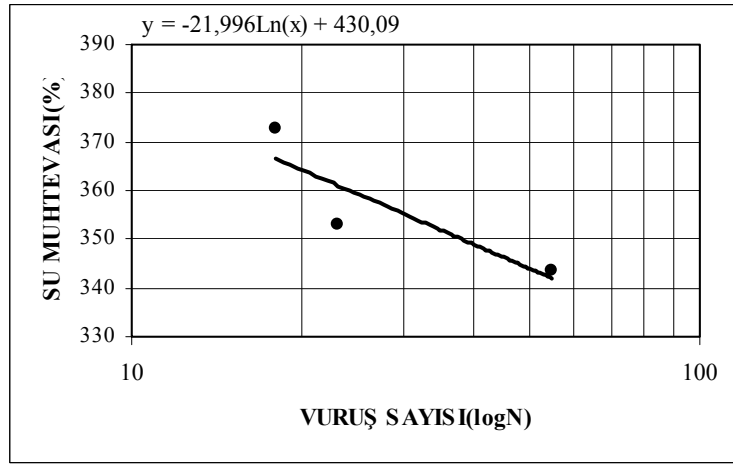
Şekil 4.5: %20 bentonit katkılı karışımının su muhtevası-vuruş sayısı grafiği



Şekil 4.6: %30 bentonit katkılı karışımının su muhtevası-vuruş sayısı grafiği



Şekil 4.7: %40 bentonit katkılı karışımının su muhtevası-vuruş sayısı grafiği



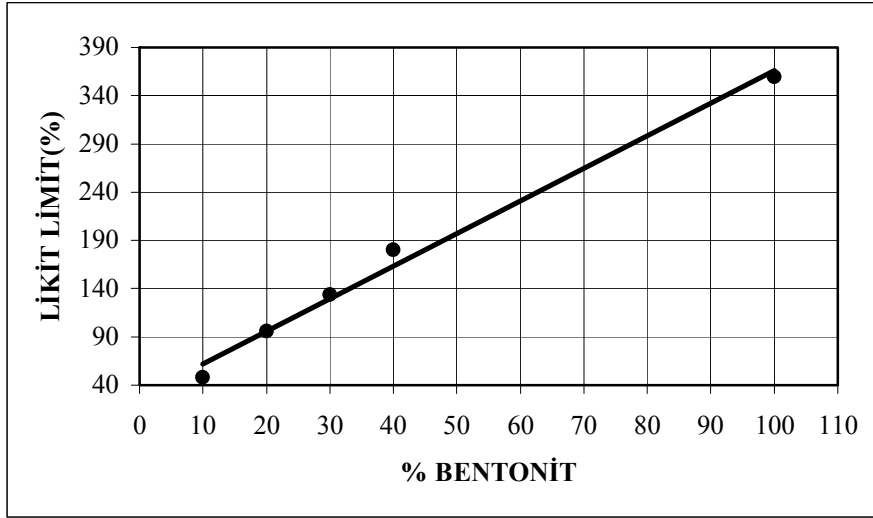
Şekil 4.8: %100 bentonitin su muhtevası-vuruş sayısı grafiği

4.3.3 Likit Limit Deneyi Sonuçları

Şekil 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8'den elde edilen likit limit değerleri çizelge 4.8'de verilmiştir. Likit limitlerin bentonit %'si ile değişimi şekil 4.9'da görülmektedir.

Çizelge 4.8: Karışımlardaki bentonit yüzdeleri ve likit limit değerleri

% Bentonit	Likit Limit (%)
10	48,06
20	95,74
30	133,63
40	179,96
100	359,38



Şekil 4.9: %Bentonit-likit limit değişim grafiği

Şekil 4.9'da yer alan doğrunun denklemi $y = 3,374x + 28,395$ olup, x; bentonit yüzdesini, y; likit limiti yüzde olarak temsil etmektedir.

Bentonitin yüksek oranda su adsorbe edebilme özelliğinden dolayı, karışımlardaki bentonit yüzdesinin artması ile karışımların likit limitlerinde bir artış olmaktadır. Bu artış da karışımlardaki bentonit yüzdeleri ile lineer olarak gerçekleşmiştir.

4.4 Kompaksiyon Deneyi

Kompaksiyon, mekanik enerji yardımı ile zemin daneleri arasındaki hava boşluğunun azaltılarak, zeminin daha sıkı hale getirilmesi işlemidir. Bu işlem için 1930'larda R.R Proctor'un yaptığı çalışmalarda kullandığı ve kendi adıyla anılan, standart ve modifiye olarak adlandırılan proktor deneyleri kullanılmaktadır.

DeneySEL çalışmanın diğer aşamalarını sürdürebilmek için gerekli olan optimum su muhtevası değerini elde etmek amacıyla; karışımların tamamı, kum ve bentonit kompaksiyon deneyine tabi tutulmuştur.

4.4.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi

Standart proktor deneyinde, 956 cm³ iç hacmindeki ve 2031 gram ağırlığındaki standart kalıp içine zemin, üç tabaka halinde serilerek her bir tabaka 2,5 kg ağırlığındaki tokmağın 30 cm yükseklikten serbest düşüşü ile yatayda homojen dağıtılan 25 vuruş ile sıkıştırılır. İki tabaka arasındaki aderansı sağlamak için her tabaka serilip, 25 defa serbest düşme hareketine maruz bırakıldıktan sonra sivri uçlu bir delici ile (tornavida v.b) tabaka üzerine delikler açılır. En üsteki tabakanın sıkıştırılması için silindirik kabın yakasası takılarak son tabaka sıkıştırılır ve sonra yaka çıkarılır. Taşan kısım spatula veya maket bıçağı ile düzeltildikten sonra sıkıştırılmış zeminin ağırlığı kalıpla birlikte tartılır. Bu şekilde ağırlığı ve hacmi belli olan kalıp içindeki malzemenin tabi birim hacim ağırlığı bağıntı 4.3'den tespit edilir. Daha sonra hidrolik kriko yardımıyla kalıptan çıkarılan numunenin üç kademesinden de örnekler alınarak su muhtevası bu üç değer in ortalaması olarak elde edilir ve bağıntı 4.4 'den maksimum kuru birim hacim ağırlık belirlenir. γ -w (kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası) grafiğinin çizilirken her bir karışım için deneyler, farklı su muhtevalarında altı defa tekrarlanır.

$$\gamma_n = \frac{W_n}{V_k} \quad (4.3)$$

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1 + w} \quad (4.4)$$

W_n : Tabi ağırlık (KN)

V_k : Kalıp hacmi (m³)

γ_n : Doğal birim hacim ağırlığı (KN/m³)

γ_k : Kuru birim hacim ağırlık (KN/m³)

w : Su muhtevası (%)

4.4.2 Bulgular

Yapılan standart proktor deneyi sonucunda elde edilen su muhtevalarına karşılık gelen kuru birim hacim ağırlıklar çizelge 4.9'da yer almaktadır. Bu verilerden yararlanılarak optimum su muhtevalarına karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları bulmak için çizilen grafikler şekil 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18'de görülmektedir. Bu şekillerde elde edilen optimum su muhtevalarına karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları çizelge 4.10'da toplu olarak verilmektedir.

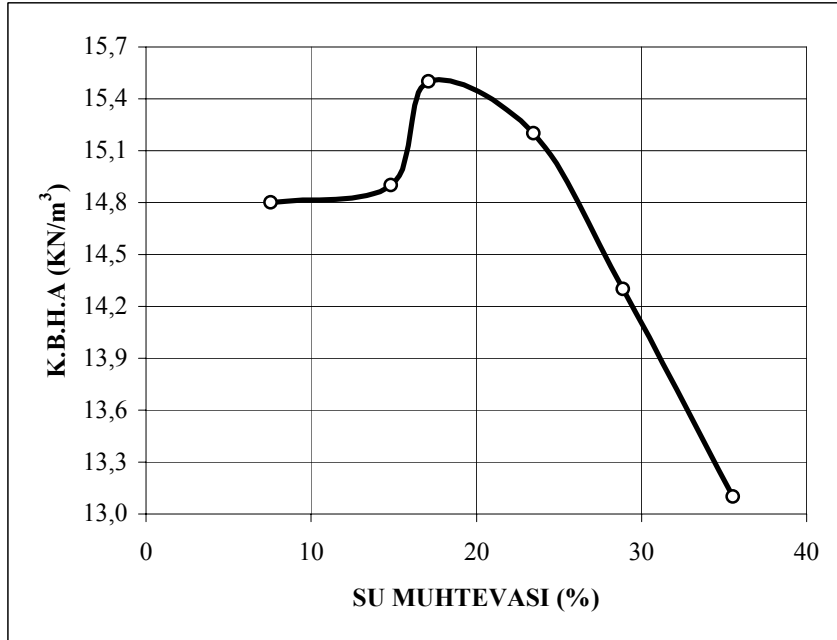
Çizelge 4.9: Proktor deneyine ait bulgular

Karışımındaki katkı maddesi (%)	Deney No	1	2	3	4	5	6
%10 bentonit	w(%)	5,52	10,64	16,40	20,55	24,85	27,29
	$k(\text{KN/m}^3)$	15,2	16,1	16,4	15,3	15,3	14,7
%20 bentonit	w(%)	7,56	14,83	17,10	23,45	28,88	35,54
	$k(\text{KN/m}^3)$	14,8	14,9	15,5	15,2	14,3	13,1
%30 bentonit	w(%)	7,06	17,92	21,80	27,04	34,97	37,87
	$k(\text{KN/m}^3)$	14,5	15,1	14,6	14,3	13,2	12,7
%40 bentonit	w(%)	7,37	13,10	16,61	24,46	33,93	41,42
	$k(\text{KN/m}^3)$	13,8	13,8	13,9	14,5	13,2	12,1
%100 bentonit	w(%)	29,4	41,33	52,47	62,13	76,15	97,98
	$k(\text{KN/m}^3)$	8,8	10,2	10,2	9,4	8,3	6,9
%100 kum	w(%)	4,40	6,08	9,90	16,46	-	-
	$k(\text{KN/m}^3)$	16,5	16,8	17,4	16,7	-	-
% 5 çimento	w(%)	3,73	7,17	10,92	17,83	22,86	-
	$k(\text{KN/m}^3)$	16,3	16,9	17,5	16,6	16,0	-
%10 çimento	w(%)	3,30	6,28	11,80	17,42	18,26	-
	$k(\text{KN/m}^3)$	16,5	16,5	17,7	16,8	16,6	-
%10 bentonit	w(%)	6,53	10,40	13,53	23,89	27,96	-

+ %5 çimento	$k(KN/m^3)$	16,2	16,8	17,2	15,3	14,8	-
--------------	-------------	------	------	------	------	------	---



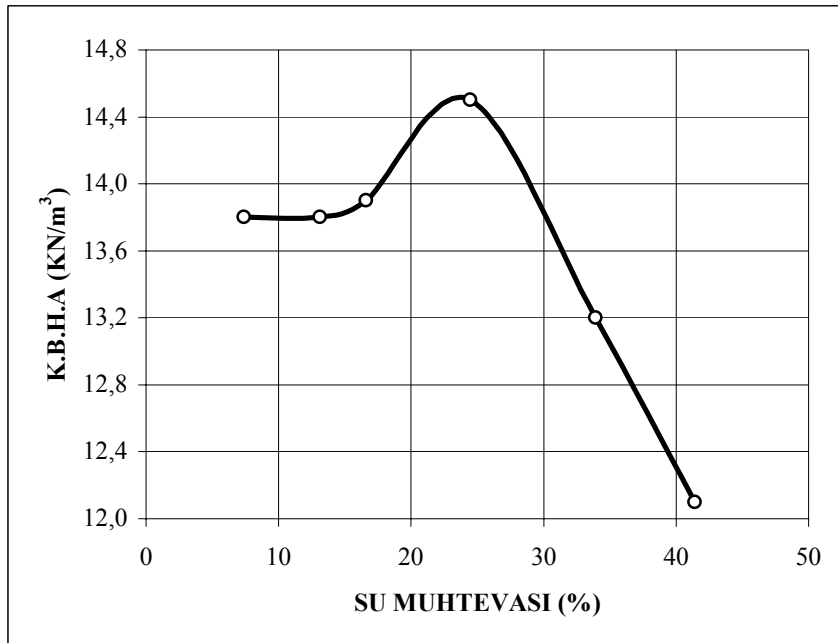
Şekil 4.10: %10 bentonit katkılı karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği



Şekil 4.11: %20 bentonit katkılı karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği



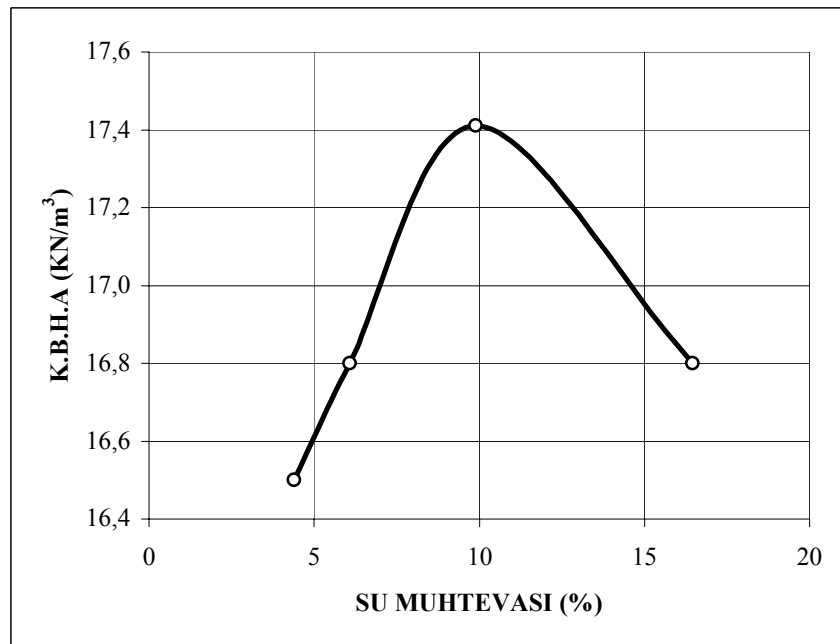
Şekil 4.12: %30 bentonit katkıli karışımın Su Muhtevası-K.B.H.A grafiği



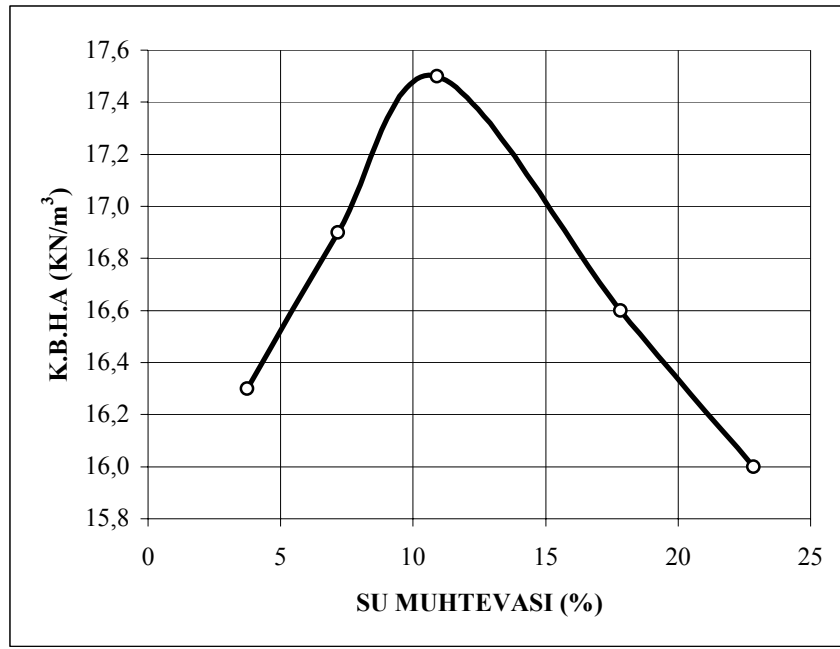
Şekil 4.13: %40 bentonit katkıli karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği



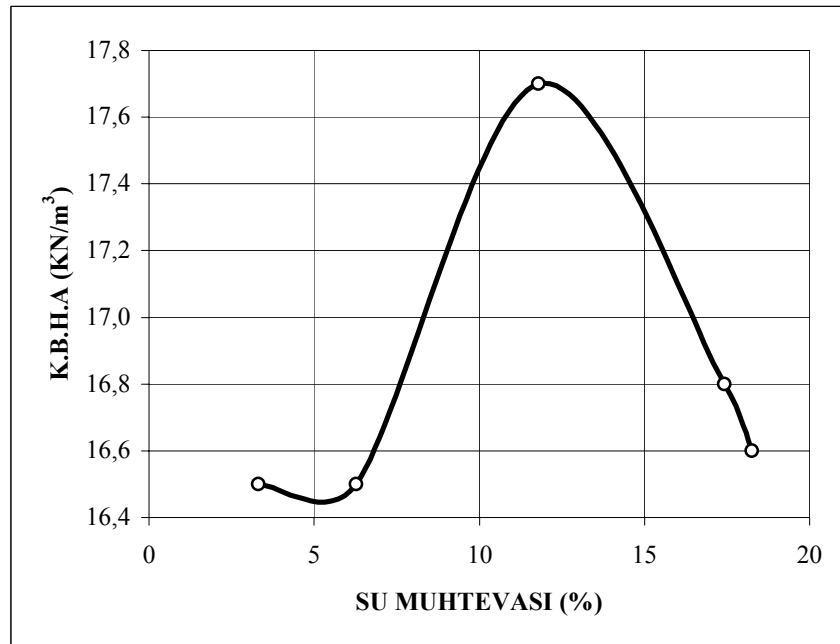
Şekil 4.14: %100 bentonitin su muhtevası-K.B.H.A grafiği



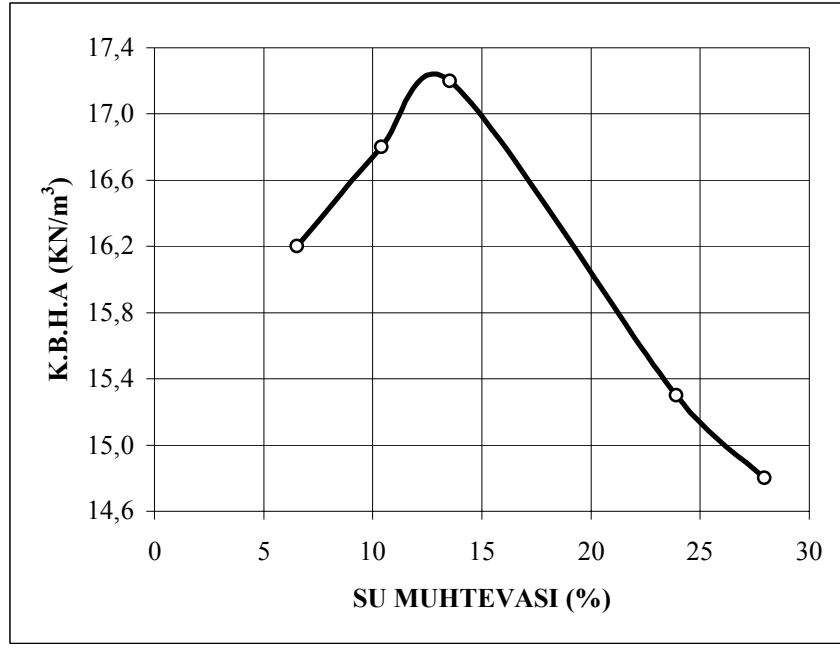
Şekil 4.15: %100 kumun su muhtevası-K.B.H.A grafiği



Şekil 4.16: %5 çimento katkılı karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği



Şekil 4.17: %10 çimento katkılı karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği

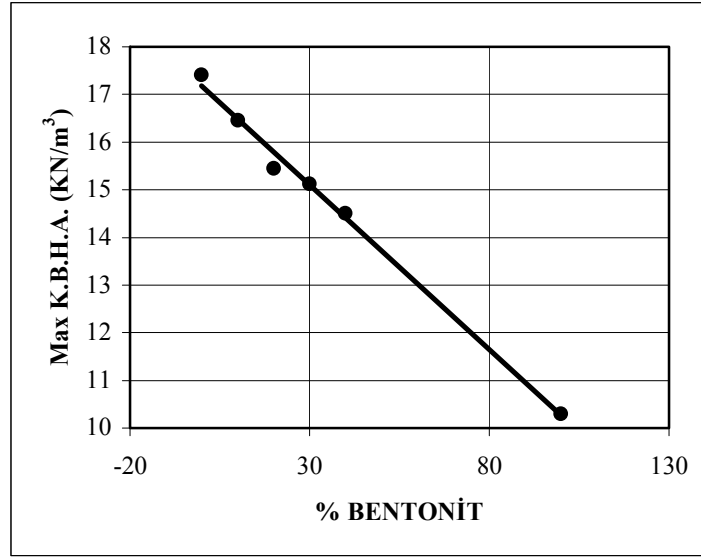


Şekil 4.18: %10 bentonit + %5 çimento katkılı karışımın su muhtevası-K.B.H.A grafiği

4.4.3 Kompaksiyon Deneyinin Sonuçları

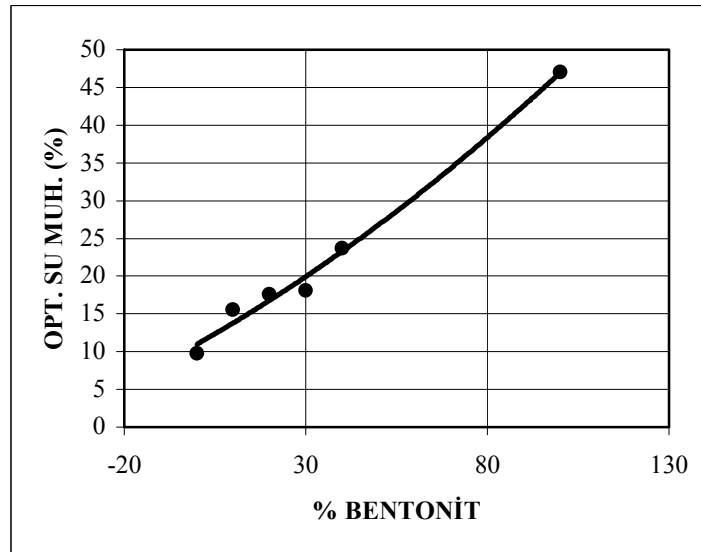
Çizelge 4.10: Proktor deneyi sonuçları

Katkı malzemesi miktarı ve cinsi	Optimum su muhtevası (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (KN/m ³)
%10 bentonit	15,5	16,46
%20 bentonit	17,6	15,45
%30 bentonit	18,1	15,12
%40 bentonit	23,7	14,51
%100 bentonit	47	10,3
%100 kum	9,8	17,41
%5 çimento	10,75	17,55
%10 çimento	12	17,71
%10bentonit + %5 çimento	12,8	17,22



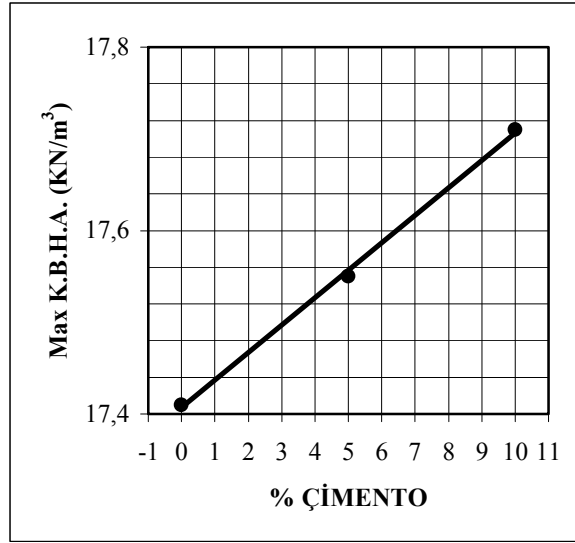
Şekil 4.19: Bentonit %'si ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değişimi

Şekil 4.19'da yer alan doğrunun denklemi $y = -0,0069x + 1,7177$ olup, x; bentonit yüzdesini, y; maksimum kuru birim hacim ağırlığı temsil etmektedir.



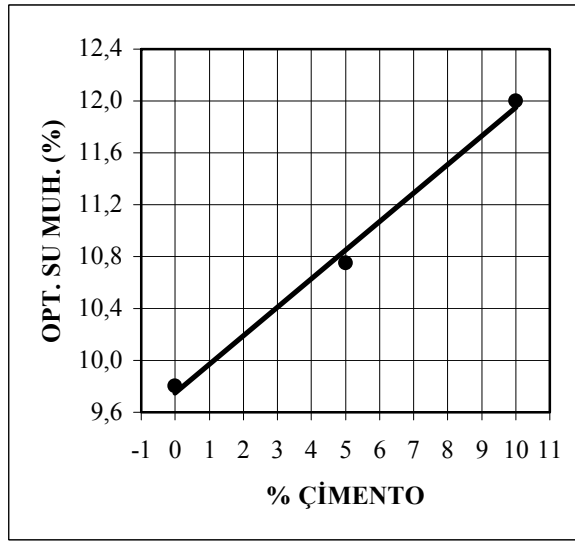
Şekil 4.20: Bentonit %'si ile optimum su muhtevası değişimi

Şekil 4.20'de yer alan doğrunun denklemi $y = 0,0009x^2 + 0,2732x + 10,965$ olup, x; bentonit yüzdesini, y; optimum su muhtevasını temsil etmektedir.



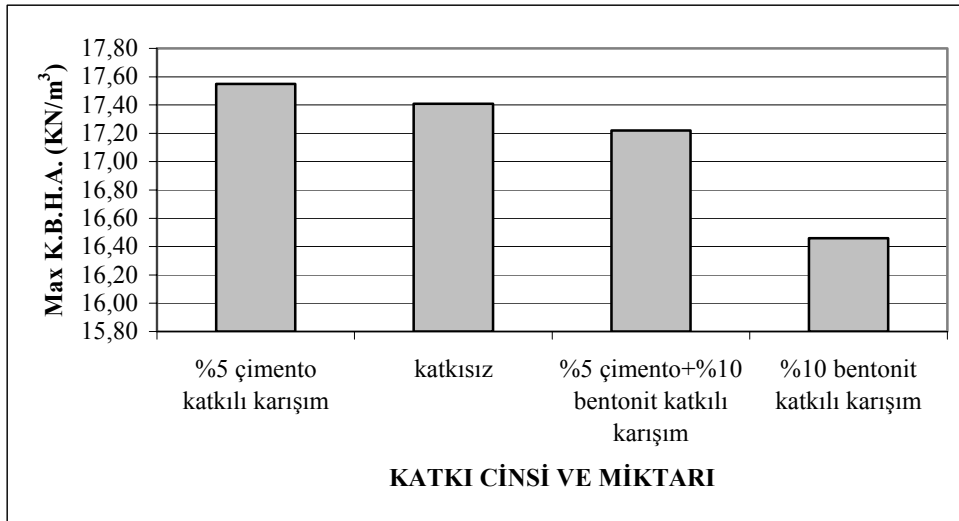
Şekil 4.21: Çimento %'si ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değişimi

Şekil 4.21'de yer alan doğrunun denklemi $y = 0,003x + 1,7407$ olup, x; çimento yüzdesini, y; maksimum kuru birim hacim ağırlığı temsil etmektedir.

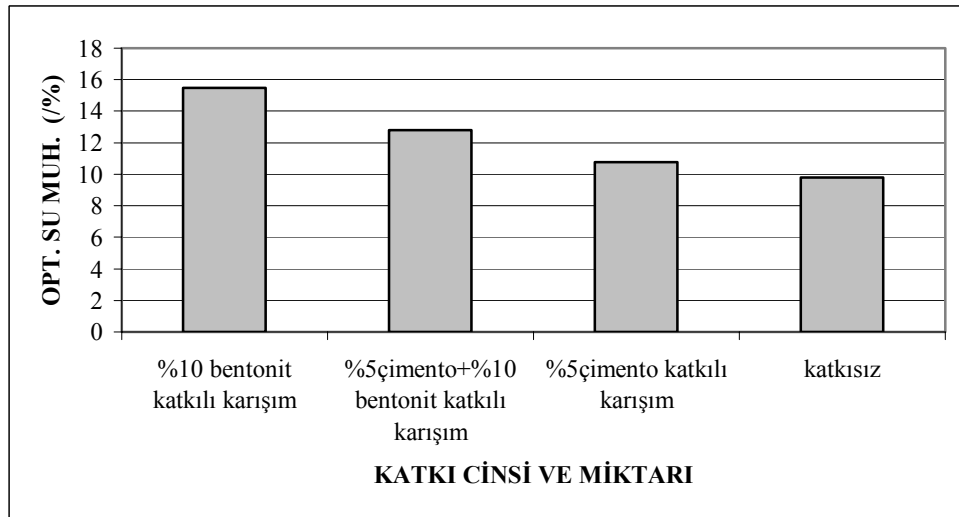


Şekil 4.22: Çimento %'si ile optimum su muhtevası değişimi

Şekil 4.22'de yer alan doğrunun denklemi $y = 0,22x + 9,75$ olup, x; çimento yüzdesini, y; optimum su muhtevasını temsil etmektedir.



Şekil 4.23: Katkı cinsi ve yüzdesi-maksimum kuru birim hacim ağırlık değişimi



Şekil 4.24: Katkı cinsi ve yüzdesi-optimum su muhtevası değişimi

Yapılan deneyler neticesinde %10, %20, %30, %40 bentonit katkılı kumlu karışımdaki bentonit oranının artması ile maksimum kuru birim hacim ağırlığın lineer olarak azaldığı (Şekil 4.19), optimum su muhtevasının ise ikinci derece bir polinom olarak artış gösterdiği (Şekil 4.20) gözlenmiştir. %5 ve %10 çimento içeren kumlu karışımlardaki çimento miktarının artması ile karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığının ve optimum su muhtevasının lineer olarak arttığı sırasıyla şekil 4.21, 4.22'de görülmektedir. %10 bentonit + %5 çimentonun bulunduğu karışıma bakıldığında maksimum kuru birim hacim ağırlığının; %10 bentonit katkılı karışıma göre arttığı, %5

çimento katkılı karışıma göre azaldığı (Şekil 4.23) gözlenmiştir. Bu karışımların optimum su muhtevaları incelendiğinde; bentonit ve çimento katkılı karışımda bentonit katkılı karışıma göre azalma olduğu, çimento katkılı karışıma göre de artış olduğu (Şekil 4.24) gözlenmiştir.

4.5 Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi üç eksenli kesme deneyinin özel bir halidir. Genellikle doymuş kil zeminlerde ($\phi=0$) kayma direncinin belirlenmesinde kullanılır. Serbest basınç deneyinin ilk ortaya atıldığı yıllarda zeminlerin kayma direncinin çok hızlı bir şekilde elde ediliyor olmasından dolayı geniş bir kabul ve kullanım alanı görmüştür. Zemin mekaniğindeki gelişmelerle birlikte serbest basınç deneyinin zemine ait kayma direncinin güvenilir bir biçimde vermeyeceği anlaşılmıştır.

Serbest basınç deneyi; tüm karışımlar üzerinde hemen, bir hafta sonra ev 28 gün sonra olmak üzere üç zaman diliminde gerçekleştirilmiştir.

4.5.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi

Serbest basınç deneyi, örselenmemiş zemin örneklerinin alınabildiği kohezyonlu zeminler için uygun olan bir deneydir. Deneylerde kullanılan örselenmemiş silindirik zemin örneklerini almak için $R=3.78$ cm çapında ve $H=7.58$ cm yüksekliğinde silindirik kalıplar kullanılmıştır.

Kuru olarak hazırlanan karışımlar, laboratuvar ortamında homojen bir ıslatma ve karıştırma işlemi sonunda optimum su muhtevalarına getirilir. Bu işlemin ardından optimum su muhtevalarındaki karışımlar, standart proktor kalıbında sıkıştırma işlemine tabi tutulur. Proktor kalıbının yakası çıkarılarak silindirik numuneler hidrolik krikoyardımları ile kalıbın içerisine yerleştirilir ve yine hidrolik krikoyardımları ile silindir kalıplar içerisindeki zemin numuneleri örselenmeden çıkarılarak deneye hazır hale getirilir. Her karışım için üç adet numune hazırlandı. Birinci numune hazırlandığı anda deneye tabi

tutuldu. Diğer iki numune 1 hafta ve 28 gün sonra deneye tabi tutulmak üzere, stretch film ile sarılarak su muhtevasını kaybetmemesi için desikatörde deney süresi gelinceye kadar bekletildi.



Şekil 4.25: Serbest basınç deneyi için numune hazırlama aşamaları

Bu deneyde numuneler, sadece düşey basınç gerilmesine tabi tutulur. Serbest basınç deney aleti biri sabit diğeri düşey yönde hareket ettirilebilen iki yuvarlak plakadan oluşur. Zemin örneği bu iki plaka arasına yerleştirilir. Uygulanan düşey yük bir yük halkası vb. bir yük ölçme düzeni ile ölçülür. Yük halkası elastik lineer davranan yuvarlak bir çelik halkadır. Halkanın yüküne uygulandığı doğrultudaki çapında meydana gelen kısalma miktarı içindeki bir deformasyon saati ile gözlenir. Daha önce bilinen yükler altında yük halkası kalibre edilerek içindeki deformasyon saatini hangi miktar dönmelerini ne değerinde bir yüke karşılık geldiği belirlenir. Zemin örneğinin düşey

eksenel boy kısılması sabit yere takılmış ayrı bir deformasyon saati ile ölçülür. Zemin örneğinin sabit bir düşey deformasyon hareketi ile gittikçe artan bir yük uygulanır. Kırılma anında deformasyon saati belli bir noktada sabit olarak bekledikten sonra geri doğru gitmeye başlar. Durduğu noktadaki değer kaydedilir. Daha sonra yük halkasının kalibrasyon eğrisinden zemin örneğini kıran maksimum düşey yük (q_u) belirlenir. Serbest basınç mukavemeti bağıntı 4.5 ile, kohezyon ise bağıntı 4.6 ile hesaplanır.

$$q_u = \frac{P_{\max}}{A} \quad (4.5)$$

$$c = \frac{q_u}{2} \quad (4.6)$$

P_{\max} : Kırılma anındaki yük (KN)

A : Enkesit alanı (m^2)

q_u : Serbest basınç mukavemeti (KN/ m^2)

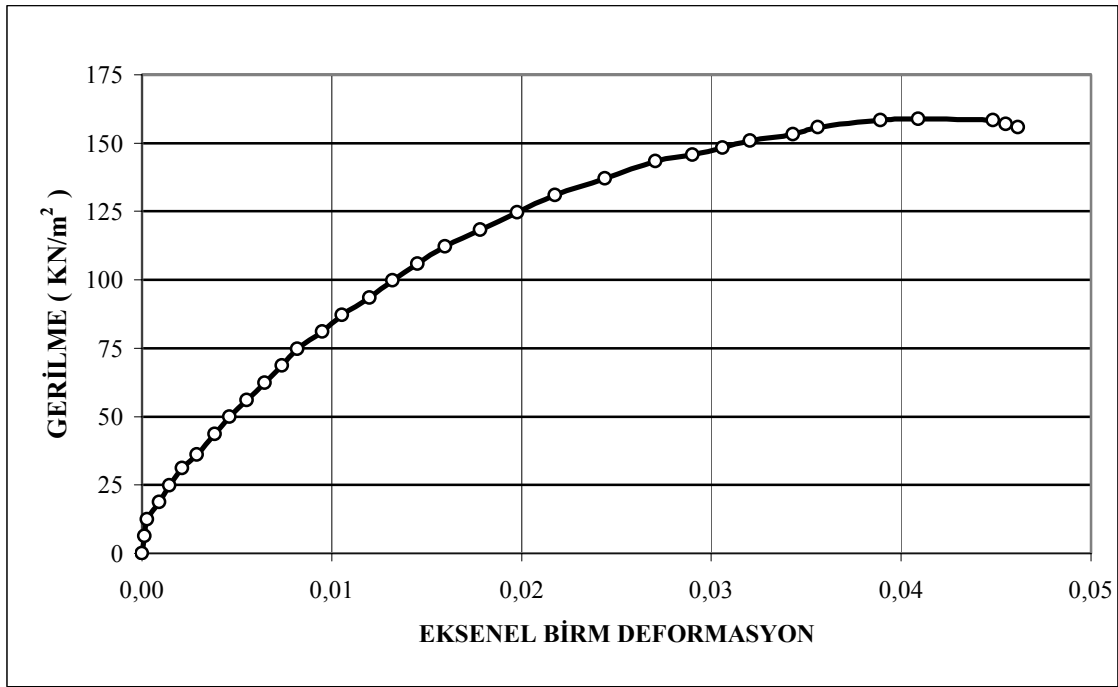
c : Zeminin kohezyonu (KN/ m^2)

4.5.2 Bulgular

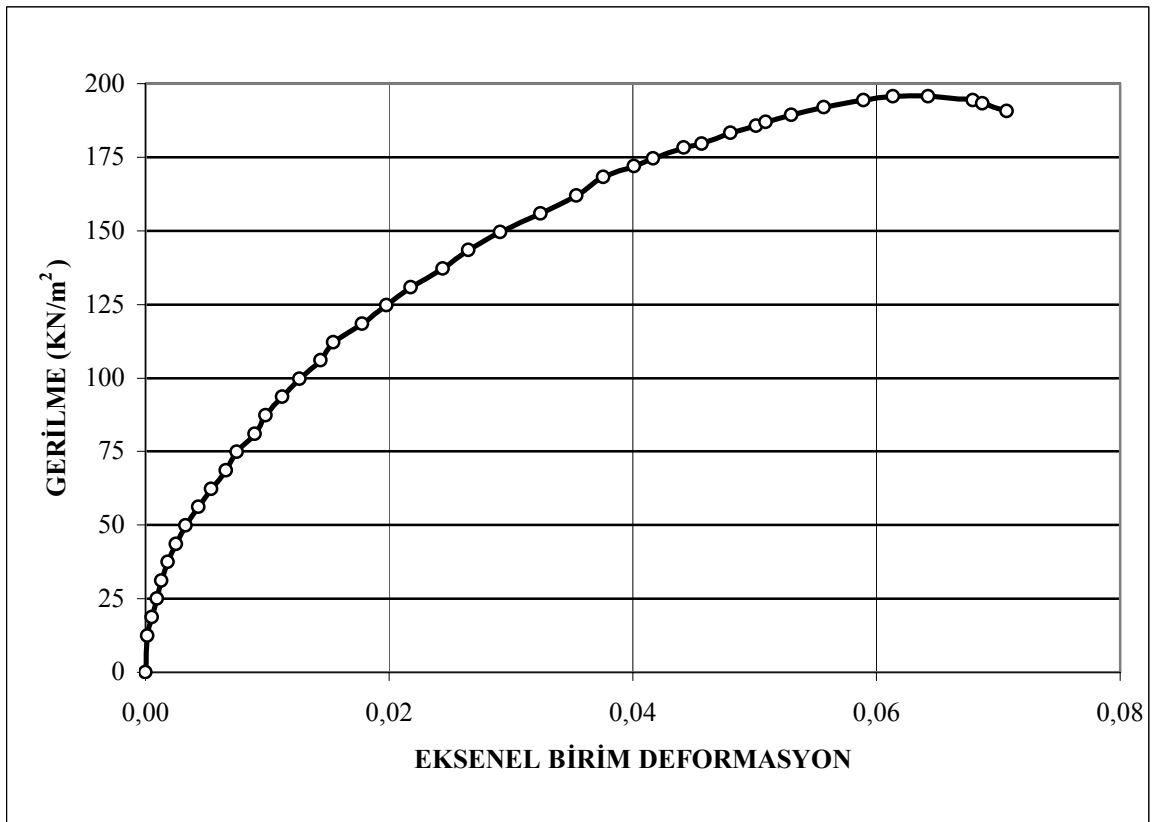
Serbest basınç deneyinde, kırılma anında elde edilen yük halkası okumasının kalibre edilmesi ile bulunan serbest basınç mukavemetleri (nihai gerilmeler) ve kırılma anındaki su muhtevaları çizelge 5.11'de verilmektedir. Kırılmalar esnasında elde edilen boy kısılması okumalarının da kalibre edilmesi ile elde edilen gerilme-eksenel birim deformasyon grafikleri de şekil 4.26, 4.27, ..., 4.48, 4.49'da verilmiştir.

Çizelge 4.11: Serbest basınç mukavemetleri

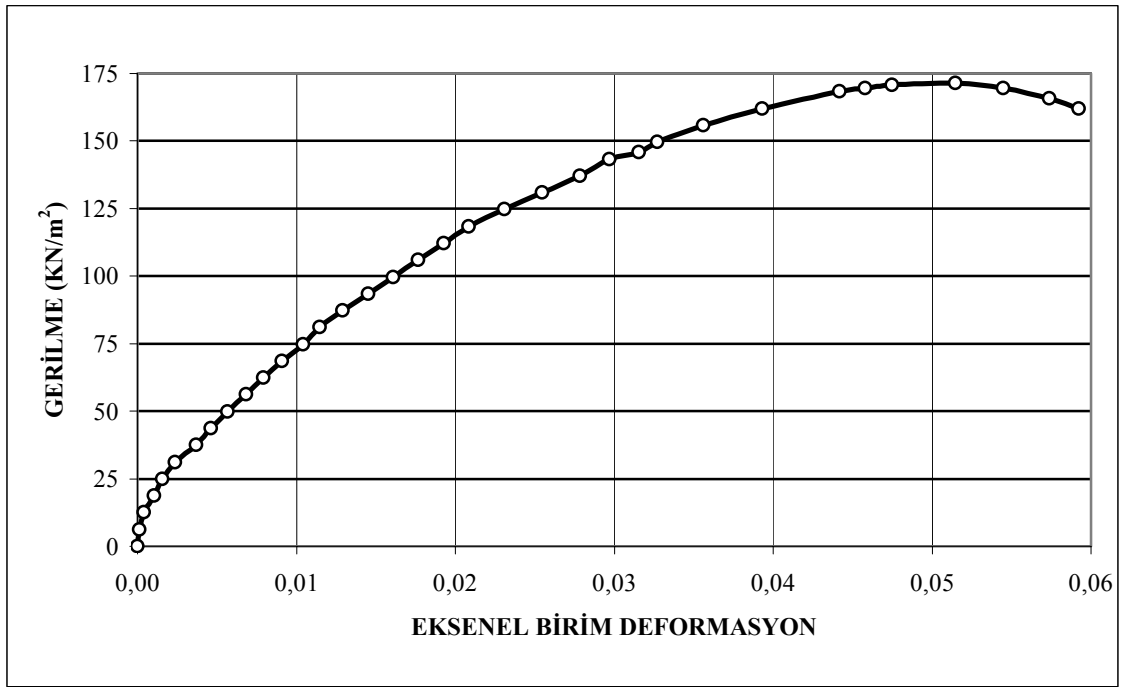
Bentonit oranı (%)	Hemen kırılanlar		1 haftada kırılanlar		28 günde kırılanlar	
	q_u (KN/m ²)	w (%)	q_u (KN/m ²)	w (%)	q_u (KN/m ²)	w (%)
10	159	15,4	106	15,5	154	15,8
20	196	17,6	134	17,9	181	17,8
30	171	18,09	131	17,89	163	17,78
40	157	24	121	23,7	140	23,4
Çimento oranı (%)						
5	62	10,8	752	10,78	841	10,95
10	74	12,1	1434	11,9	1807	11,78
Bentonit ve Çimento oranı (%)						
10+5	159	12,8	784	12,72	1538	12,68
Kum oranı (%)						
100	36	9,8	55	9,78	44	9,72



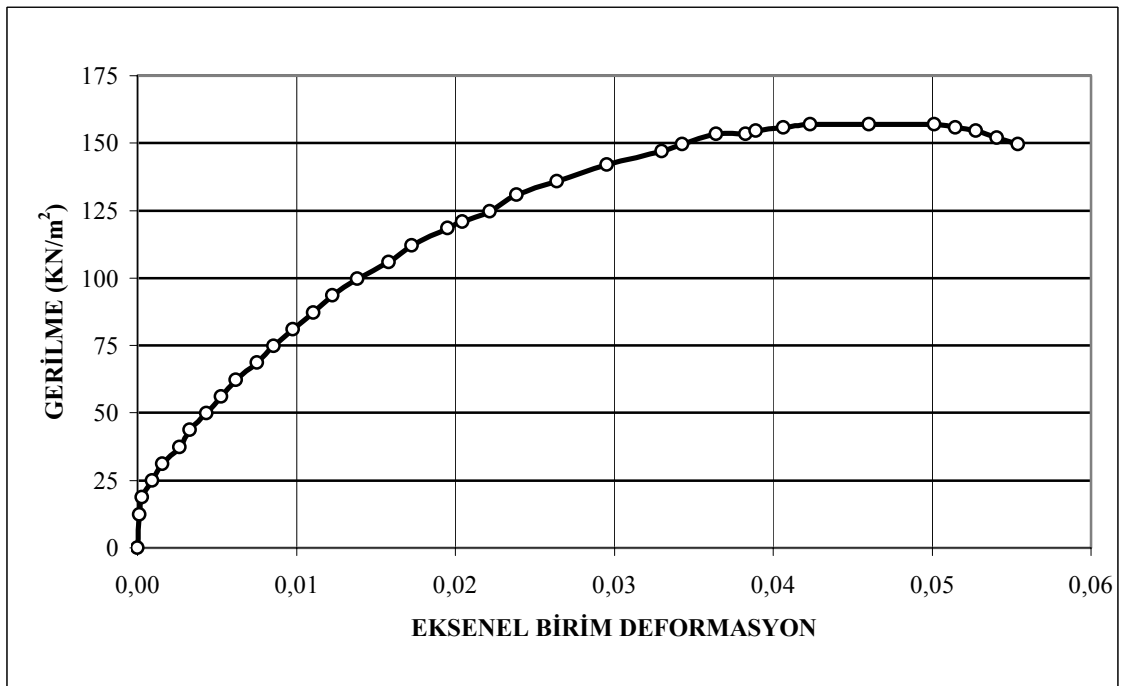
Şekil 4.26: %10 bentonit katkıli karışımın hemen kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



Şekil 4.27: %20 bentonit katkıli karışımın hemen kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



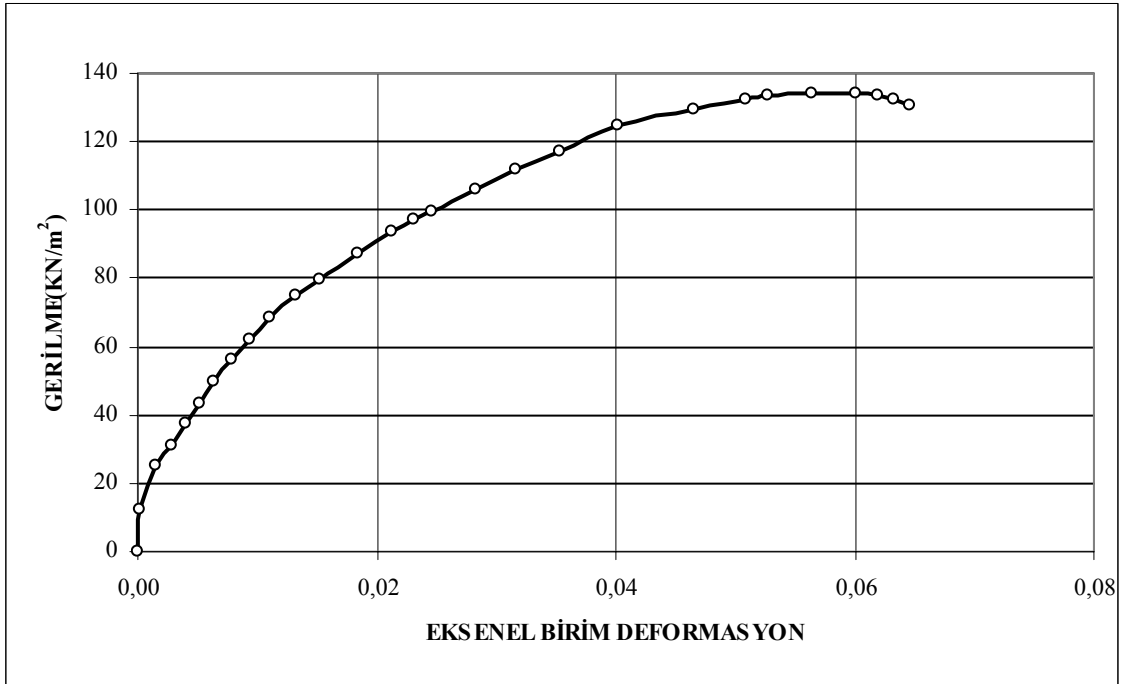
Şekil 4.28: %30 bentonit katkıli karışımın hemen kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



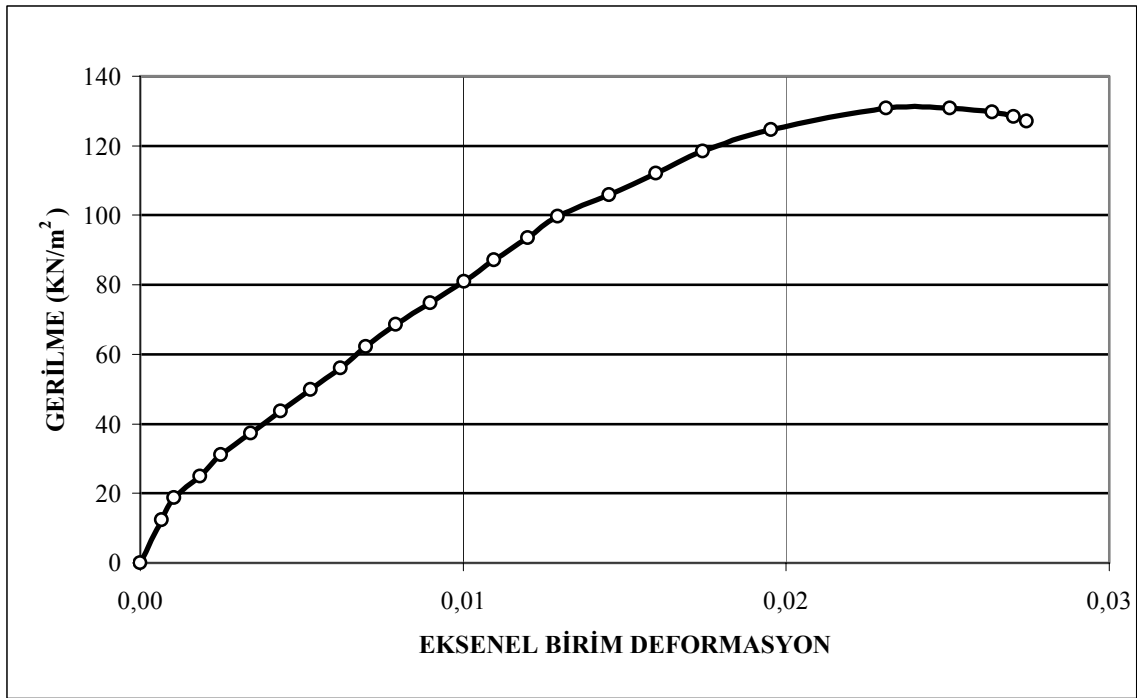
Şekil 4.29: %40 bentonit katkıli karışımın hemen kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



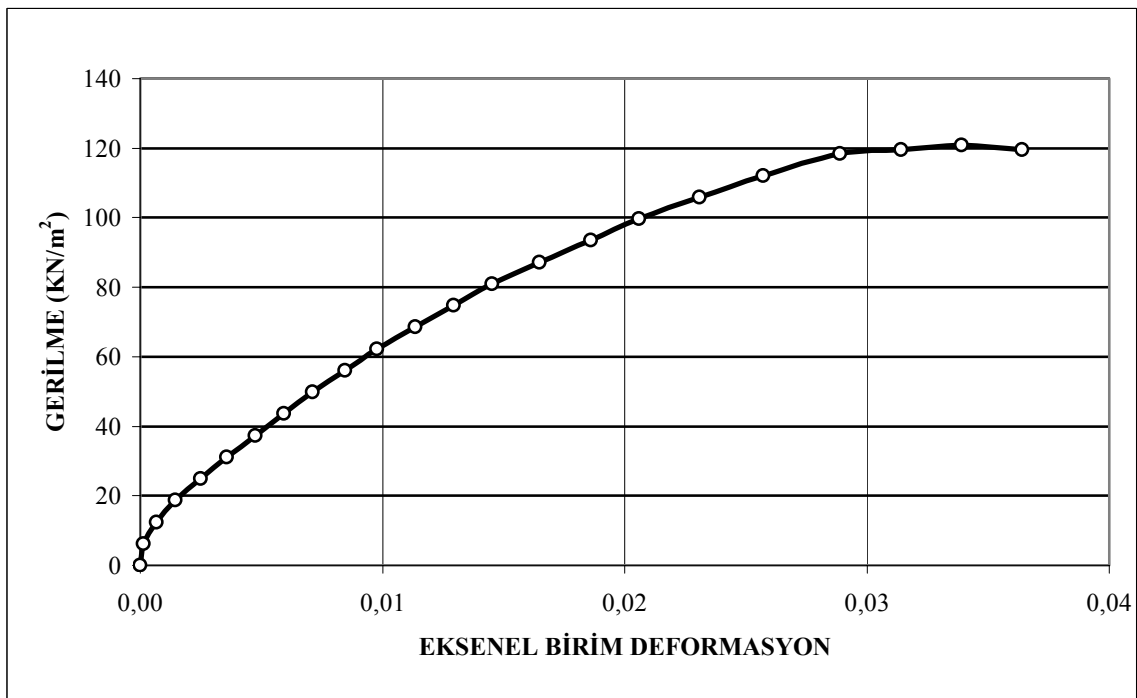
Şekil 4.30: %10 bentonit katkıli karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



Şekil 4.31: %20 bentonit katkıli karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



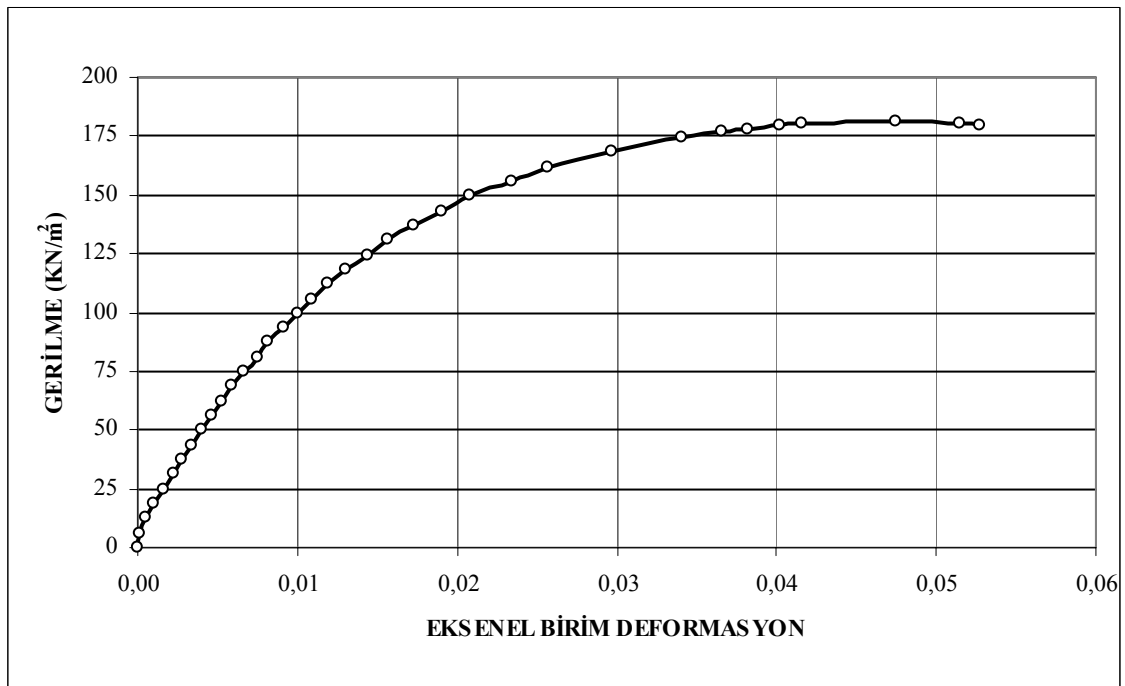
Şekil 4.32: %30 bentonit katkıli karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



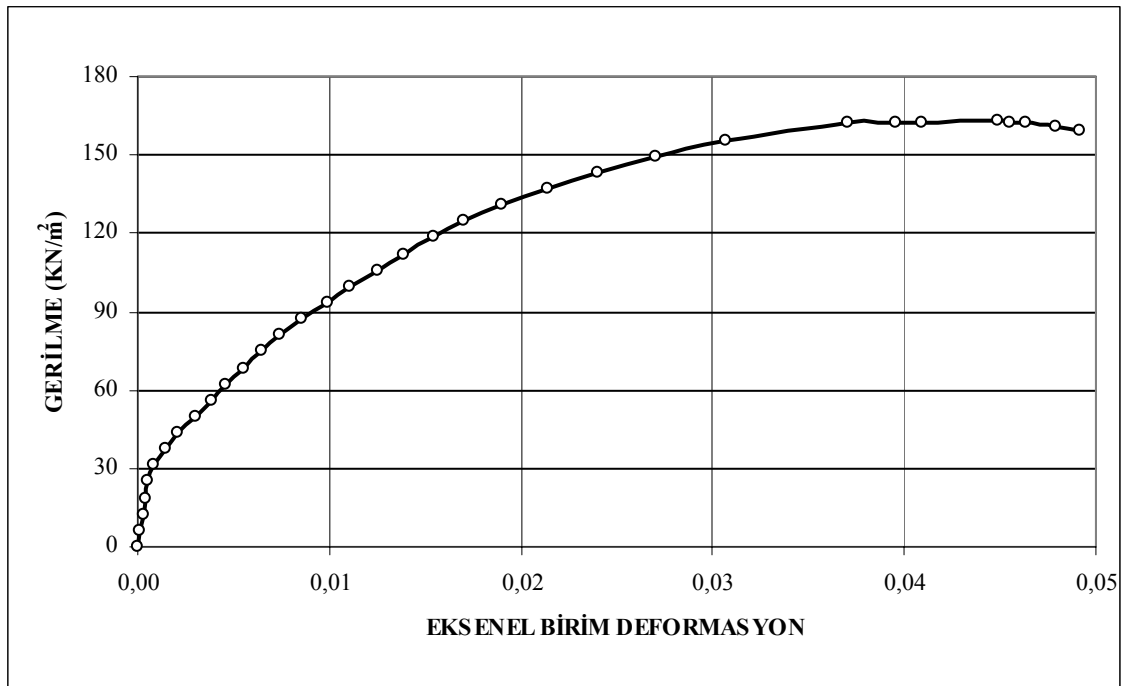
Şekil 4.33: %40 bentonit katkıli karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



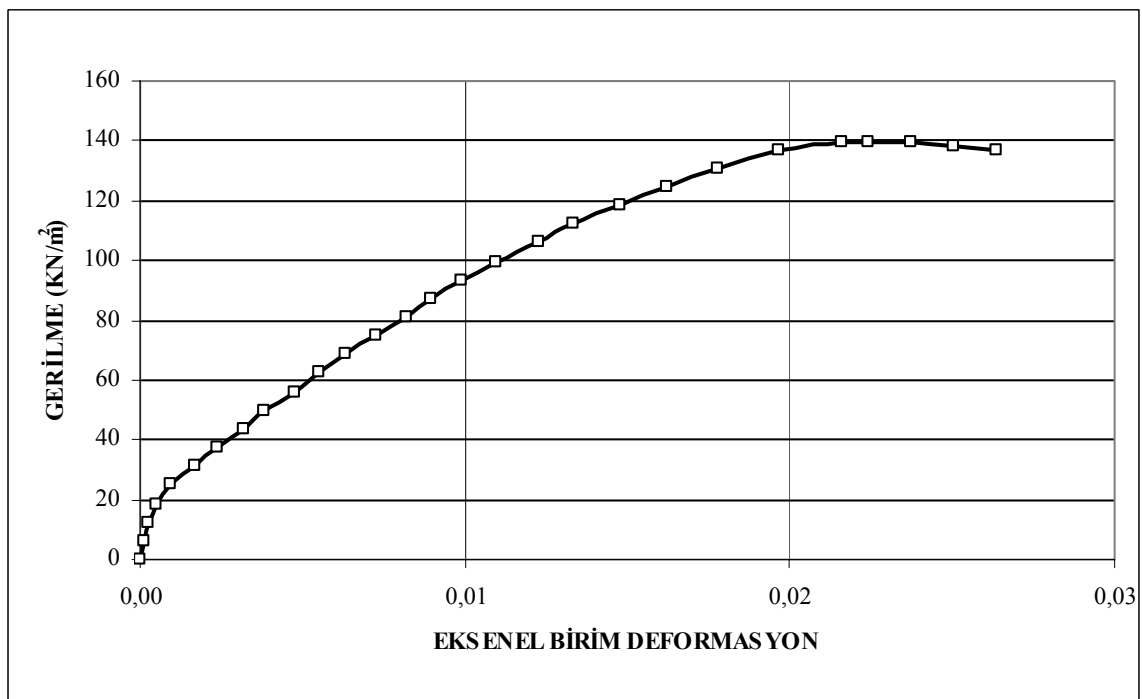
Şekil 4.34: %10 bentonit katkıli karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



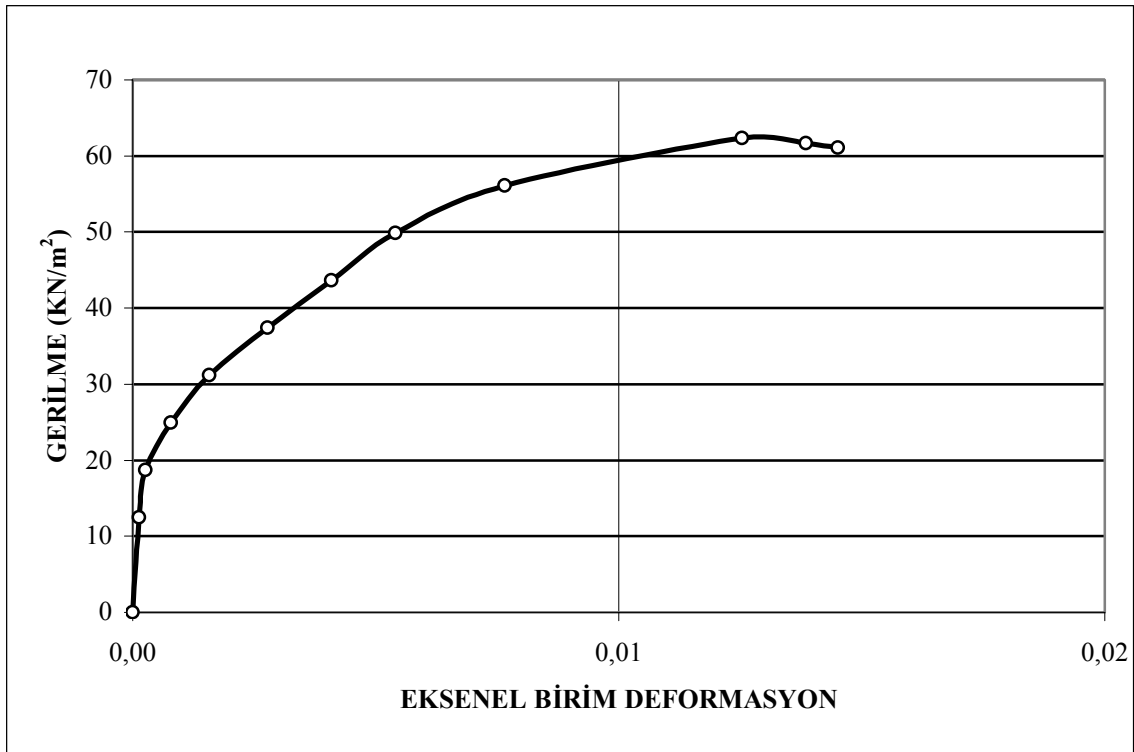
Şekil 4.35: %20 bentonit katkıli karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



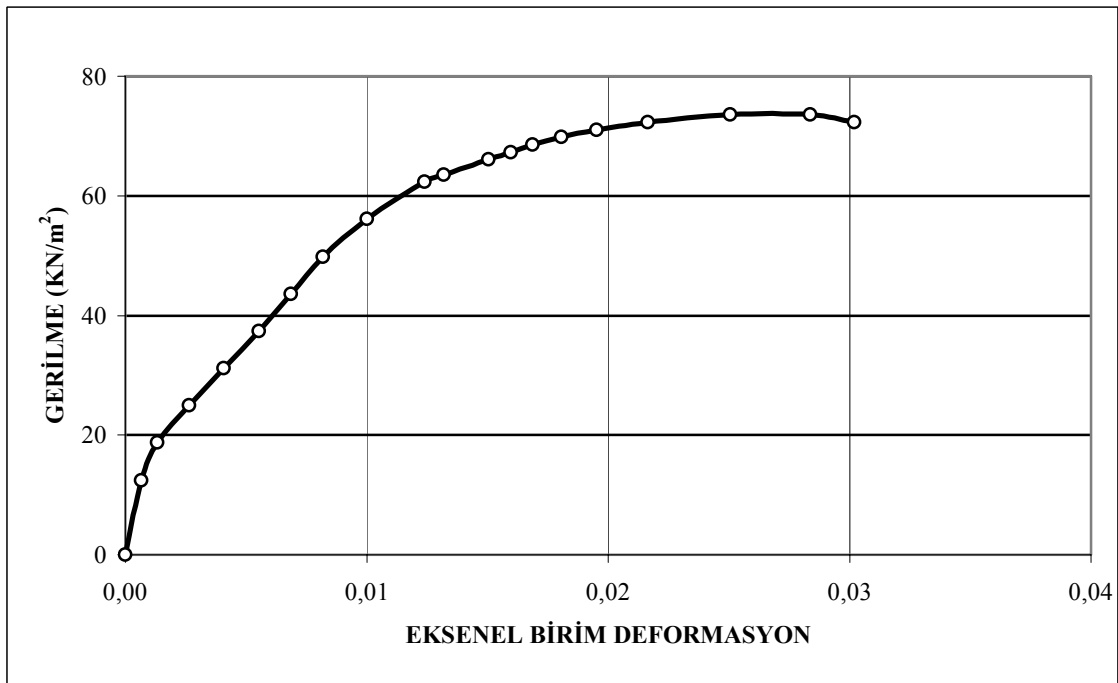
Şekil 4.36: %30 bentonit katkılı karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



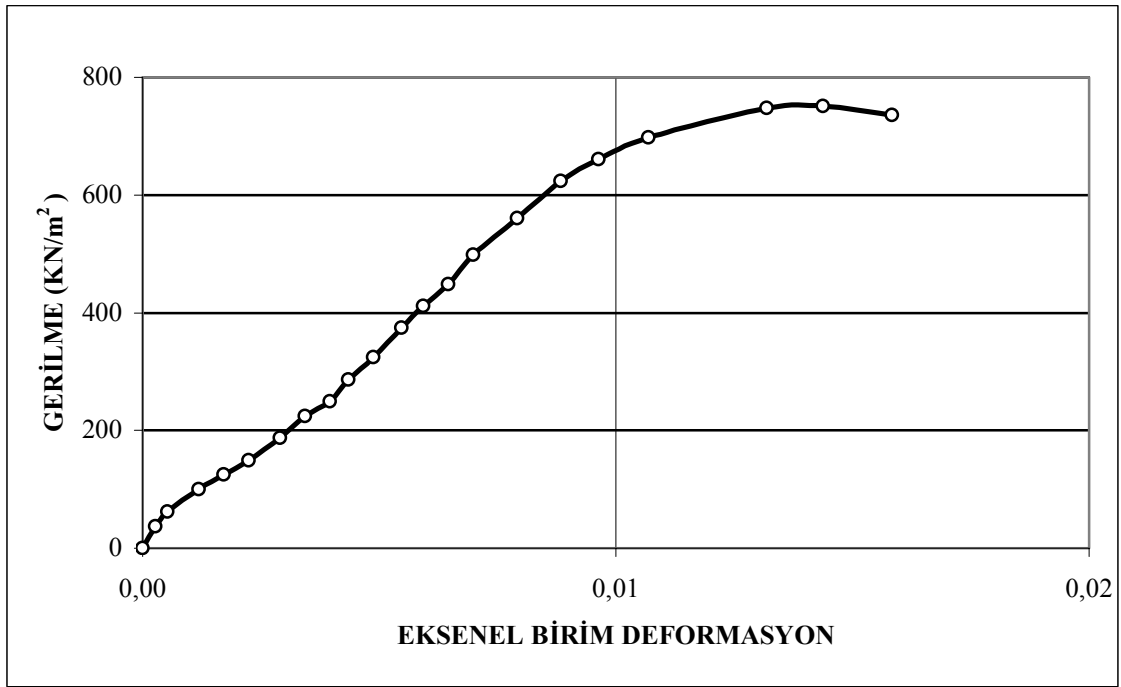
Şekil 4.37: %40 bentonit katkılı karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



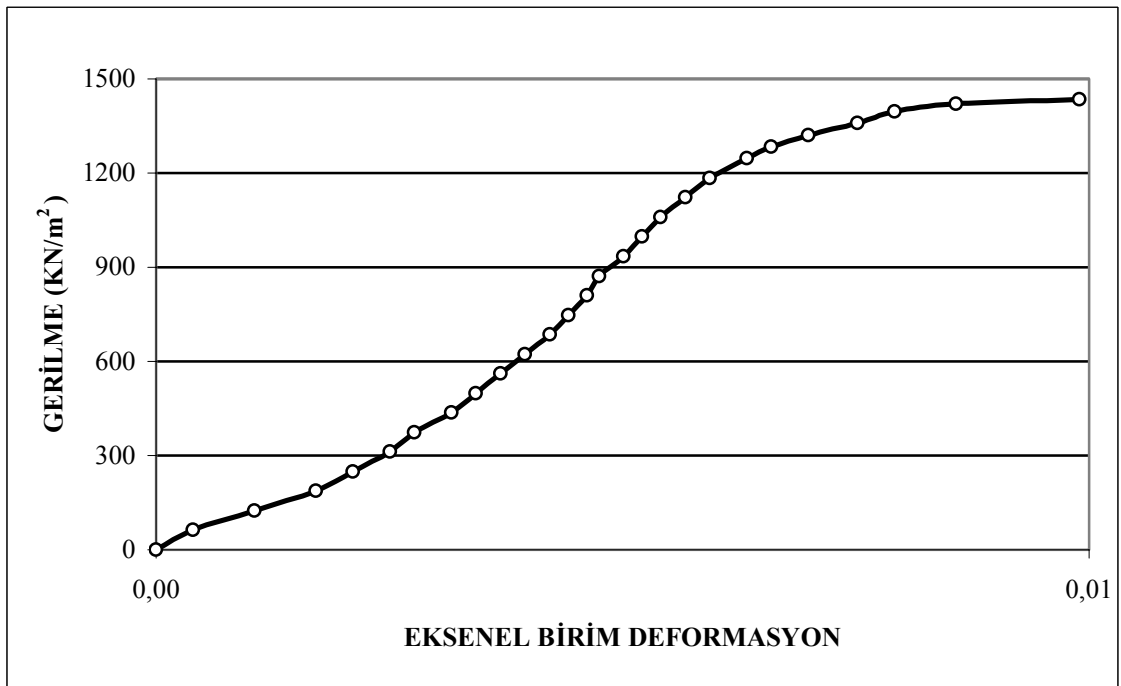
Şekil 4.38: %5 çimento katkılı karışımın hemen kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



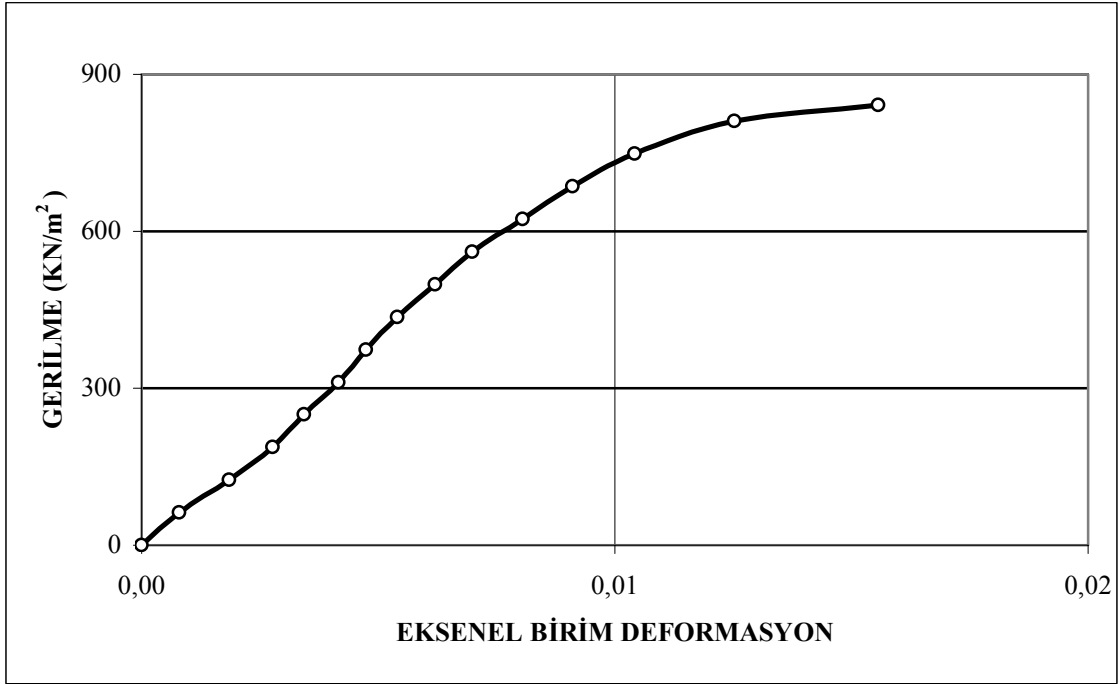
Şekil 4.39: %10 çimento katkılı karışımın hemen kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



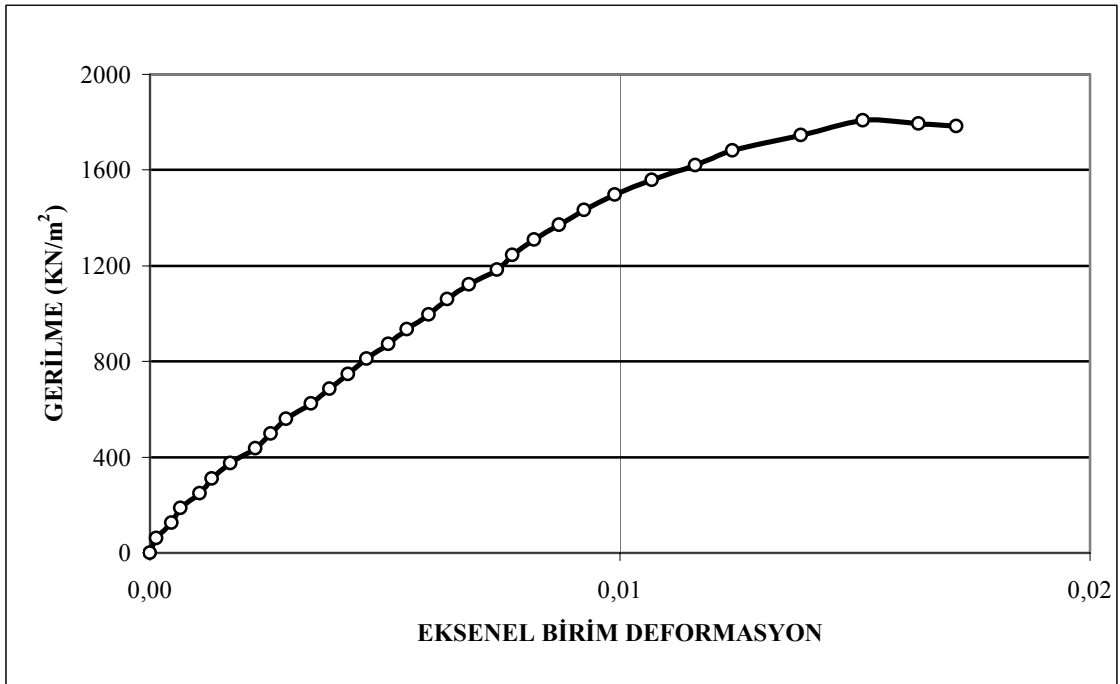
Şekil 4.40: %5 çimento katkıli karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



Şekil 4.41: %10 çimento katkıli karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



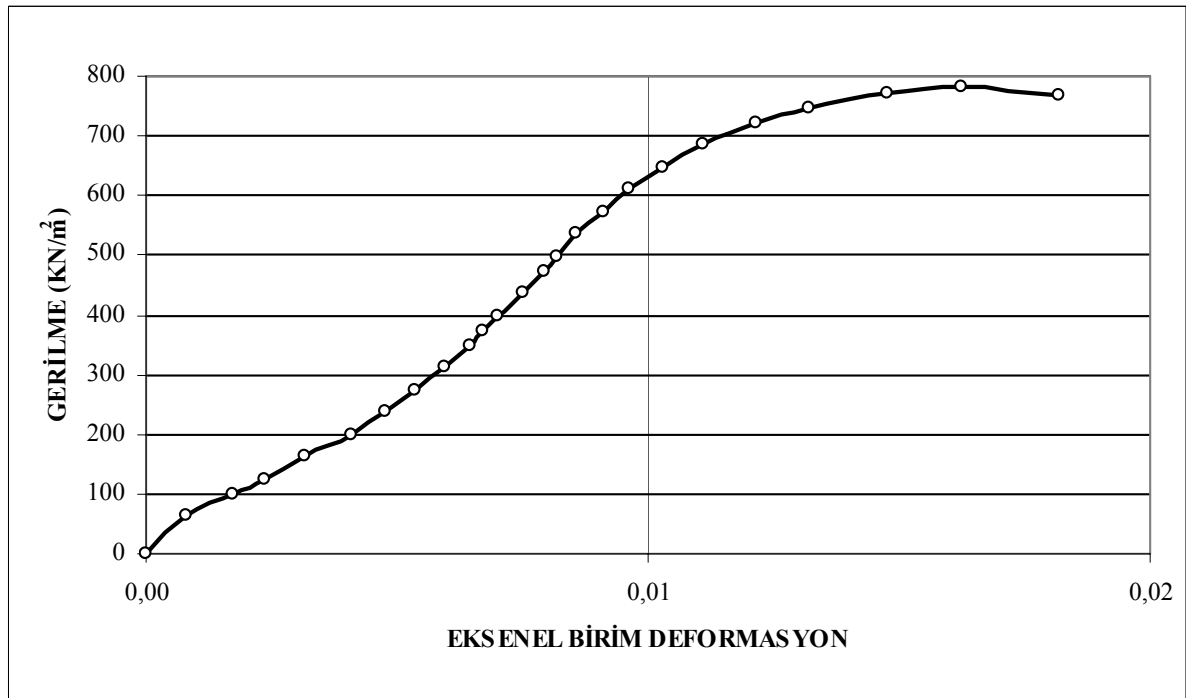
Şekil 4.42: %5 çimento katkıli karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



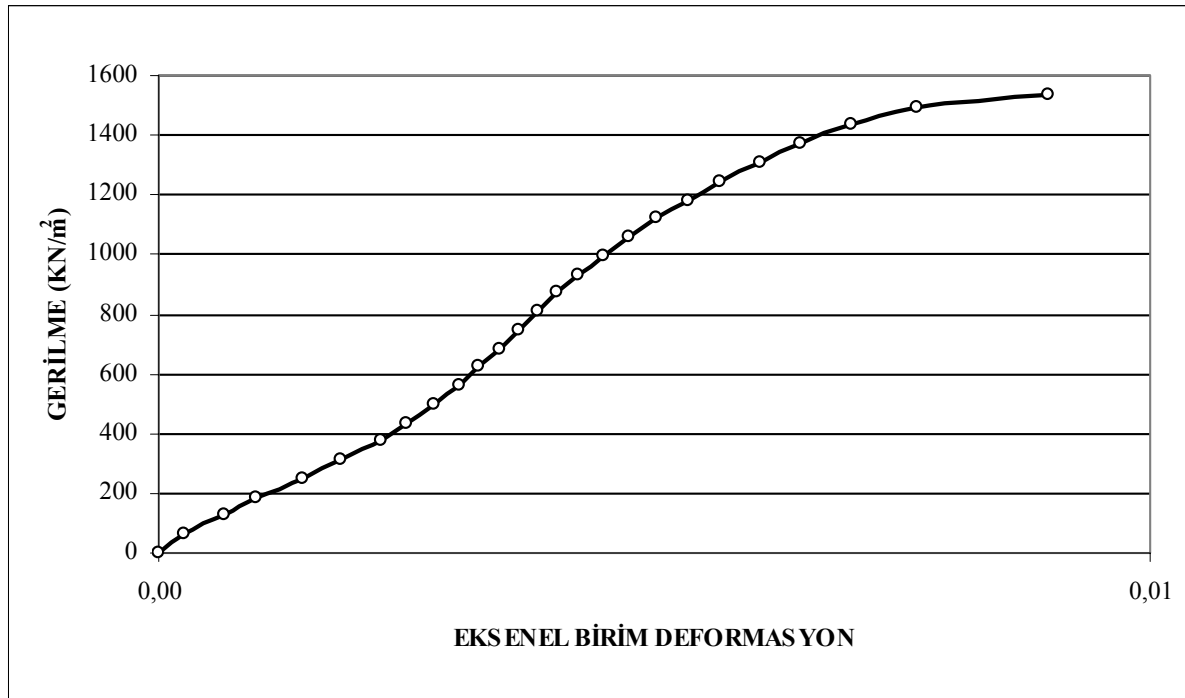
Şekil 4.43: %10 çimento katkıli karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



Şekil 4.44: %10 bentonit + %5 çimento katkıli karışımın hemen kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



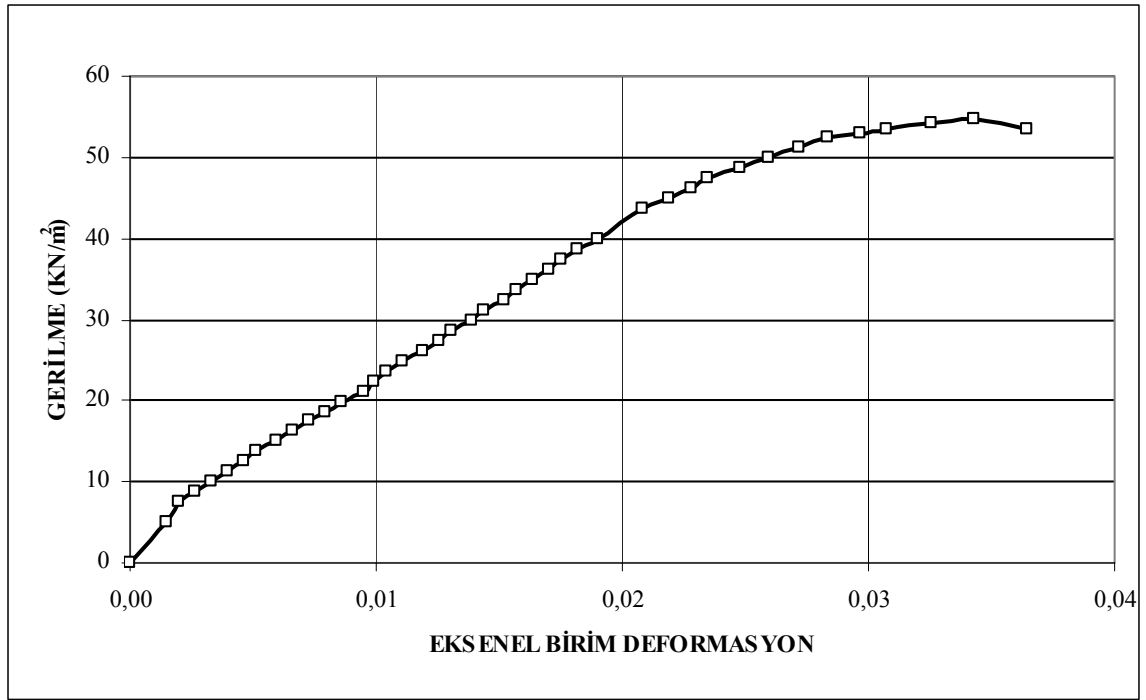
Şekil 4.45: %10 bentonit + %5 çimento katkıli karışımın 1 hafta sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



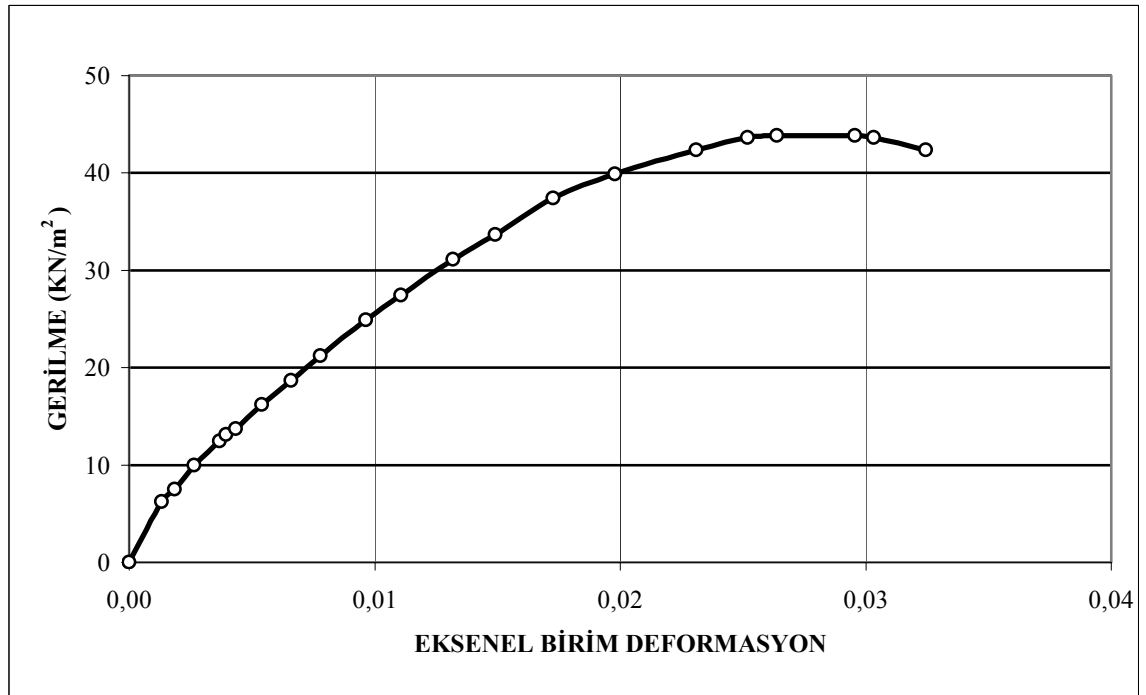
Şekil 4.46: %10 bentonit + %5 çimento katkılı karışımın 28 gün sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



Şekil 4.47: %100 kumun hemen kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi



Şekil 4.48: %100 kumun 1 hafta sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi

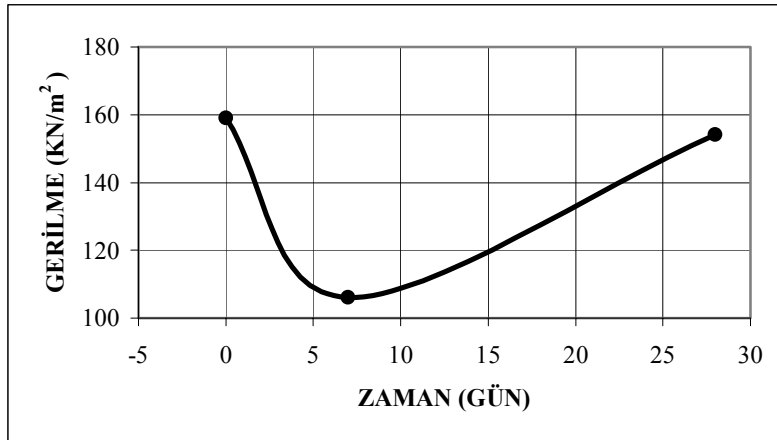


Şekil 4.49: %100 kumun 28 gün sonra kırılması durumunda gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkisi

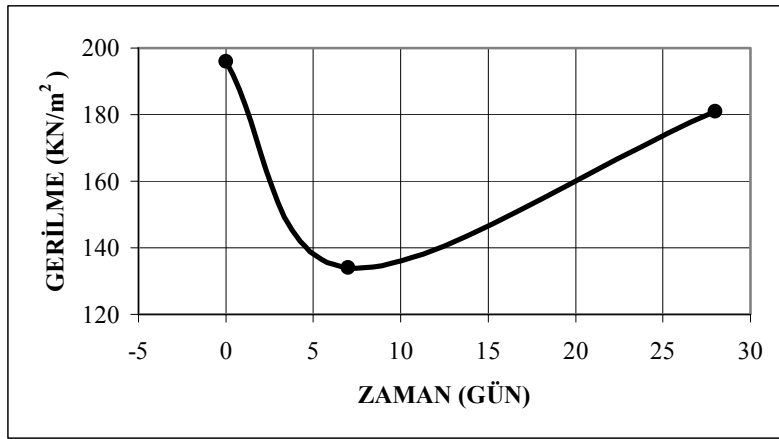
4.5.3 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

%10, %20, %30, %40 bentonit katkılı kumlu karışımların serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde; birinci haftanın sonunda, hemen kırılan numuneye göre bir azalma gözlenmektedir. 28. günde kırılan numunenin serbest basınç mukavemetinin 1 haftalık numuneye göre artış gösterdiği ancak hemen kırılan numunenin serbest basınç mukavemetinin altında bir değerde kaldığı gözlenmiştir. Şekil 4.50, 4.51, 4.52, 4.53’de bu değişimler görülmektedir.

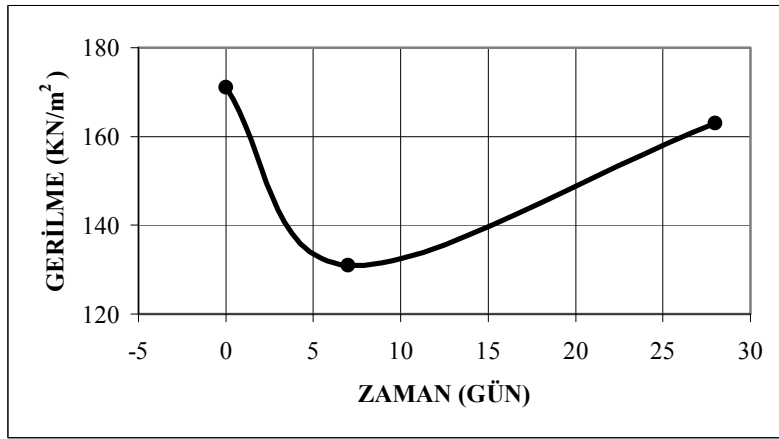
%10, %20, %30, %40 bentonit katkılı karışımların serbest basınç mukavemetleri hemen kırılanlar, 1 hafta sonra kırılanlar ve 28 gün sonra kırılanlar olarak kendi aralarında incelendiğinde her üç zaman diliminde de bu değerlerin %20 bentonit katkı oranına kadar artış gösterdiği, bu değerden sonra azaldığı Şekil 4.54, 4.55, 4.56, 4.57’de görülmektedir.



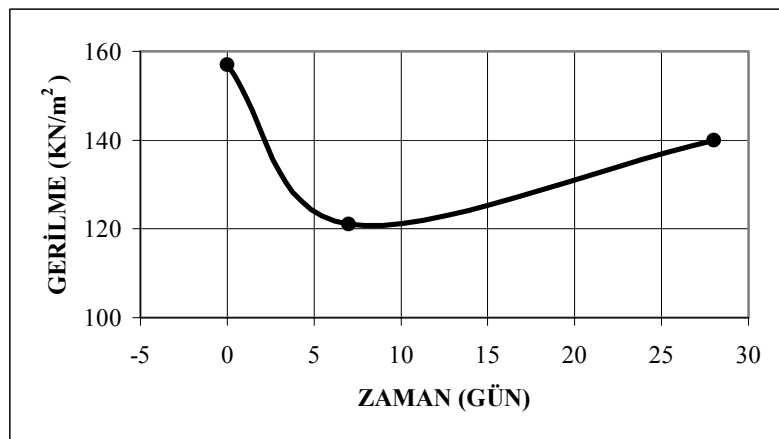
Şekil 4.50: %10 bentonit katkılı karışımın nihai gerilme değerinin zamanla değişimi



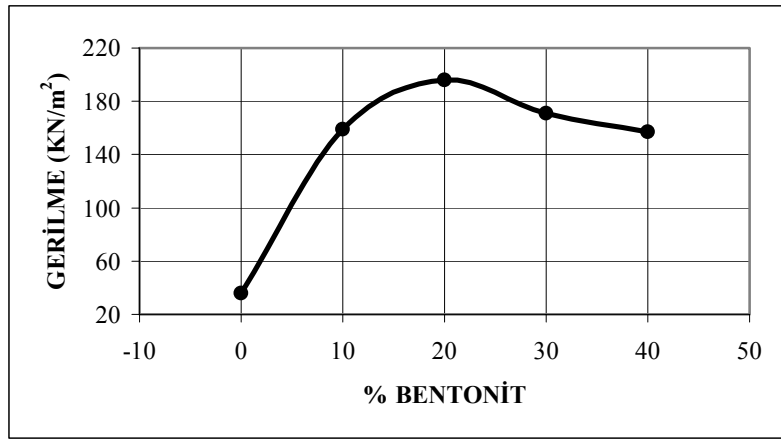
Şekil 4.51: %20 bentonit katkılı karışımın nihai gerilme değerinin zamanla değişimi



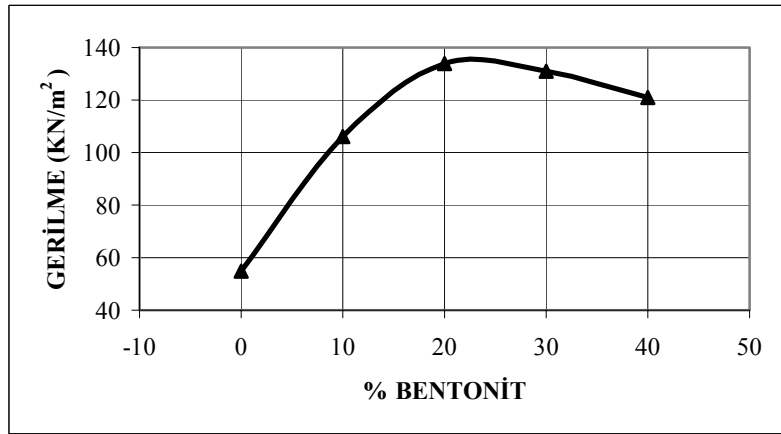
Şekil 4.52: %30 bentonit katkılı karışımın nihai gerilme değerinin zamanla değişimi



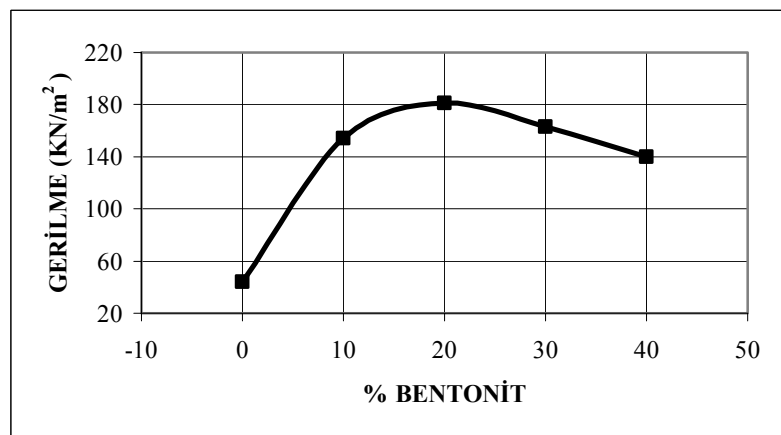
Şekil 4.53: %40 bentonit katkılı karışımın nihai gerilme değerinin zamanla değişimi



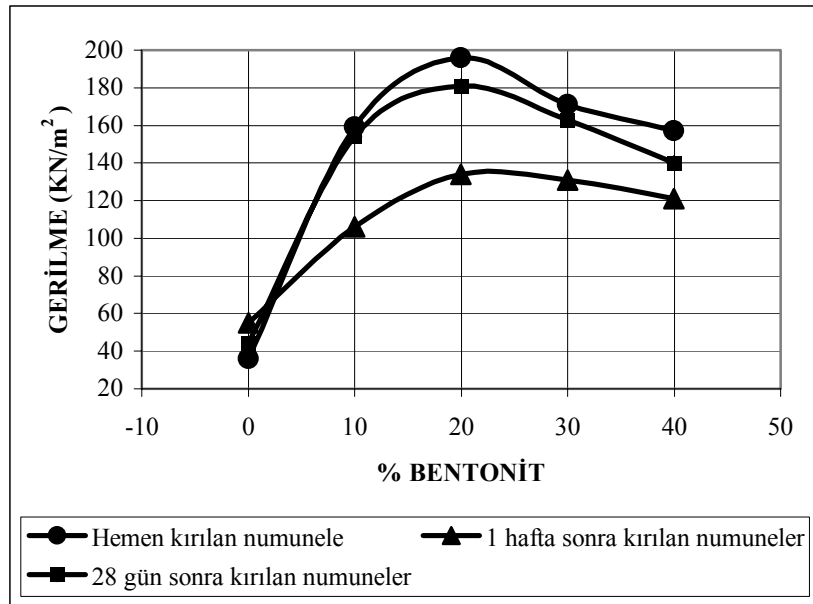
Şekil 4.54: Hemen kırılan numunelerin bentonit yüzdesi-nihai gerilme değişimi



Şekil 4.55: 1 hafta sonra kırılan numunelerin bentonit yüzdesi-nihai gerilme değişimi



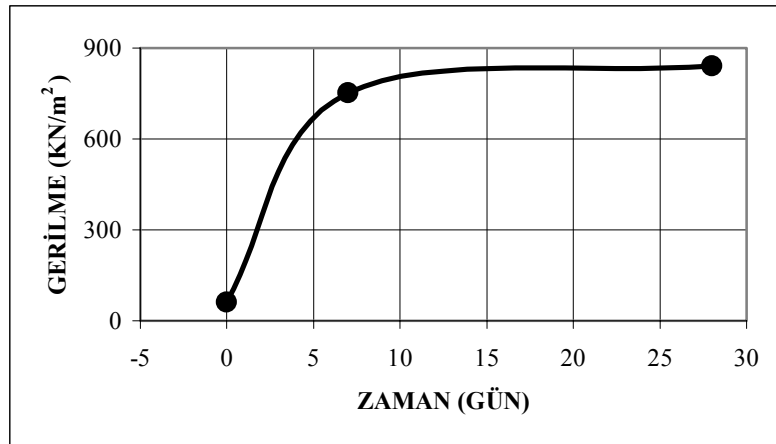
Şekil 4.56: 28 gün sonra kırılan numunelerin bentonit yüzdesi-nihai gerilme değişimi



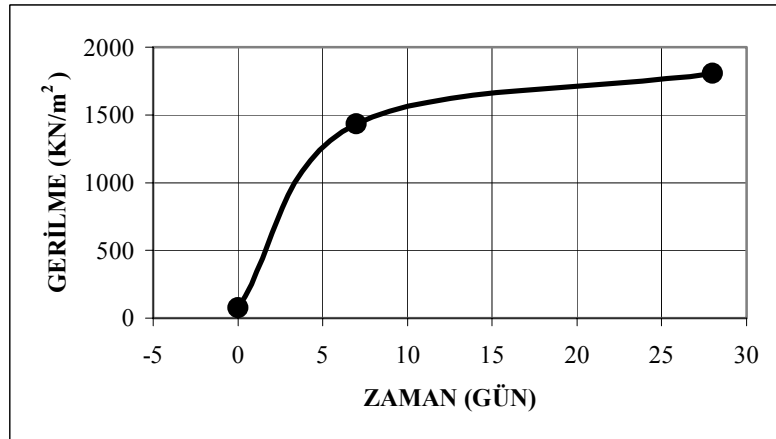
Şekil 4.57: Hemen, 1 hafta ve 28 gün sonra kırılan numunelerin bentonit yüzdesi-nihai gerilme değişimleri

%5 ve %10 çimento katkılı karışımların serbest basınç mukavemetlerinin zamanla değişimine bakıldığında her iki numunede de sürekli bir artış olduğu ve numunelerin mukavemetlerinin büyük bir kısmını ilk hafta sonunda kazandıkları şekil 4.58, 4.59'de açık bir şekilde görülmektedir.

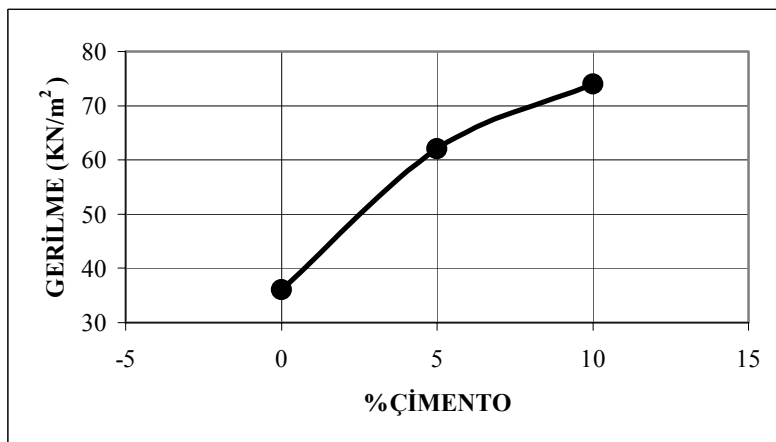
%5 ve %10 çimento katkılı karışımların serbest basınç mukavemetleri; hemen kırılanlar, 1 hafta sonra kırılanlar ve 28 gün sonra kırılanlar olarak kendi aralarında incelendiğinde her üç zaman diliminde de bu değer sürekli olarak artış gösterdiği şekil 4.60, 4.61, 4.62 ve 4.63'de görülmektedir.



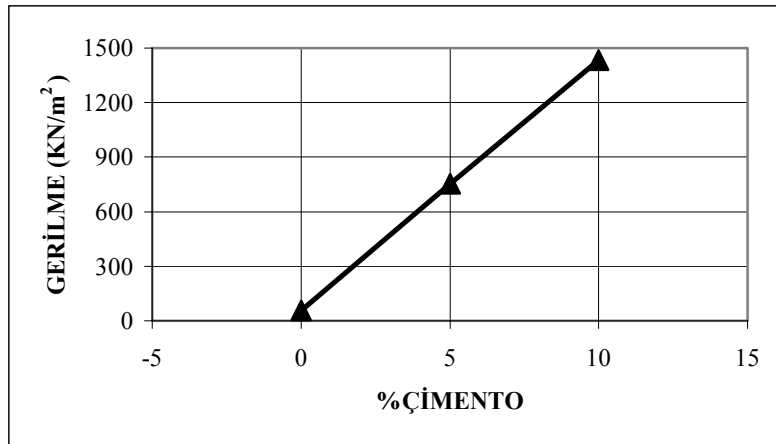
Şekil 4.58: %5 çimento katkıli karışımın nihai gerilme değerinin zamanla değişimi



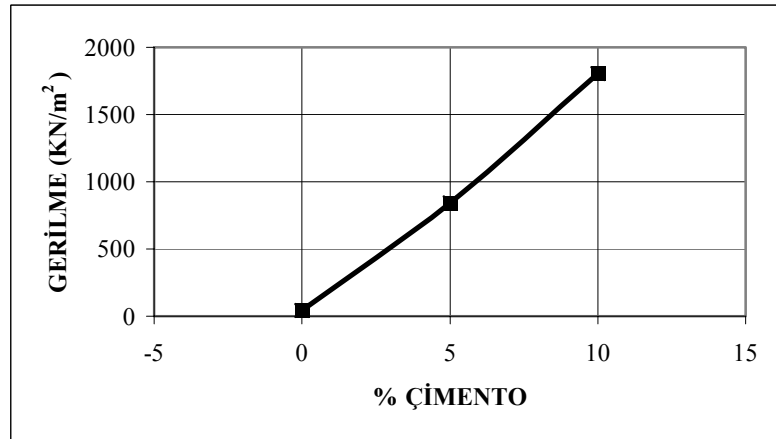
Şekil 4.59: %10 çimento katkıli karışımın nihai gerilme değerinin zamanla değişimi



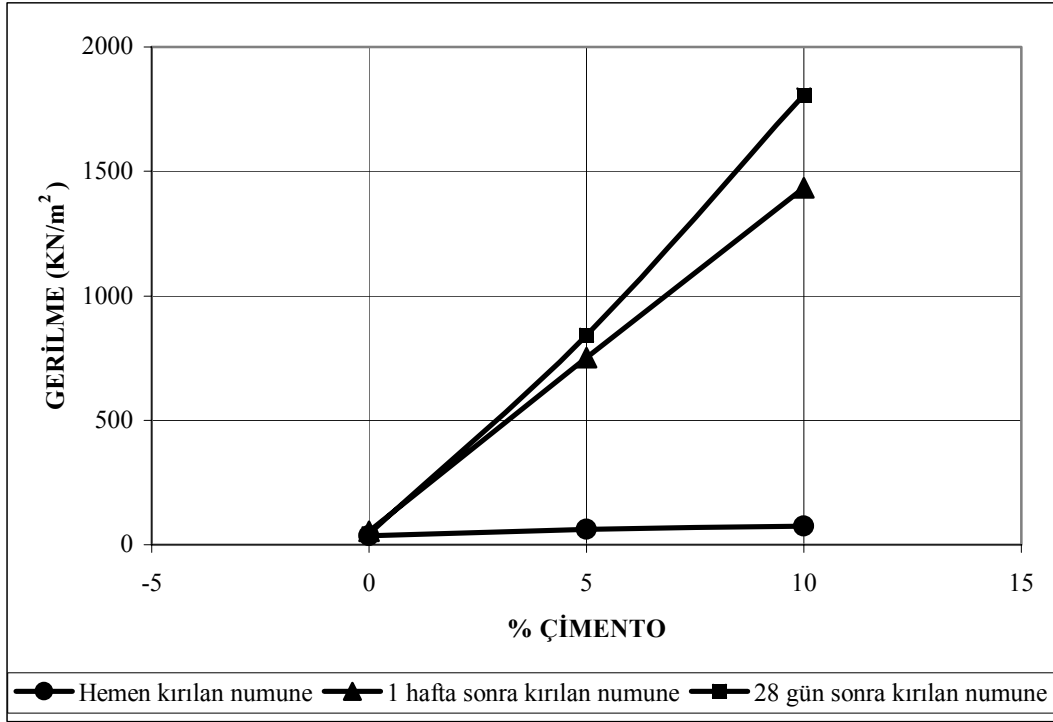
Şekil 4.60: Hemen kırılan numunelerin çimento yüzdesi-nihai gerilme değişimi



Şekil 4.61: 1 hafta sonra kırılan numunelerin çimento yüzdesi-nihai gerilme değişimi

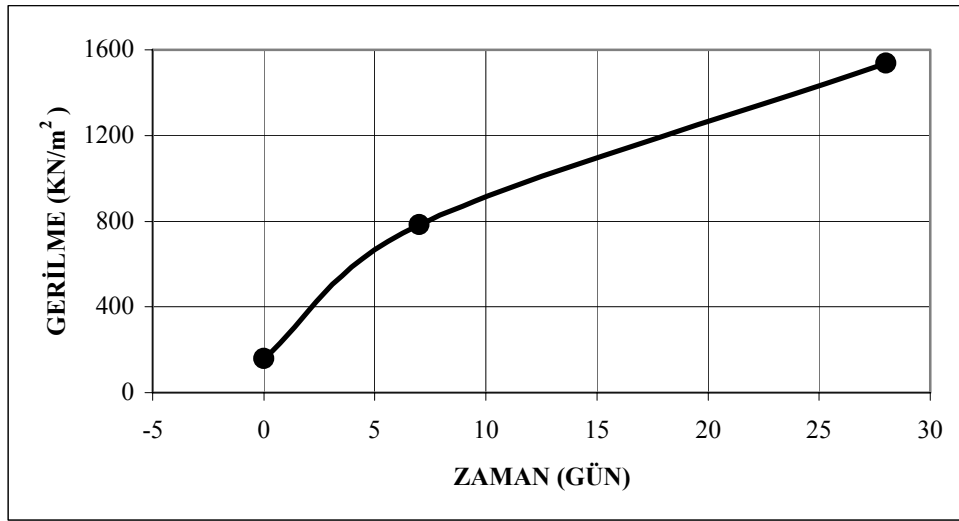


Şekil 4.62: 28 gün sonra kırılan numunelerin çimento yüzdesi-nihai gerilme değişimi

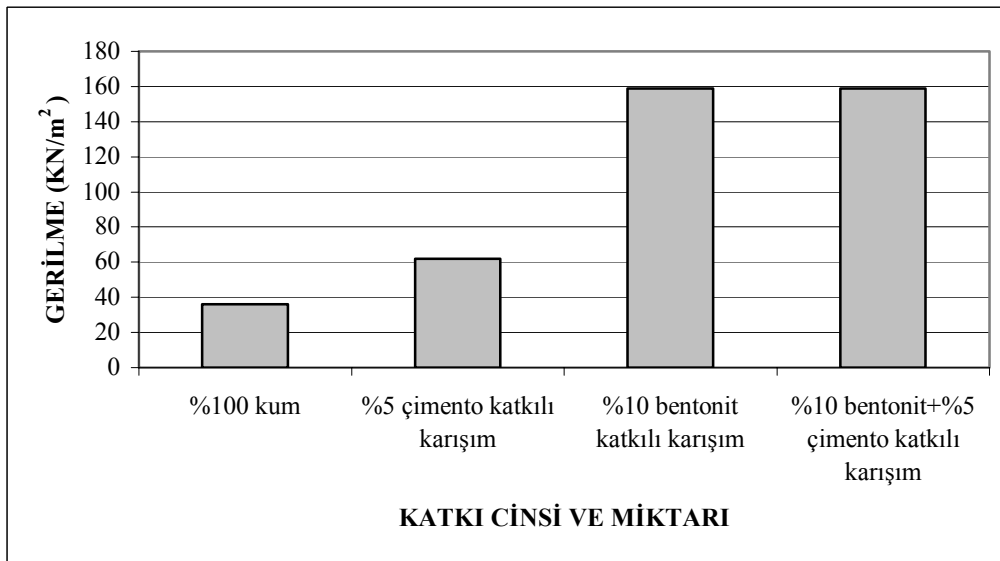


Şekil 4.63: Hemen, 1 hafta ve 28 gün sonra kırılan numunelerin çimento yüzdesi-nihai gerilme değişimleri

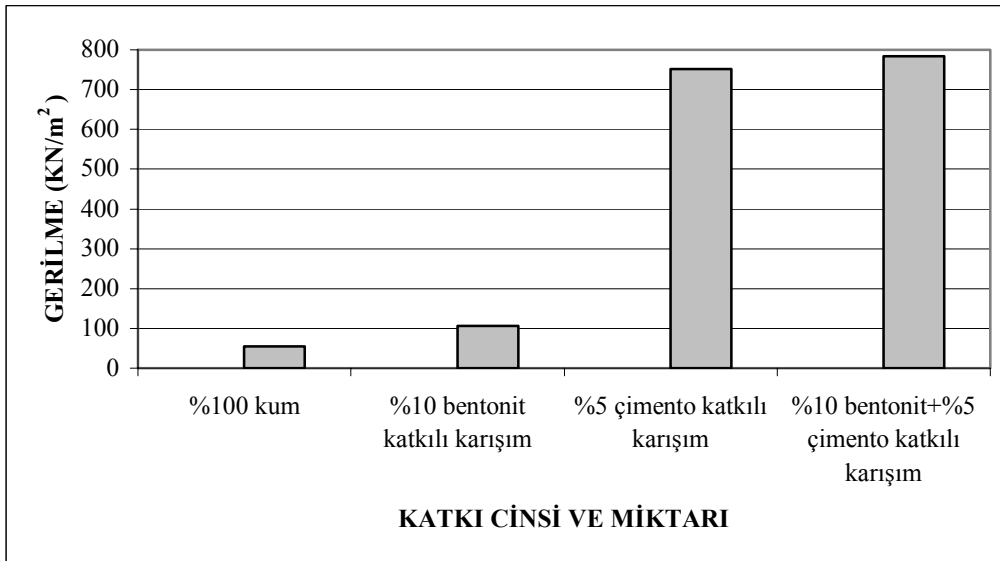
%10 bentonit + %5 çimento katkıli karışımın serbest basınç değişimleri incelendiği zaman, karışımında etkin olan katkının çimento olduğu gözlenmiştir. Çünkü serbest basınç mukavemeti yalnız çimento katkıli olan karışımlarda olduğu gibi her üç zaman diliminde de sürekli artış göstermektedir (Şekil 4.64). Bu karışımın üç zaman dilimindeki serbest basınç mukavemetlerinin %5 çimento katkıli ve %10 bentonit katkıli karışımlarınkine göre değişimi şekil 4.65, 4.66, 4.67’de verilmektedir.



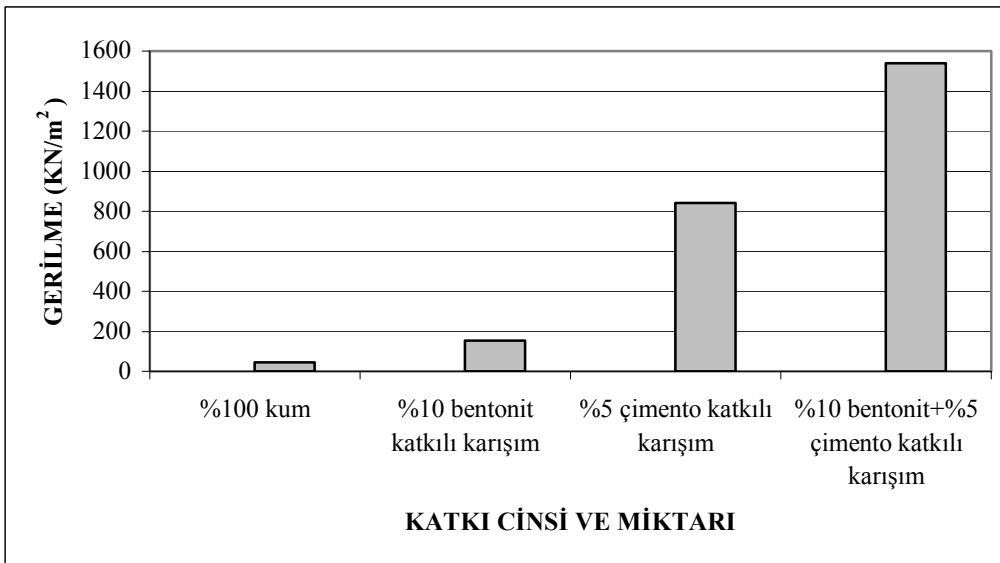
Şekil 4.64: %10 bentonit + %5 çimento katkıli karışımın nihai gerilme değerinin zamanla değişimi



Şekil 4.65: Hemen kırılan numunelerin nihai gerilme değerinin değişimi



Şekil 4.66: 1 hafta sonra kırılan numunelerin nihai gerilme değerinin değişimi



Şekil 4.67: 28 gün sonra kırılan numunelerin nihai gerilme değerinin değişimi

4.6 Permeabilite Deneyi

4.6.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi

Deneylerde kullanılan zemin karışımları, ince taneli olduğu için permeabiliteleri belirlenirken düşen seviyeli permeabilite deneyine tabi tutulmuşlardır. Kuru olarak hazırlanan karışımlar, laboratuvar ortamında homojen bir ıslatma ve karıştırma işlemi sonunda optimum su muhtevalarına getirilir. Bu işlemin ardından optimum su muhtevsındaki karışımlar, R=11,09 cm çapındaki ve H= 11,46 cm yüksekliğindeki permeabilite kalıplarına kompaksiyon yardımı ile yerleştirilir.

Hazır halde bulunana kalıbın alt ve üst kısımlarına flitre kağıdı yerleştirilerek kalıplar deney düzeneğine bağlanır. Zemin numunelerinin suya doymun hale gelebilmeleri için 3 gün suda bekletilir.

Bu süre sonunda düşen seviyeli permeabilite deneyi uygulanmaya başlanır. Belirli zaman aralıklarında okumalar yapılarak R=5,5 mm çapındaki cam boruda meydana gelen seviye düşmeleri tespit edilerek, permeabilite katsayısı 4.7 bağıntısı ile hesaplanır.

$$k = 2,3 \frac{axL}{Ax\Delta t} \log \frac{H_1}{H_2} \quad (4.7)$$

a : Cam borunun kesit alanı (cm²)

L : Permeabilite kalıbının yüksekliği (cm)

A : Permeabilite kalıbının kesit alanı (cm²)

Δt : İki okuma arasında geçen zaman (s)

H_1 : İlk okunan yükseklik (cm)

H_2 : İkinci okunan yükseklik (cm)

k : Permeabilite katsayısı (cm/s)

4.6.2 Bulgular

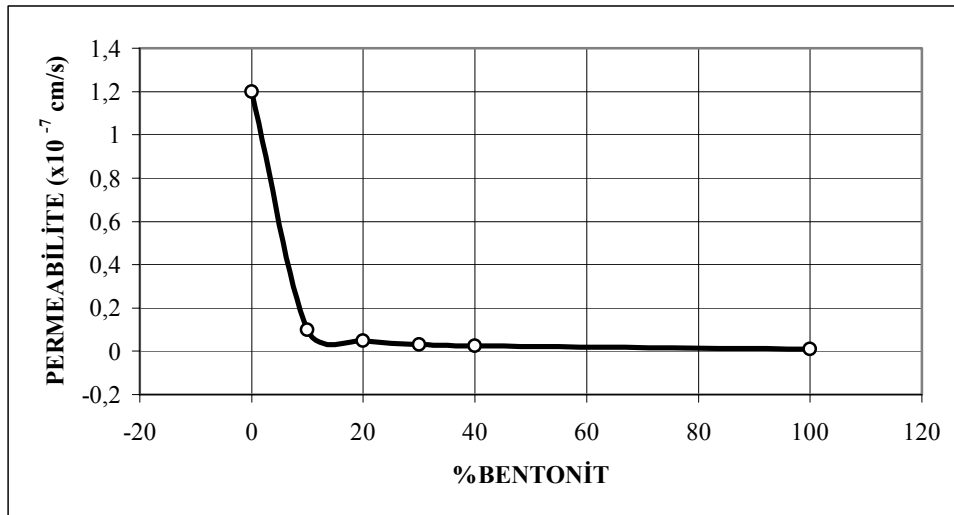
Yapılan düşen seviyeli permeabilite deneyleri neticesinde karışımlar, kum ve bentonit için elde edilen ortalama permeabilite katsayıları çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 : Permeabilite değerleri

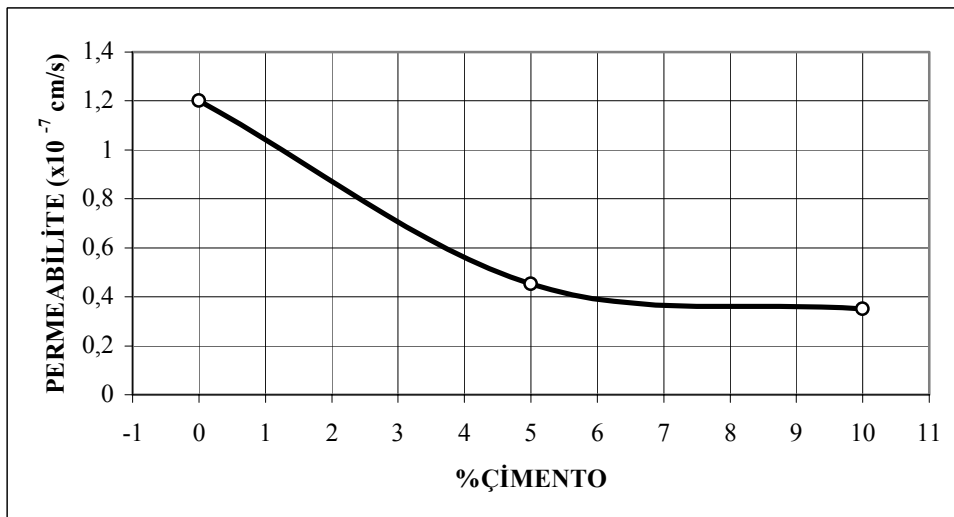
Bentonit oranı (%)	Permeabilite katsayısı (cm/s)
10	$9,89 \times 10^{-9}$
20	$4,75 \times 10^{-9}$
30	$3,21 \times 10^{-9}$
40	$2,57 \times 10^{-9}$
100	$9,51 \times 10^{-10}$
Çimento oranı (%)	
5	$4,53 \times 10^{-8}$
10	$3,5 \times 10^{-8}$
Bentonit + çimento oranı (%)	
10+5	$1,21 \times 10^{-9}$
Kum oranı (%)	
100	$1,2 \times 10^{-7}$

4.6.3 Permeabilite Deneyi Sonuçları

Sadece bentonit katkılı karışımlarda, bentonit oranındaki artışla beraber permeabilitenin de azaldığı şekil 4.68’de görülmektedir. Aynı şekilde sadece çimento katlı karışımlarda da çimento oranının artmasıyla permeabilite değerinde bir azalmanın olduğu şekil 4.69’da görülmektedir.

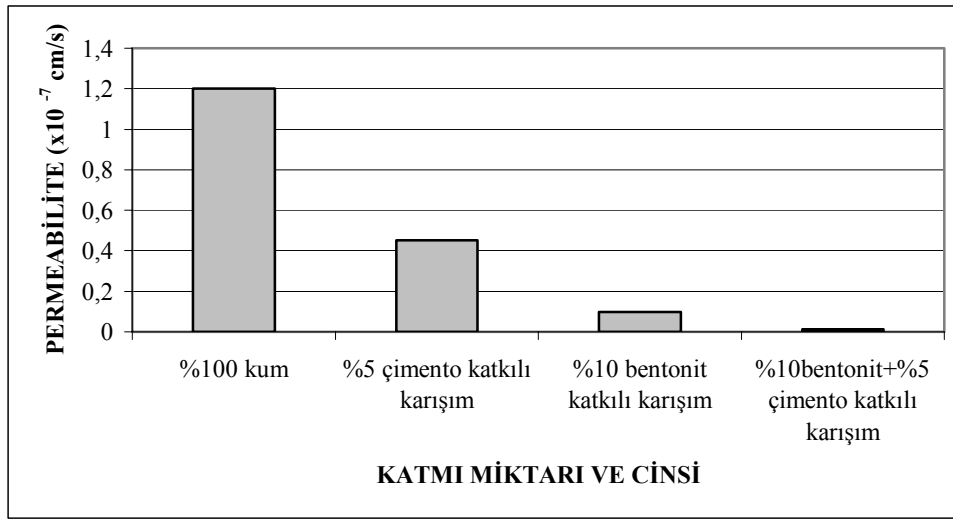


Şekil 4.68: Permeabilitenin bentonit oranı ile değişimi



Şekil 4.69: Permeabilitenin çimento oranı ile değişimi

%10 bentonit + %5 çimento katkıli karışıma bakıldığı zaman permealite değerinin, %10 bentonit ve % 5 çimento katkıli karışımınkine oranla daha küçük olduğu görülmektedir. Bu üç karışımın permealite değerlerinin değişimi şekil 4.70'de verilmektedir.



Şekil 4.70: Permeabilitenin katkı oranlarına göre değişimi

4.7 Konsolidasyon Deneyi

Uygulanan yükler altında zemin tabakalarının sıkışmasının genellikle tek doğrultuda (yükleme doğrultusunda) meydana geldiği kabul edilmektedir. Yapılarda zemine aktarılan düşey yükler altında, yatay düzlemler boyunca oluşan sürtünme ve adezyon kuvvetleri zeminin yatay doğrultuda şekil değiştirmesini sınırlamakta, zemin tabakaları esas olarak düşey doğrultuda sıkışmaktadır. Bu nedenle oturma hesaplarında tek boyutlu çözümler yeterlidir.

Konsolidasyon deneyi, oturmaları zamanla gerçekleşecek olan %10 ve %20 bentonit katkıli kumlu karışımlara uygulanmıştır.

4.7.1 Deneyin Yapılışı ve Değerlendirilmesi

Kuru olarak hazırlanan karışımlar, laboratuvar ortamında homojen bir ıslatma ve karıştırma işlemi sonunda optimum su muhtevalarına getirilir. Bu işlemin ardından optimum su muhtevastaki karışımlar, standart proktor kalıbında sıkışma işlemine tabi tutulur. Proktor kalıbının yakası çıkarılarak deney halkası hidrolik kriko yardımı ile kalıbın içerisine yerleştirilir ve kalıbın içinden hidrolik kriko yardımı ile çıkarılan 20

mm yüksekliğindeki halkanın her iki yüzeyi de maket bıçağı ile düzeltilerek deneye hazır hale getirilir. Numune halkası ödometre cihazına yerleştirilirken altına ve üstüne daha önceden ıslatılmış poröz taşları yerleştirilir ve deney başlatılarak artan yüklemeler için meydana gelen düşey deplasmanlar, takip eden günlerde tespit edilir.



Şekil 4.71: Numune halkasının ödometreye yerleştirilmesi

$$m_v = \frac{\Delta H}{Hx\Delta p} \quad (4.8)$$

$$\Delta H = H_2 - H_1 \quad (4.9)$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (4.10)$$

$$e_n = w_n x \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (4.11)$$

$$e_0 = (e_n + \frac{H_0 - H_n}{H_0}) x (\frac{H_0}{1 - H_0 + H_n}) \quad (4.12)$$

$$\Delta e = \frac{\Delta H}{H} x(1 + e_0) \quad (4.13)$$

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad (4.14)$$

p_2 : İkinci basınç değeri (KN/m²)

p_1 : İlk basınç değeri (KN/m²)

Δp : Basınç kademesi (KN/m²)

H_1 : İlk kalınlık değeri (mm)

H_2 : İkinci kalınlık değeri (mm)

ΔH : Kademedeki kalınlık değişimi (mm)

H : Basınç kademesindeki ortalama yükseklik (mm)

m_v : Hacimsel sıkışma katsayısı (m²/KN)

γ_w : Suyun birim hacim ağırlığı (KN/m³)

γ_s : Tane birim hacim ağırlığı (KN/m³)

w_n : Deney sonundaki su muhtevası

e_n : Deney sonundaki boşluk oranı

H_0 : Deney başlangıcındaki numune kalınlığı (mm)

H_n : Deney sonundaki numune kalınlığı (mm)

e_0 : Deney başlangıcındaki boşluk oranı

e : Herhangi bir kademedeki boşluk oranı

Δe : Kademeler arasındaki boşluk oranı farkı

a_v : Sıkışma katsayısı (m²/KN)

Deney başlamadan önce piknometre deneyi yardımı ile %10 ve %20 bentonit katkılı karışımların tane birim hacim ağırlıkları sırası ile 24,76 KN/m³ ve 23,12 KN/m³ olarak belirlenmiştir. Deney tamamlandıktan sonra bir miktar numune etüvde kurularak deney sonu su muhtevaları sırası ile 0,234 ve 0,330 olarak bulunmuştur. Deneyin su içerisinde yapılmasından ve deney sonu su muhtevalarından yararlanılarak 4.11

bağıntısından deney sonu boşluk oranları 0,58013 ve 0,76342 olarak elde edilmiştir. Deney başlangıcındaki ve deney sonundaki numune kalınlıkları ve deney sonu su muhtevası kullanılarak bağıntı 4.12'den deney başlangıcındaki boşluk oranları 0,68988 ve 0,74717 olarak elde edilmiştir. Bağıntı 4.13'den boşluk oranı farkının elde edilmesi ile hacimsel sıkışma katsayısı ve hacimsel sıkışma sayısının bulunması için gerekli olan veriler elde edilmiş ve aşağıdaki 4.13.a, 4.13.b, 4.13.c, 4.14.a, 4.14.b, 4.14.c çizelgelerinde yer alan kademeler neticesinde istenilen değerlere ulaşılmıştır.

4.7.2 Bulgular

Çizelge 4.13.a: %10 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları

w_n	0,234
σ_s (KN/m ³)	24,76
e_n	0,58013
ΔH (mm)	1,299
H_o (mm)	20
e_o	0,68988
H_n (mm)	18,701
Δe	0,08449

Çizelge 4.14.a: %20 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları

w_n	0,330
σ_s (KN/m ³)	23,12
e_n	0,76342
ΔH (mm)	-0,186
H_o (mm)	20
e_o	0,74717
H_n (mm)	20,186
Δe	0,0873587

Çizelge 4.13.b: %10 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları

P (KN/m ²)	Düşey dep. (mm)	ΔH (mm)	$H_0 - \Delta H$ (mm)	Δp (KN/m ²)	$\Delta H = H_1 - H_2$ (mm)	$H = (H_1 + H_2)/2$ (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0	0	0	20	0	0	22,9
50	0,175	0,175	19,825	50	0,175	19,912
100	0,161	0,336	19,664	50	0,161	19,744
200	0,286	0,622	19,378	100	0,286	19,521
400	0,428	1,05	18,95	200	0,428	19,164
800	0,463	1,513	18,487	400	0,463	18,718
1600	0,534	2,047	17,953	800	0,534	18,22
800	-0,041	2,006	17,994	-800	-0,041	17,973
400	-0,088	1,918	18,082	-400	-0,088	18,038
200	-0,146	1,772	18,228	-200	-0,146	18,155
100	-0,217	1,555	18,445	-100	-0,217	18,336
50	-0,256	1,299	18,701	-50	-0,256	18,573

Çizelge 4.13.c: %10 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları

$\Delta H/H$	$m_v(m^2/KN)$	$\Delta e = 0,08387 * \Delta H$	$e = e_0 - \Delta e$	$a_v = \Delta e / \Delta P (m^2/KN)$
(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
((6)/(7))	((8)/(5))			((10)/(5))
0,00000	0	0	0,68988	0
0,00879	0,0001758	0,01479	0,67509	0,0002957
0,00815	0,0001631	0,01360	0,66149	0,0002721
0,01465	0,0001465	0,02416	0,63733	0,0002416
0,02233	0,0001117	0,03616	0,60117	0,0001808
0,02473	0,0000618	0,03912	0,56205	0,0000978
0,02931	0,0000366	0,04512	0,51693	0,0000564
-0,00228	0,0000029	-0,00346	0,52039	0,0000043
-0,00488	0,0000122	-0,00744	0,52783	0,0000186
-0,00804	0,0000402	-0,01234	0,54016	0,0000617
-0,01183	0,0001183	-0,01833	0,55850	0,0001833
-0,01378	0,0002757	-0,02163	0,58013	0,0004326

Çizelge 4.14.b: %20 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları

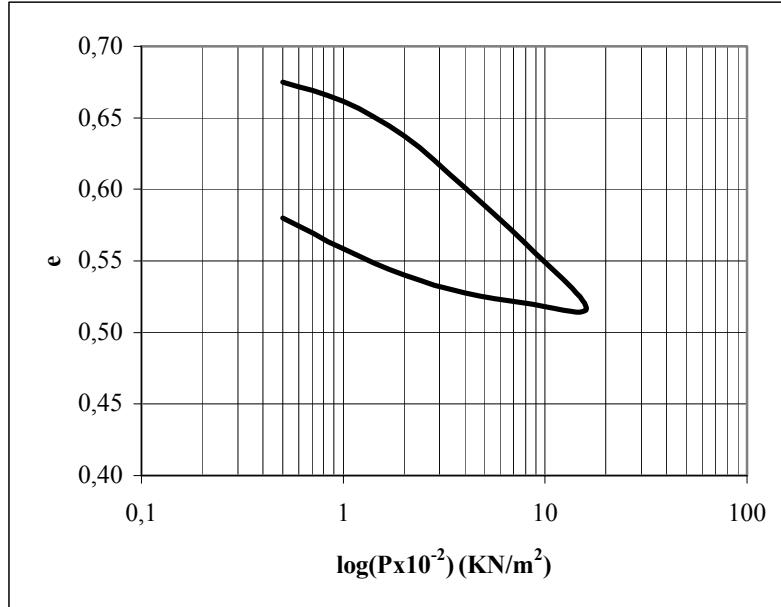
P (KN/m ²)	Düşey dep. (mm)	ΔH (mm)	$H_0 - \Delta H$ (mm)	Δp (KN/m ²)	$\Delta H = H_1 - H_2$ (mm)	$H = (H_1 + H_2)/2$ (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0	0	0	20	0	0	22,9
50	0,184	0,184	19,816	50	0,184	19,908
100	0,206	0,39	19,61	50	0,206	19,713
200	0,295	0,685	19,315	100	0,295	19,462
400	0,49	1,175	18,825	200	0,49	19,07
800	0,646	1,821	18,179	400	0,646	18,502
1600	0,882	2,703	17,297	800	0,882	17,738
800	-0,149	2,554	17,446	-800	-0,149	17,371
400	-0,445	2,109	17,891	-400	-0,445	17,668
200	-0,584	1,525	18,475	-200	-0,584	18,183
100	-0,765	0,76	19,24	-100	-0,765	18,857
50	-0,946	-0,186	20,186	-50	-0,946	19,713

Çizelge 4.14.c: %20 bentonitli karışımın konsolidasyon deneyi bulguları

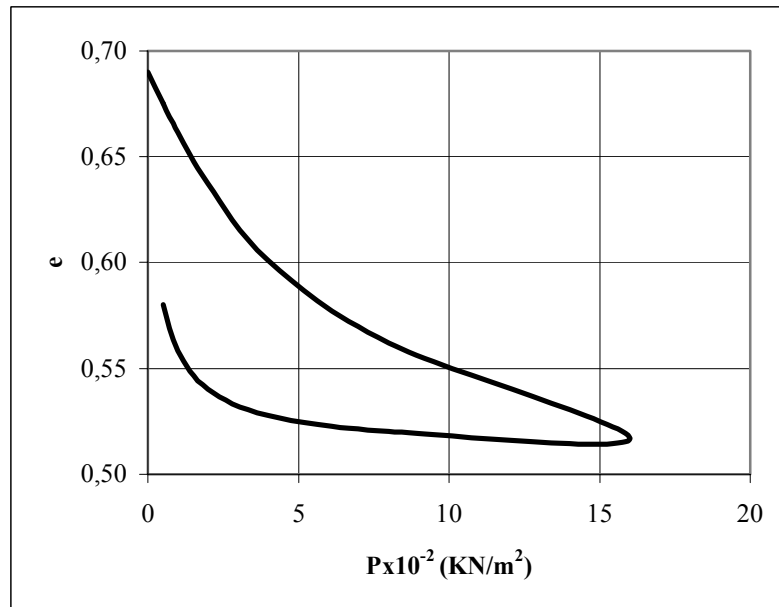
$\Delta H/H$	$m_v(m^2/KN)$	$\Delta e = 0,08387 * \Delta H$	$e = e_0 - \Delta e$	$a_v = \Delta e / \Delta P(m^2/KN)$
(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
((6)/(7))	((8)/(5))			((10)/(5))
0	0	0	0,74717	0
0,00924	0,0001848	0,01607	0,73109	0,00032148
0,01045	0,0002089	0,01799	0,71310	0,00035991
0,01515	0,0001515	0,02577	0,68732	0,00025770
0,02569	0,0001284	0,04280	0,64452	0,00021402
0,03491	0,0000872	0,05643	0,58808	0,00014108
0,04972	0,0000621	0,07705	0,51103	0,00009631
-0,00857	0,0000107	-0,01301	0,52405	0,00001627
-0,02518	0,0000629	-0,03887	0,56293	0,00009718
-0,03211	0,0001605	-0,05101	0,61394	0,00025508
-0,04056	0,0004056	-0,06682	0,68077	0,00066829
-0,04798	0,0009597	-0,08264	0,76341	0,00165282

Çizelge 4.13.b., 4.13.c ve 4.14.b, 4.14.c'de bulunan basınç kademelerine karşılık gelen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak, arazi uygulamaları esnasında meydana gelecek olan nihai oturma değeri hesaplanabilir.

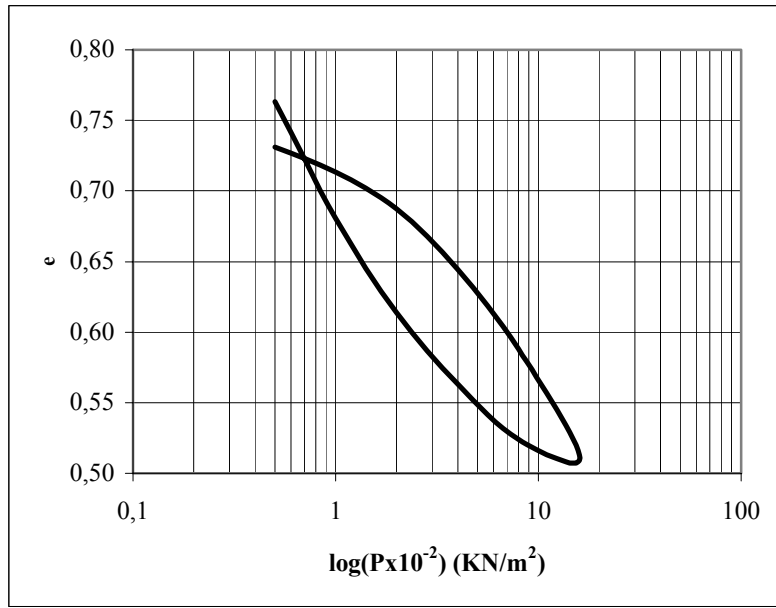
4.7.3 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları



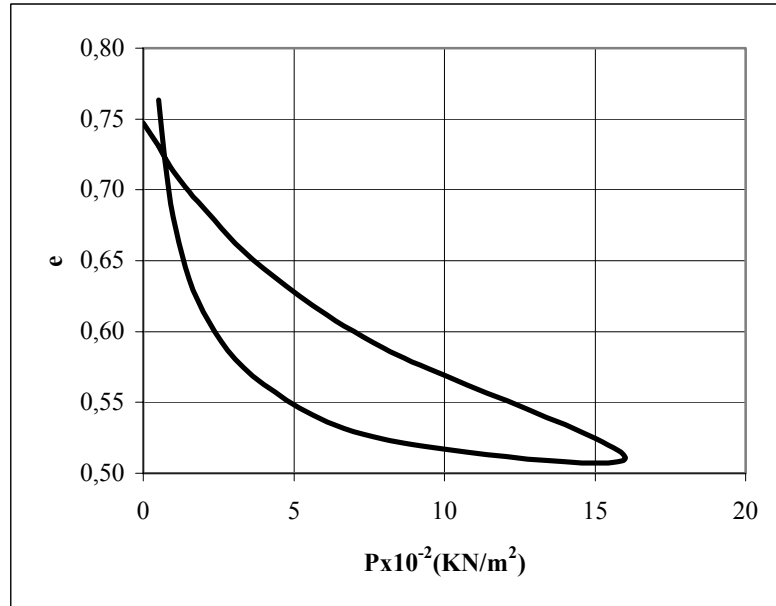
Şekil 4.72: %10 bentonit katkıli karışımın e-logP eğrisi



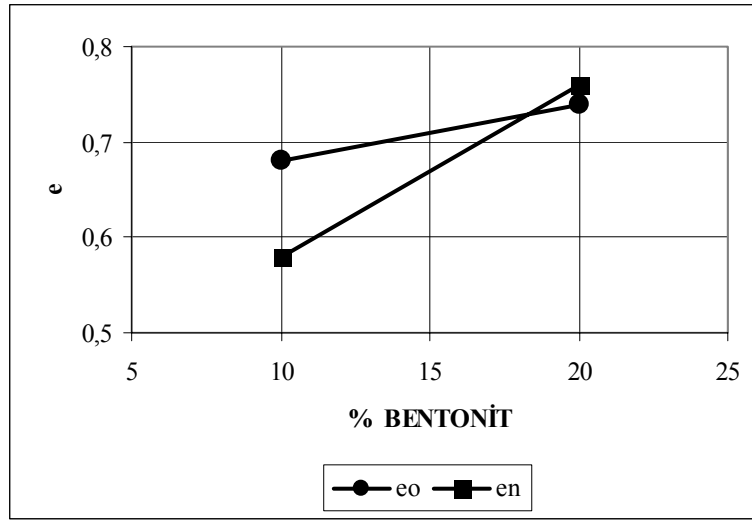
Şekil 4.73: %10 bentonit katkıli karışımın e-P eğrisi



Şekil 4.74: %20 bentonit katkılı karışımın e-logP eğrisi



Şekil 4.75: %20 bentonit katkılı karışımın e-P eğrisi



Şekil 4.76: % Bentonit-e değişim grafiği

%10 bentonit katkılı kumlu karışımın boşluk oranı-basınç grafikleri (Şekil 4.72 ve 4.73) incelendiğinde deney başlangıcındaki boşluk oranının deney sonundaki boşluk oranından küçük olduğu görülmektedir. %20 bentonit katkılı kumlu karışımın boşluk oranı-basınç grafikleri (Şekil 4.74 ve 4.75) incelendiğinde ise durumun tam ters olarak değiştiği, deney sonu boşluk oranını deney başlangıcındakine oranla artış gösterdiği görülmektedir. Her iki bentonit yüzdesi için deney başlangıcı ve deney sonu boşluk oranları şekil 4.76'de görülmektedir. Sonuç olarak, şekil 4.76'daki grafiğe göre karışımdaki %18,5 bentonit oranına kadar şişme probleminin yaşanmadığı bu katkı yüzdesini aşan karışımlarda şişme probleminin olacağı görülmektedir.

BEŞİNCİ BÖLÜM MALİYET ANALİZİ

5.1 Giriş

Yapılan çalışmada kullanılan karışımların maliyetleri, piyasa analizleri neticesinde elde edilmiştir. Maliyet analizi yapılırken, malzeme ve taşıma fiyatları gözönünde bulundurulmuştur. Taşıma maliyetleri belirlenirken araçların 50 km'lik bir yarı çap içinde nakliye yapacağı düşünülmüştür. Malzeme ile saha içerisinde dolgu oluşturma esnasında kullanılacak greyder, silindir, arazöz ve işçi maliyetleri her karışımda yaklaşık aynı olacağı için dikkate alınmamıştır.

5.2 Maliyet Belirleme

Yapılan piyasa analizleri neticesinde elde edilen malzeme fiyatları ve 50 km yarıçaplı daire içindeki taşıma maliyetleri çizelge 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.1: Malzeme fiyatları ve taşıma maliyetleri

	Malzeme fiyatı (YTL/t)	Taşıma maliyeti(YTL/t)
30 nolu elekten elenen kum	2,5	2,5
Bentonit	75	3,3
Çimento	142	4

1 m³ dolgunun maliyeti belirlenirken, sıkışmış olan hacimdeki malzeme miktarları gözönünde bulundurularak fiyatlandırma yapılmıştır. Karışımlara ait 1 m³ dolgu maliyetlerinin belirlenmesi çizelge 5.2.a,b,c,d'de yer almaktadır. Karışımlara ait fiyat analizlerinin değişimi şekil 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.2.a: Karışımların özellikleri

	W_{opt} (%)	k_{max} (KN/m ³)	n (KN/m ³)	1 m ³ dolgudaki su miktarı (t)
%10 bentonit katkılı kar.	15,5	16,46	19,01	0,255
%20 bentonit katkılı kar.	17,6	15,45	18,17	0,271
%30 bentonit katkılı kar.	18,1	15,12	17,86	0,273
%40 bentonit katkılı kar.	23,7	14,51	17,95	0,343
%5 çimento katkılı kar.	10,75	17,55	19,44	0,188
%10 çimento katkılı kar.	12	17,17	19,23	0,206
%10bentonit+%5çimento katkılı karışım	12,8	17,22	19,42	0,220

Çizelge 5.2.b: 1 m³ dolgudaki malzeme miktarları

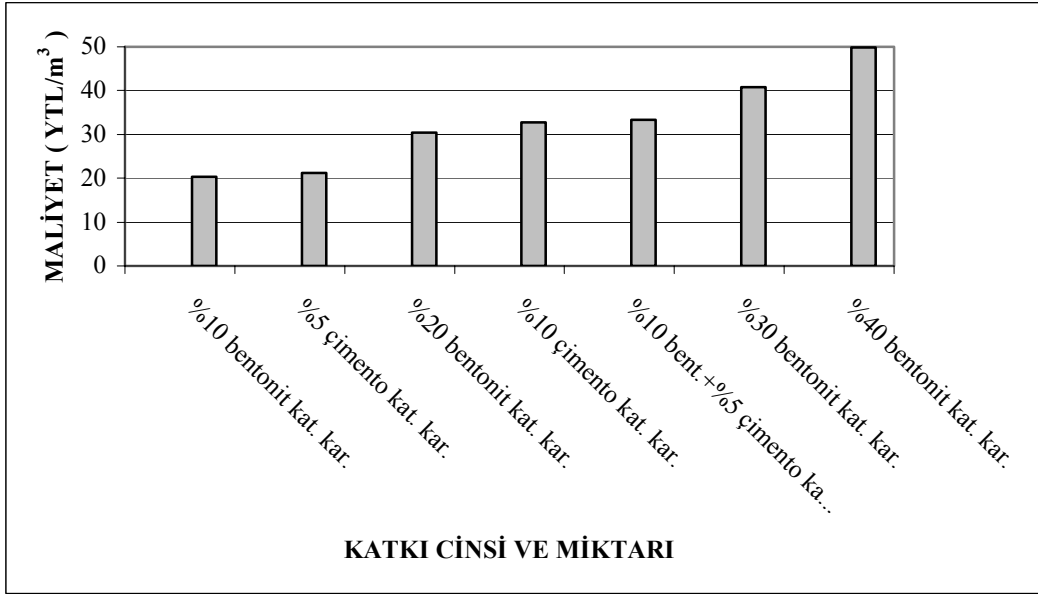
	Karışım miktarı (t)	Bentonit miktarı (t)	Çimento miktarı (t)	Kum miktarı (t)
%10 bentonit katkılı kar.	1,646	0,164	-	1,481
%20 bentonit katkılı kar.	1,545	0,309	-	1,236
%30 bentonit katkılı kar.	1,512	0,453	-	1,058
%40 bentonit katkılı kar.	1,451	0,580	-	0,870
%5 çimento katkılı kar.	1,755	-	0,087	1,667
%10 çimento katkılı kar.	1,717	-	0,171	1,545
%10bentonit+%5çimento katkılı karışım	1,722	0,172	0,086	1,463

Çizelge 5.2.c: 1 m³ dolgudaki malzeme maliyetleri

	Bentonit maliyeti (YTL)	Çimento maliyeti (YTL)	Kum maliyeti (YTL)
%10 bentonit katkılı kar.	12,345	-	3,704
%20 bentonit katkılı kar.	23,175	-	3,090
%30 bentonit katkılı kar.	34,020	-	2,646
%40 bentonit katkılı kar.	43,530	-	2,177
%5 çimento katkılı kar.	-	12,461	4,168
%10 çimento katkılı kar.	-	24,381	3,863
%10bentonit+%5çimento katkılı karışım	12,915	12,226	3,659

Çizelge 5.2.d: 1 m³ dolgudaki taşıma maliyetleri ve toplam maliyet

	Bentonitin taşıma maliyeti (YTL)	Çimentonun taşıma maliyeti (YTL)	Kumun taşıma maliyeti (YTL)	Toplam maliyet (YTL/m ³)
%10 bentonit katkılı kar.	0,543	-	3,704	20,30
%20 bentonit katkılı kar.	1,020	-	3,090	30,37
%30 bentonit katkılı kar.	1,497	-	2,646	40,81
%40 bentonit katkılı kar.	1,915	-	2,177	49,80
%5 çimento katkılı kar.	-	0,351	4,168	21,15
%10 çimento katkılı kar.	-	0,687	3,863	32,79
%10bentonit+%5çimento katkılı karışım	0,568	0,344	3,659	33,37



Şekil 5.1: Karışım maliyetleri

Kil fiyatının belirlenmesi için yapılan çalışmalarda, kilin genelde uygulanacağı saha civarındaki arazinin istimlak edilmesi veya satın alınması yoluyla elde edildiği görülmüştür. Alınan arazi koşullarındaki kilin derinliğine göre maliyet, değişim göstermektedir. Ortalama 1 m kil tabakası bulunan 1000 m²'lik bir arazinin fiyatı 2000 YTL olarak belirlenmiştir. Arazideki kilin kullanılması için nebati kısmın ortalama 30 cm kalınlığında sıyırılması ve kil kullanımı bittikten sonra yerine yerleştirilmesi zorunluluğu bulunmaktadır. Yapılan araştırma neticesinde bu işin, maliyeti sıyrılan zeminin m³'ü bazında 1 YTL arttırdığı belirlenmiştir. Kilin nakli esnasında 15 m³ taşıyan kamyonun gidiş dönüşte ortalama 0,6 lt/km mazot yaktığı, mazot fiyatının 2 YTL/lt olduğu ve 50 km'lik bir mesafede taşıma yaptığı gözönünde bulundurulmuştur. Tüm verilerden yararlanarak belirlenen kilin maliyeti çizelge 5.3'te verilmektedir. Kilin taşıma mesafesine bağlı toplam maliyeti bağıntı 5.1'de görülmektedir.

$$T.M = K.M + N.M + \frac{1,2xy}{t} \quad (5.1)$$

T.M: Toplam maliyet (YTL/m³)

K.M: Kili satın alma maliyeti (YTL/m³)

N.M: Nebati sıyırma ve serme maliyeti (YTL/m³)

x: Mesafe (km)

y: Mazot fiyatı (YTL/lt)

t: Kamyonun taşıma hacmi (m³)

Yapılmış olan hesaplarda, kilin satın alma maliyeti 2 YTL/m³, nebati sıyırma ve serme maliyeti 1 YTL/m³, mazot fiyatı 2 YTL/lt, kamyon taşıma hacmi 15 m³ olarak alınmıştır. Dolayısıyla kil için toplam maliyet formülü bağıntı 5.2'deki hale gelmiştir.

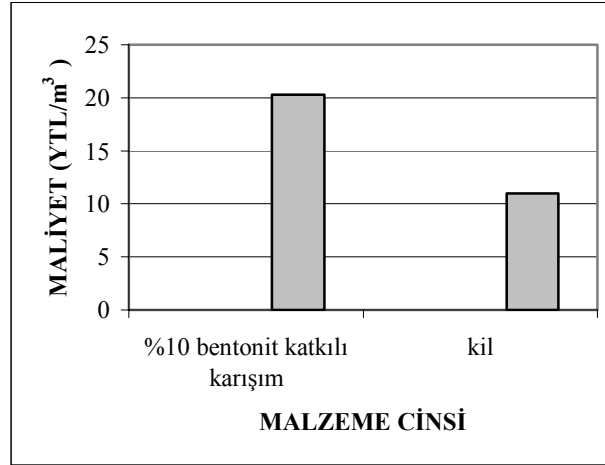
$$T.M = 3 + \frac{2,4x}{15} \quad (5.2)$$

Çizelge 5.3: 1 m³ kilin maliyeti

Satın alma maliyeti (YTL/m ³)	Taşıma maliyeti (YTL/m ³)	Nebati sıyırma ve serme maliyeti (YTL/m ³)	Toplam maliyet (YTL/m ³)
2	8	1	11

5.3 Değerlendirme

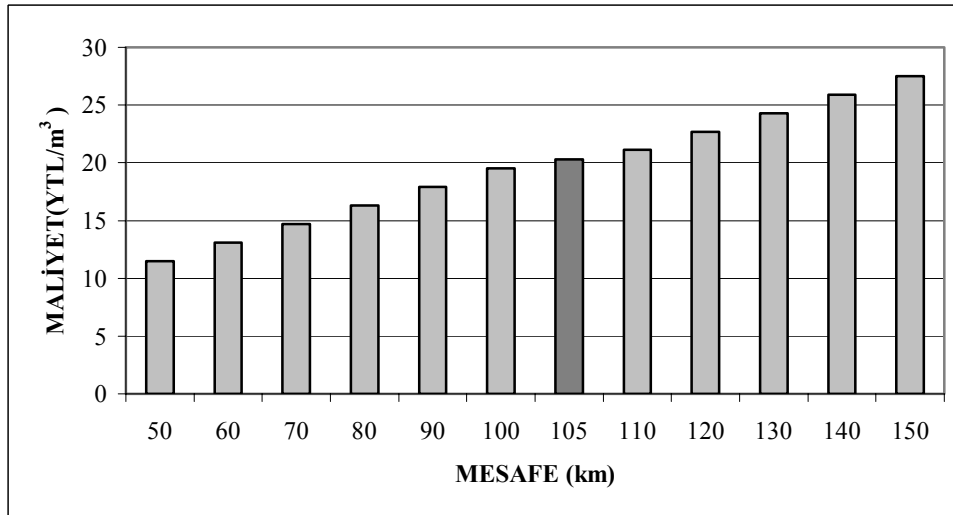
Kilin bulunmadığı, taşınmasının ekonomik olmadığı koşullarda kullanılmak amacıyla alternatif geçirimsiz zemin elde etmek için yapılan bu çalışmada, sınır kullanılabilirlik şartlarını sağlayan en ekonomik çözüm olan %10 bentonit katkı karışımının maliyetinin kilin maliyeti ile karşılaştırılması gerekliliği doğmuştur. İki zemine ait maliyetler şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2: Fiyat karşılaştırması

50 km'lik yarıçaplı daire içinden kum, bentonit ve kil tedarik edilerek dolgu yapılmak istenildiğinde kil ile yapılan dolgu %10 bentonit katkıli karışımla yapılan dolguya göre daha ekonomiktir. Kilin taşıma mesafesinin artmasıyla maliyeti de artacaktır. Kil 105 km mesafeden taşınmaya başladığı anda, 50 km mesafeden getirilen kum ve bentonitle yapılan dolgu daha ekonomik olmaya başlamaktadır.

Yapılan analizler neticesinde kilin mesafeye bağlı toplam maliyetinin değişimi şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.3: Kilin toplam maliyetinin mesafeye bağlı değişimi

ALTINCI BÖLÜM SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

6.1 Sonuçlar

Standart proktor deneyi neticesinde; bentonit-kum karışımlarının optimum su muhtevalarının %0 ile %100 bentonit katkısı arasında %9,8'den %47'ye kadar ikinci derece bir denklem şeklinde artışı, maksimum kuru birim hacim ağırlığının 17,41 KN/m³'den 10,3 KN/m³'e lineer olarak azalışı gözlenmiştir. Çimento-kum karışımlarının optimum su muhtevalarının %0 ile %10 çimento katkısı arasında %9,8'den %12'ye, maksimum kuru birim hacim ağırlığının 17,41 KN/m³'den 17,71 KN/m³'e lineer bir artışı gerçekleşmiştir. %10 bentonit + %5 çimento katkılı karışımın optimum su muhtevası %12,8, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 17,22 KN/m³'tür.

Bentonit-kum karışımlarının likit limitleri %10 ile %100 bentonit katkısı aralığında %48,06'dan %359,38'e kadar lineer olarak artmaktadır. Elde edilen bu netice, Magistris'in 1998 yılında yaptığı çalışmayla paralellik göstermektedir.

Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler; hemen, 1 hafta 28 gün olmak üzere üç zaman diliminde serbest basınç deneyine tabi tutuldu. Bentonit-kum karışımları üç zaman diliminde de %20'lik katkı oranına kadar artış gösterdiği, artan katkı oranlarında azaldığı görülmektedir. Çimento-kum ve bentonit-çimento-kum karışımlarının üç zaman diliminde de artışı gözlenmiştir.

Düşen seviyeli permeabilite deneyi için optimum su muhtevasında hazırlanıp, üç gün suda bekletilen karışımların permeabilitelerinin; %10 ile %100 bentonit katkısı aralığında $9,89 \times 10^{-9}$ cm/s'den $9,51 \times 10^{-10}$ cm/s'ye azaldığı, %5'den %10 çimento katkısına kadar $4,53 \times 10^{-8}$ cm/s'den $3,5 \times 10^{-8}$ cm/s'ye azaldığı, %10 bentonit + %5 çimento katkılı karışımın $1,21 \times 10^{-9}$ cm/s, kumun $1,2 \times 10^{-7}$ cm/s olduğu tespit edilmiştir.

%10 ve %20 bentonit katkılı karışımlara yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda %18,5 bentonit katkısına kadar şişme probleminin olmadığı artan bentonit yüzdelerinde şişme problemiyle karşılaşılacağı görülmüştür.

Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları ve değişimleri toplu olarak çizelge 6.1.a ve 6.1.b'de verilmektedir.

Çizelge 6.1.a: Deney sonuçlarının toplu gösterimi

Deney adı	Standart proktor		Likit limit	Serbest basınç		
	w_{opt} (%)	k_{max} (KN/m ³)		w_L (%)	q_u (KN/m ²) (hemen)	q_u (KN/m ²) (1hafta)
Kum	9,8	17,41	-	36	55	44
% Bentonit						
10	15,5	16,46	48,06	159	106	154
20	17,6	15,45	95,74	196	134	181
30	18,1	15,12	133,63	171	131	163
40	23,7	14,51	179,96	157	121	140
100	47	10,3	359,38	-	-	-
% Çimento						
5	17,5	17,55	-	62	752	841
10	12	17,71	-	74	1434	1807
% Bentonit+Çimento						
10+5	12,8	17,22	-	159	784	1538

Çizelge 6.1.b: Deney sonuçlarının toplu gösterimi

Deney adı	Permeabilite	Konsolidasyon	
		e_0	e_n
Malzeme	k (cm/s)		
Kum	$1,2 \times 10^{-7}$	-	-
% Bentonit			
10	$9,89 \times 10^{-9}$	0,68988	0,58013
20	$4,75 \times 10^{-9}$	0,74717	0,76341
30	$3,21 \times 10^{-9}$	-	-
40	$2,57 \times 10^{-9}$	-	-
100	$9,51 \times 10^{-10}$	-	-
% Çimento			
5	$4,53 \times 10^{-8}$	-	-
10	$3,5 \times 10^{-8}$	-	-
% Bentonit+Çimento			
10+5	$1,21 \times 10^{-9}$	-	-

6.2 Değerlendirme

Türkiye’de yapılan katı atık depolama tesislerinde, geçirimsiz tabakalar için istenilen sınır permeabilite katsayısı 1×10^{-6} cm/s, basınç mukavemeti değeri 45 KN/m^2 ’dir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, %5 çimento katkılı kumlu karışımın permeabilite katsayısı ($k=4,53 \times 10^{-8}$ cm/s) ve serbest basınç mukavemeti ($q_u=62 \text{ KN/m}^2$) açısından katı atık depolama tesislerinde kullanılabilir özellikleri taşımasına karşın, %10 bentonit katkılı karışımın daha ekonomik olması ve gerekli permeabilite ve basınç kriterlerini sağlaması nedeniyle ($k=9,89 \times 10^{-9}$ cm/s ve $q_u=159 \text{ KN/m}^2$) daha kullanılabilir durumdadır.

Toprak dolgu barajların geçirimsiz ünitesi olan kil çekirdekler açısından bir değerlendirme yapıldığında, %10 bentonit katkılı kumlu karışımın sınır şartları sağladığı ve en ekonomik çözüm olduğu çizelge 6.2’de görülmektedir.

Çizelge 6.2: Kil çekirdek için, sınır şartların ve %10 bentonit katkıli karışımın karşılaştırılması (D.S.İ.)

	Sınır şartlar	%10 bentonit katkıli karışım
s (KN/m ³)	<26	24,76
k_{max} (KN/m ³)	>16	16,46
w_{opt} (%)	15-20	15,5
w_L (%)	40-50	48,06
k (cm/s)	$<1 \times 10^{-8}$	$9,89 \times 10^{-9}$

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan üç tip karışım arasından, %10 bentonit katkıli karışım, katı atık depolama tesislerinin kil şilteleri ve toprak dolgu barajların kil çekirdekleri için gerekli olan sınır şartları sağlayan en ekonomik çözüm olmuştur.

Yapılan maliyet analizi sonucunda %10 bentonit katkıli kum-bentonit karışımının maliyetinin 50 km mesafede kalındığında 20,3 YTL/m³ olduğu, kilin maliyetinin 11 YTL/m³ olduğu görülmektedir. Kilin taşıma mesafesinin 105 km'yi aştığı durumlarda ise %10 bentonit katkıli kum bentonit karışımı daha ekonomik hale gelmektedir.

KAYNAKLAR

Akbulut, A., Bentonit, Ankara, 1996.

Benson, C.H., Probabilty Distributions for Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 119(3), 471-486, 1993.

Benson, C.H. and Daniel D.E., Minimum Thickness of Compacted Soil, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 120(3), 129-152, 1994.

Bowles, J.E., Engineering Properties of Soil and Their Measurement, Mcgraw-Hill Book Company, Singapore, 1998.

Capper, L.P., Cassie, F.W., İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği (Vahit Kumbasar ve Fazıl Kip).

Chapuis, R.P, Sand-Bentonite Liners; Predicting Permeability from Laboratory Test, Cacadian Geotechnical Journal, Vol. 27(1), 47-57, 1990.

Çakı, M., Ünye Karahamza Bentonitlerinin Değerlendirilmesi, İ.T.Ü. Metalurji Fakültesi, Doktora Tezi, 1995.

D'Apollonia, D.J., Soil Bentonite Slurry Trench Cutoffs, J. Geotech. Engng. Div. ASCE., 106(4), 399-417, 1980.

DSİ, Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu Bildirileri, İzmir, 20-25 Eylül1993.

Erdinç, Ş.Ş., Bentonitlerin Metalurjideki Uygulamaları Yönünden Araştırılması, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Metalurji Fakültesi, 1976.

Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D., Geotechnical Engineering of Embankment Dams, Brookfield, 1992.

Güngör, N., Bentonitik Kil Minerallerinin Yapı ve Özellikleri Üzerine Değişebilen Katyonların Etkilerinin Fiziksel Yöntemlerle İncelenmesi, İ.T.Ü. Maden Fakültesi, Doktora Tezi, 1981.

Holtz, R.D. and Kovacs W.D., An Introduction to Geotechnical Engineering, New Jersey, 1981.

İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, Endüstriyel Mineraller Envanteri, Aralık 1999.

Katı Atık Depolama Yönetmeliği, 1992.

Katı Atık Yönetmeliği, 1991.

Kenney, T.C., van Veen, W.A., Swallow, M.A. and Sungaila, M.A., Hydraulic Conductivity of Compacted Sand-Bentonite Mixtures, Canadian Geotechnical Journal, 29(3), 364-374, 1992.

Kılıç, M., Durak, A. Ve Pazar, H.D., Tokat Çevresinde İnşaa Edilen Bazı Göletlerin Bent Gövdesinde Kullanılan Dolgu Meteryallerinin bazı Özellikleri ve Kil Minerolojisi, II. Ulusal Kil Sempozyumu, 353-364, Ankara, 1985.

Komine, H. and Ogata, N., Prediction for Swelling Characteristics of Compacted Bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 33(1), 11-12, 1996.

Komine, H. and Ogata, N., Experimental Study on Swelling Characteristics of Compacted Bentonite, *Cacadian Geotechnical Journal*, 31(4), 478-490, 1994.

Kumbasar, V. Ve Kip, F., *Zemin Mekaniği Problemleri*, İstanbul, 1999.

Magister, F.S., Geotechnical Engineering Department, University of Napoli Federico II. Via Claudio, Naples Italy, 1998.

Millot, G., *Geologie des Argiles*, Paris, 1964.

Nagaraj, T.S., Pandian, N.S. and Raju, P.S.R.N., Approach for Prediction of Compressibility and Permeability Behavior of Sand-Bentonite Mixes, *Indian Geotechnical Journal*, 21(3), 271-282, 1991.

Önalp, A., *Geoteknik Bilgisi I Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği*, İstanbul, 2002.

Pandian, N.S., Nagaraj, T.S. and Raju, P.S.R.N., Permeability and Compressibility Behavior of Bentonite-Soil Mixes, *Geotechnical Testing Journal*, 18(1), 86-93, 1995.

Sağlamer, A. ve İncecik, M., Bentonit Bulamaçlı Diyafram Duvarlar, II. Ulusal Kil Sempozyumu, 387-396, Ankara, 1985.

Seed, H.B., Prediction of Swelling Potential For Compacted Clays, *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE*, 88, 53-87, 1962.

Sharma, D.H. and Lewis, S.P., *Waste Containment System, Waste Stabilization and Landfills*, U.S.A, 1994.

Shick, P., Deponiebasisdichtungen aus Bentokies, *Bautechnik* 71, 9, 1994.

Stewart, D.J., Design Prameters for Bentonite-enhanced Sand as a Landfill Liner, *Proceedings of the Institution of Civil Engineering*, 189-195, U.K, 1999.

Wang, M.C., Soil compaction and Permeability Prediction Models, ASCE Journal of Environmental Engineering, 1063-1083, 1984.

ÖZGEÇMİŞ

- Adı, soyadı : Aziz Barış ESENER
- Ana adı : Nezihe
- Baba adı : İbrahim
- Doğum yeri ve tarihi : Seferihisar, İZMİR/ 20.05.1979
- Lisans : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü,(2002 Temmuz)(Bölüm Birincisi)
- Yabancı dil : İngilizce
- Mesleki etkinlikler : *İşıklı İnşaat San. Tic. Ltd. Şti. (2002 Kasım-2004 Şubat)*
- Belkon Toplu Konut İnşaatı işi
 - Gazi Mustafa Kemal Bulvarı Yol ve Tretuar İnşaatı Tanzim işi
 - Tarihi Kale İçi Çarşısı Çevre Düzenleme işi
 - 1346 Sokak Yol ve Tretuar İnşaatı Tanzim işi
 - Melek Pazarı Yol ve Tretuar Tanzim işi
- Ulus İnşaat (2004 Ekim-2004 Kasım)*
- Nobel Tekstil Fabrika İnşaatı işi
- PAP Müh. Danışmanlık Ltd. Şti. (2005 Ocak-2005 Şubat)*
- Marmaris Barajı Kil Dolgu işi
- Acarlar İnşaat, Madencilik San. Ltd. Şti (2005 Haziran-...)*
- Tuprag Kışladağ Altın Madeni Cevher Stok Sahası Kil Dolgu işi