

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİNDE KULLANILMAK ÜZERE
KUM-BENTONİT KARIŞIMLARININ KİREÇ VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU
KATKISI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe Neva İNCESU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİNDE KULLANILMAK ÜZERE
KUM-BENTONİT KARIŞIMLARININ KİREÇ VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU
KATKISI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ayşe Neva İNCESU
501081301**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Y. Doç. Dr. Berrak TEYMUR

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501081301 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ayşe Neva İNCESU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİNDE KULLANILMAK ÜZERE KUM-BENTONİT KARIŞIMLARININ KİREÇ VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKISI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Y. Doç. Dr. Berrak TEYMUR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Y. Doç. Dr. Berrak TEYMUR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Recep İYİSAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Y. Doç. Dr. Kubilay KELEŞOĞLU
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **Haziran 2012**

Anneme,

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği yüksek lisans tezi kapsamında düzenli depolama tesislerinde kullanılmak üzere kum-bentonit karışımlarının kireç ve yüksek fırın cürufu ile iyileştirilmesi konusunda İTÜ İnşaat Fakültesi Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Farklı oranda içerikler ile hazırlanan 10 farklı karışım kompaksiyon, konsolidasyon ve serbest basınç deneylerine tabi tutularak hazırlanan çalışmada geçirimsizlik ve hacimsel davranışı incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışmalar süresince yardım ve desteğini esirgemeyen tüm değerli hocalarıma, arkadaşlarıma ve katkısı bulunan diğer herkese gönülden teşekkür ederim.

Danışmanlığımı üstlenerek çalışmalarım süresince ilgili ve anlayışlı tavırları ile her zaman yardımcı olan ve her konuda desteğini gördüğüm değerli hocam Y. Doç. Dr. Berrak TEYMUR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince değerli vaktini, yardımını ve anlayışını esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Derin URAL'a gönülden teşekkür ederim.

Malzeme temininde ve hazırlık aşamasında emeği geçen Yüksel ILGAR' a ve laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen İTÜ İnşaat Fakültesi Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarı değerli çalışanlarına teşekkür eder, vesile ile yakın zamanda aramızdan ayrılmış olan Semih VİÇ' i saygı ve sevgi ile anmak isterim.

Çalışmakta olduğum Harmoni Gayrimenkul Değerleme ve Danışmanlık A.Ş. yönetimine, başta Aysel AKTAN olmak üzere eğitimim konusunda gösterdikleri anlayış dolayısı ile teşekkürü borç bilirim.

Her zaman yanımda olan Doğan PESEN'e en güzel dileklerimle teşekkür ederim.

Maddi manevi desteklerini esirgemeyerek bu günlere ulaşmamı sağlayan, her konuda sonsuz anlayış, sabır, sevgi ve saygı gördüğüm canım aileme; annem, babam ve kardeşim Hazar İncesu' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2012

Ayşe Neva İncesu
Jeoloji Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. KATI ATIKLAR VE ATIK YÖNETİMİ	21
3.1 Atık Türleri.....	21
3.1.1 Evsel atıklar.....	22
3.1.2 Özel atıklar	22
3.1.2.1 Tıbbi atıklar.....	22
3.1.2.2 Tehlikeli atıklar	22
3.1.2.3 Radyoaktif atıklar.....	23
3.2 Atık Yönetimi.....	23
3.2.1 Kaynakta azalma	24
3.2.2 Geri kazanma	24
3.2.3 Yakma	25
3.2.4 Kompostlama	25
3.2.5 Düzenli depolama	25
4. DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİ	27
4.1 Standartlar	29
4.2 Yer Seçimi.....	30
4.3 Tasarım Parametreleri	31
4.3.1 Taban teşkili.....	34
4.3.2 Drenaj tabakası oluşturulması.....	41
4.3.3 Atıkların serilmesi.....	43
4.3.4 Örtü teşkili.....	43
5. KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ	45
5.1 Kullanılan Malzemeler	45
5.1.1 Bentonit.....	45
5.1.2 Kum.....	47
5.1.3 Kireç.....	48
5.1.4 Yüksek fırın cürufu (YFC).....	48
5.2 Karışımlar ve Oranları.....	49
5.3 Yapılan Çalışmalar	51
5.4 Karışımların Özelliklerinin Belirlenmesi	54
5.4.1 Kompaksiyon	54
5.4.2 Konsolidasyon.....	55
5.4.3 Serbest basınç.....	57

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	59
6.1 Kum-bentonit karışımlarına ait deney sonuçları	61
6.2 Kireç katkılı kum-bentonit karışımlarına ait deney sonuçları	65
6.3 Kireç+YFC katkılı kum-bentonit karışımlarına ait deney sonuçları	66
6.4 Sonuçların Değerlendirilmesi	68
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....	85
EKLER.....	89
ÖZGEÇMİŞ.....	109

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Sızıntı karakteristikleri ve sonuçlar	6
Çizelge 2.2 : Kireç ilavesi yapılan zemin özellikleri	12
Çizelge 2.3 : İyi kave kötü kalite bentonit numunelerinin geoteknik özellikleri.....	15
Çizelge 5.1 : Bentonitin özellikleri	46
Çizelge 5.2 : Karışımlar ve oranları	50
Çizelge 5.3 : Kompaksiyon tür ve enerjileri	55
Çizelge 6.1 : Konsolidasyon sonuçları	62
Çizelge 6.2 : Karışımlara ait deneysel sonuçlar	69

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Gerilme ve geçirimsizlik katsayısının boşluk oranı ile değişimi.....	5
Şekil 2.2 : 20°C’de sıkıştırılan bentonitin kuru birim hacim ağırlık-geçirimsizlik değerleri.....	7
Şekil 2.3 : Farklı sıcaklık değerlerinde sıkıştırılan 1,4 g/cm ³ kuru birim hacim ağırlığına sahip bentonitin geçirimsizlik özellikleri.....	7
Şekil 2.4 : Bentonit/Zeolit oranlarına göre hidrolik iletkenlik değerinin değişimi.....	8
Şekil 2.5 : Permeabilitenin boşluk oranı ile değişimi	8
Şekil 2.6 : Donma/çözünme çevrimlerine maruz bırakılan uçucu kül/bentonit karışımlarının permeabilite değerleri	9
Şekil 2.7 : Uçucu kül katkılı karışımların serbest basınç değerlerinin değişimi	10
Şekil 2.8 : Farklı oranda lastik parçaları eklenen kilin serbest basınç deney sonuçları	11
Şekil 2.9 : Katkısız ve kireç katkılı numunelerin farklı sıkıştırma enerjileri altında elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri.	11
Şekil 2.10 : Arazide elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri ile Türkiye ve Amerika standartlarına belirlenen değerlerin karşılaştırılması.....	12
Şekil 2.11 : Zemin-1 geçirimsizlik değerlerinin kireç yüzdesi ile değişimi	13
Şekil 2.12 : Zemin-2 geçirimsizlik değerlerinin kireç yüzdesi ile değişimi	13
Şekil 2.13 : Kötü kalite bentonit-kum karışımlarında farklı sodyum nitrat ve kalsiyum nitrat konsantrasyonlarına karşılık hacimsel sıkışma değerleri	16
Şekil 2.14 : İyi kalite bentonit-kum karışımlarında farklı sodyum nitrat ve kalsiyum nitrat konsantrasyonlarına karşılık hacimsel sıkışma değerleri	16
Şekil 2.15 : Bentonit içeriği ile hidrolik iletkenlik arasındaki ilişki.....	17
Şekil 2.16 : Su ve zink klorit çözeltileri kullanılarak belirlenen geçirimsizlik değerlerinin kireç yüzdesi ile değişimi.....	18
Şekil 2.17 : Şematik olarak montmorillonit killeri çevreleyen suyun zink katyonlarına bağlı yer değişimi	19
Şekil 4.1 : Vahşi çöp depolama örneği	27
Şekil 4.2 : Düzenli depolama tesisinin hazırlanması.	28
Şekil 4.3 : Düzenli depolama tesisi taban kesiti.	34
Şekil 4.4 : Plastisite indisi ile hidrolik iletkenliğin değişimi	37
Şekil 4.5 : İnce dane içeriği ile hidrolik iletkenliğin değişimi.....	37
Şekil 4.6 : Kil yüzdesi ile hidrolik iletkenliğin değişimi	38
Şekil 4.7 : Su içeriğine bağlı olarak hidrolik iletkenliğin değişimi	39
Şekil 4.8 : Kil tabakasının serilmesi	39
Şekil 4.9 : Geotekstil serimi.....	41
Şekil 4.10 : Drenaj için çakıl tabaka oluşturulması.	42
Şekil 4.11 : Çöp dökümüne hazır duruma getirilmiş saha.....	42
Şekil 4.12 : Düzenli depolama örtü kesiti.....	44
Şekil 4.13 : Düzenli depolama yapılmış alanlar	44

Şekil 5.1 : Kullanılan bentonit numuneleri	46
Şekil 5.2 : Casagrande yöntemi ile likit limit tayini	47
Şekil 5.3 : Kum numunesine ait dane çapı dağılımı	47
Şekil 5.4 : Yüksek fırın cürufuna ait dane çapı dağılımı	59
Şekil 5.5 : Piknometre ve vakum düzeneği.....	55
Şekil 5.6 : Konsolidasyon deneyi sonrası etüvde kurutulmuş numune	56
Şekil 5.7 : Kırılma gerçekleşmiş serbest basınç numunesi	58
Şekil 5.8 : Serbest basınç deneyi sonucu elde edilen kırılma zarfı ve dairesi	58
Şekil 6.1 : Tüm numuneler için elde edilen kompaksiyon eğrileri	60
Şekil 6.2 : Tüm numuneler için elde edilen konsolidasyon eğrileri	60
Şekil 6.3 : Tüm numuneler için elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri	61
Şekil 6.4 : Kum-bentonit karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri	63
Şekil 6.5 : Kum-bentonit karışımlarına ait konsolidasyon eğrileri	64
Şekil 6.6 : Kum-bentonit karışımlarına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri	64
Şekil 6.7 : Kireç katkılı kum-bentonit karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri	65
Şekil 6.8 : Kireç katkılı kum-bentonit karışımlarına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri	66
Şekil 6.9 : Kireç+YFC katkılı kum-bentonit karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri	67
Şekil 6.10 : Kireç+YFC katkılı kum-bentonit karışımlarına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	68
Şekil 6.11 : Maksimum kuru birim hacim ağırlık üzerinde bentonit etkisi	69
Şekil 6.12 : Optimum su muhtevası üzerinde bentonit etkisi	69
Şekil 6.13 : Birim boy değişimi üzerinde bentonit etkisi	70
Şekil 6.14 : Hacimsel sıkışma üzerinde bentonit etkisi	70
Şekil 6.15 : Geçirimsizlik üzerinde bentonit etkisi	71
Şekil 6.16 : Birim deformasyon üzerinde bentonit etkisi	72
Şekil 6.17 : Serbest basınç dayanımı üzerinde bentonit etkisi.....	72
Şekil 6.18 : Elastisite modülü üzerinde bentonit etkisi.....	72
Şekil 6.19 : Maksimum kuru birim hacim ağırlık üzerinde kireç etkisi	73
Şekil 6.20 : Optimum su muhtevası üzerinde kireç etkisi	73
Şekil 6.21 : Birim boy değişimi üzerinde kireç etkisi.....	74
Şekil 6.22 : Hacimsel sıkışma katsayısının değişimi ile kireç ilişkisi	74
Şekil 6.23 : Geçirimsizlik üzerinde kireç etkisi	74
Şekil 6.24 : Birim deformasyonun kireç miktarı ile değişimi.....	76
Şekil 6.25 : Serbest basınç özellikleri üzerinde kireç etkisi	76
Şekil 6.26 : Elastisite modülünün kireç miktarı ile değişimi	76
Şekil 6.27 : Optimum su muhtevası değişiminde YFC etkisi.....	77
Şekil 6.28 : Maksimum kuru birim hacim ağırlık değişiminde YFC etkisi.....	77
Şekil 6.29 : Birim deformasyonun YFC miktarı ile değişimi.....	78
Şekil 6.30 : Hacimsel sıkışma katsayısının YFC ile değişimi	78
Şekil 6.31 : Geçirimsizlik üzerinde YFC etkisi	79
Şekil 6.32 : Birim deformasyon üzerinde YFC etkisi.....	79
Şekil 6.33 : Serbest basınç dayanımı üzerinde YFC etkisi	80
Şekil 6.34 : Elastisite modülü üzerinde YFC etkisi	80

DÜZENLİ DEPOLAMA SAHALARINDA KULLANILMAK ÜZERE KUM VE BENTONİT KARIŞIMLARININ KİREÇ VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKISI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Atık yönetimi, günümüzde kontrolsüz nüfus artışı, endüstriyel gelişmeler ve buna bağlı olarak artan atık miktarı nedeni ile oldukça önem kazanmış durumdadır. Atıkların düzenli depolanması, gelişmiş ülkelerde uygulama kolaylığı ve kalıcı çözüm sağlaması açısından yaygın olarak tercih edilmekte olan bir bertaraf yöntemidir. Ancak düzenli depolama tesisi tasarımında belirli kriterler dikkate alınmadığı takdirde atıkların doğaya ve insan sağlığına zarar vermesi kaçınılmazdır. Sahanın hazırlanması, geçirimsiz tabaka oluşturulması, atıkların serilmesi ve sahanın örtülmesi gibi temel aşamalardan oluşan düzenli depolama tesisi tasarımında tabanda geçirimsizlik oluşturulması, sızıntı sularının yeraltı suyuna karışmasını önlemek amacı ile özellikle önem arz etmektedir. Yapılan çalışmada, endüstriyel atık olarak ortaya çıkan malzemelerin düzenli depolama tesislerinin inşasında kullanımının uygunluğu araştırılmış, bu sayede depo tabanını meydana getiren malzeme özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra mevcut endüstriyel atık miktarının azaltılması planlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda belirli oranlarda hazırlanan kum ve bentonit karışımlarına kireç ve yüksek fırın cürufu (YFC) ilave edilerek karışımlar hazırlanmış ve kompaksiyon, konsolidasyon ile serbest basınç deneylerine tabi tutularak malzemelerin oturma, geçirimsizlik ve mukavemet özellikleri incelenmiştir. Çalışmada % 116 likit limit değerine sahip CH sınıfı bentonit kullanılmıştır. Kum ve YFC malzemeleri, karışımlarda üniformalık sağlamak amacı ile 40 numaralı elekten elenerek yalnızca elek altında kalan malzeme kullanılmıştır. YFC, Ereğli Demir Çelik Fabrikası'ndan temin edilmiş, kireç olarak ticari paket kireç kullanılmıştır. Çalışmalar öncelikle en uygun bentonit miktarını belirlemek üzere % 40, % 50 ve % 60 bentonit içerikli kum ve bentonit karışımları üzerinde yapılmış ve uygun oran % 50 bentonit - % 50 kum olarak belirlenmiştir. Karışım içerisindeki bentonit miktarındaki artışın geçirimsizlikte azalmaya neden olduğu anlaşılmıştır. Mukavemet ve birim deformasyon özellikleri üzerinde bentonitin önemli ölçüde etkisi görülmemiştir. Kireç içeriği ise % 2 ile % 6 aralığında çalışılmış, % 50 bentonit oranı sabit tutularak % 2, % 4 ve % 6 oranında kireç içeren karışımlar hazırlanmıştır. Çalışmalar sonucunda kireç katkısının geçirimsizliği azaltarak basınç dayanımını kum ve bentonit karışımlarına oranla artırdığı görülmüştür. Genel anlamda malzeme özelliklerini düzenli depolama tesislerinde kullanımının uygunluğu açısından olumlu yönde etkilediği kanaatine varılmıştır. Kireç etkisinin araştırılması sonucu yüksek fırın cürufu katkısının % 6 kireç içerikli malzemeye yapılmasına karar verilmiştir. % 50 Bentonit ve % 6 kireç oranı sabit tutularak, % 1, % 2 ve % 3 oranında cüruf katkısının, karışımların mukavemet ve geçirimsizlik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. YFC katkısı % 1 oranında katıldığında geçirimsizliği önemli ölçüde azaltmış ancak artan katkı miktarı ile geçirimsizlikte artış gözlenmiştir. Basınç

dayanımını ise önemli ölçüde artırdığı belirgin şekilde anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda kireç ve yüksek fırın cürufu katkısının kum-bentonit karışımlarının özelliklerini düzenli depolama tesislerinde uygulanabilirliği açısından olumlu yönde etkilediği anlaşılmıştır.

INVESTIGATION OF LIME AND BLAST FURNACE SLAG TREATED SAND-BENTONITE MIXTURES TO BE USED IN WASTE DISPOSAL FACILITIES

SUMMARY

Ascending life standards worldwide bring out the consequences to deal with, as the effect of human on nature grows with all technological and industrial improvements. As amount of products used increase and the term of usage decrease, consumption rate cannot get as fast as production, resulting in excess amount of waste products and consequently waste management becomes one of the most serious issues. Disposing of waste in a landfill is the most applicable and preferred method in developed countries since the method does not bring out new waste products and is a permanent solution. However when application is not right, there is a big chance of serious danger for the environment to occur, thus it is important to design the landfill area in the manner that soil, air and underground water is not affected from contamination. It is essential to control the interaction between environment and waste material; especially to prevent underground water from contamination should be considered before designing the landfill. Therefore, an impermeable layer at the base of disposal area is constructed with various materials. Properties of the material to be used as barrier in waste disposal areas are determined by regulations. Generally proposed hydraulic conductivity value is not bigger than 1×10^{-8} m/s, which may differ for various types of waste products and territories. Clay is frequently preferred due to low permeability characteristics and is generally applied with other natural or produced materials. Usage of bentonite and sand mixtures has become widely preferred within last years, with alternatives of geosynthetic clay liners or geomembranes. In this study, the material to be treated is chosen to be natural or naturally produced without bringing out any new waste products. The aim of this study is to investigate the improvement of bentonite-sand mixtures through laboratory tests to be used as barrier material in waste disposal areas considering the usage of industrial waste materials in order to reduce the amount of waste products and increase the barrier material properties.

In this study, lime only (BESL) and lime with blast furnace slag (BFS) treatments are applied on sand-bentonite (BES) mixtures in order to determine settlement, strength and permeability characteristics. Bentonite clay classified as CH according to ASTM with a liquid limit of 116 and unit weight of 25.7 kN/m^3 is used in the mixtures with sand, lime and blast furnace slag (BFS). Sand and BFS used is sieved from standard #40 sieve to eliminate finer grains and to acquire more uniform mixtures. Specific gravities of sand including mixtures showed that sand addition increased the unit weight of the mixtures. Swelling of the bentonite is investigated before experimenting the properties of the mixtures and results showed that swelling amount is insignificantly low.

Standard proctor tests are done in order to obtain maximum dry unit weights and optimum water contents and to prepare consolidation test samples. Apart from 100 % bentonite, no distinct changes occur in maximum dry unit weights and optimum water contents with any bentonite, lime nor BFS treatment.

Consolidation tests are done in order to investigate settlement and permeability of prepared samples to analyse applicability as barrier materials. Mixtures are prepared progressively to determine suitable percentages of bentonite and lime. First series of the mixtures consist of 100 % bentonite (B), 60 % bentonite – 40 % sand (BES40) , 50 % bentonite – 50 % sand (BES50), 40 % bentonite – 60 % sand (BES60) in order to determine proper bentonite amount in barrier material. After standard proctor test results, specimens for odometer tests are prepared compacted with water content of about 2 % above the optimum. Standard proctor test results showed that bentonite-sand ratio is not significantly effective on compressibility of the mixtures between 40 to 60 percent.

Using odometer test results, settlement and hydraulic conductivities of the mixtures are calculated. Results of each BES mixture can be defined similar since there is no significant change in hydraulic conductivities with changing bentonite amount between the ranges of 40 to 60 percent, also it can be stated that increasing bentonite amount decreases hydraulic conductivity depending on test results. BES50 with 50 % bentonite content and 100 % bentonite gave nearly equal results, and it can be stated that bentonite amount above 50 % causes the material to behave like bentonite. Hydraulic conductivity value of B (100 % bentonite) is calculated 6.41×10^{-9} m/s on average for each loading stage. BES50 has nearly the same hydraulic conductivity as B which is 6.98×10^{-9} m/s. Depending on test results, BES50 is chosen to be treated with lime based on low hydraulic conductivity properties, low settlement capacity and relatively consistent behavior without unexpected rises nor falls.

Unconfined compression tests are done in order to determine strain and strength of the mixtures. BES40 with 60 % bentonite content showed maximum strength. There was no direct correlation determined between increasing bentonite content and strength.

Mixtures with constant 50 % bentonite by weight and 2 % lime (BESL2), 4 % lime (BESL4) and 6 % lime (BESL6) by weight and sand are prepared. Results are compared with BES50 in order to investigate the lime effect. Effect of lime treatment is obvious from standard proctor tests in both optimum water content and maximum dry unit weight values when compared with BES50. Adding 2 % lime in bentonite-sand mixtures increase maximum dry unit weight and increase optimum water content but increasing lime amount to above 4 % resulted in decreasing maximum dry unit weight and increasing optimum water content.

Hydraulic conductivities are calculated using the same method as BES mixtures and compared with BES50 and each other. For BESL2 with 2 % lime by weight, hydraulic conductivity value is calculated as 3.01×10^{-9} m/s, which is lower than BES50 with 6.98×10^{-9} m/s value. BESL4 consolidation test results are not very different from BESL2 with hydraulic conductivity of 2.28×10^{-9} m/s. Settlements of the 20mm thick samples are 1.10mm, 0.73mm for BESL2 and BESL4 respectively. Compared with BES50, the effect of lime treatment decreases settlement that the samples undergoes and the hydraulic conductivity decreases. Depending on unconfined compression test results, it can be stated that lime addition increases strength of bentonite-sand mixtures and decreases settlement.

Keeping 50 % bentonite and 6 % lime content constant, mixtures containing 1 % (BFS1), 2 % (BFS2) and 3 % (BFS3) blast furnace slag by weight are prepared. Results are compared with BES50 and BESL6 to compare results with lime additive only and lime+BFS additive effects. Proctor test results showed 1 % BFS addition to BESL6 decreases optimum water content and increases maximum dry unit weight, while adding more BFS does not effect optimum water content or maximum dry unit weight values much. BEFS2 has nearly the same values with BESL6, while BEFS3 had optimum water content-maximum dry density values between the values of BEFS1 and BEFS2. The situation may have been caused due to the properties of BFS which have materials with various particle sizes.

According to consolidation test results, permeability seriously decreases with 1 % lime additive but when 2 % and 3 % BFS is added permeability increases respectively. Still not more than $4,82 \times 10^{-9}$ m/s is gathered, which is inside the limits for usage in waste disposal facilities. The decrease may depend on uniformity and homogeneity of the mixtures and also on compaction properties which are related to the force applied.

Unconfined compression tests are done on samples compacted with constant 32 % water content since water content plays a significant role in compression test results. Results showed that BFS significantly increases the strength of the material, and similar results are gathered for all BEFS1, BEFS2 and BEFS3. Unit strain of the samples are very low compared with BESL and BES mixtures.

Lime stabilised bentonite-sand mixtures resulted in lower hydraulic conductivity values and lower volumetric change with respect to bentonite-sand mixtures. Compared with previous studies, calculated hydraulic conductivity values for sand-bentonite mixtures are not as low. This situation is related with the type and index properties of the bentonite used. Effect of lime in decreasing hydraulic conductivity is obvious when compacted 2 % above optimum water content, giving the lowest value at 4 % lime content. Unlike previous studies mostly stating lime treatment increase hydraulic conductivity at lower percentages, but decrease it when added above a certain amount, 2 % lime content lowered hydraulic conductivity value from 6.98×10^{-9} m/s to 3.01×10^{-9} m/s, when adding more lime similarly caused hydraulic conductivity to continue to decrease. Settlement properties also gave better results when lime treated, decreasing amount of volumetric change. Generally, lime treated sand-bentonite mixtures gave hydraulic conductivity results within determined limits and is considered appropriate to be used as barrier materials in waste disposal areas.

Industrial waste lime generally improves engineering properties of soils and is applicable for roads and earth fills thus usage of lime in waste disposal areas as barrier material would not just improve properties of barrier material but also reduce the amount of waste products, reducing waste product amount when lime is considered as industrial waste product.

BFS treated mixtures gave even better results compared with lime treated mixtures to be used in waste disposal areas. Permeability values of each sample prepared was below the limit determined as 1×10^{-8} m/s, and the effect on increasing compression strength is obvious. Generally, it can be stated that lime and BFS treatment improves the properties of sand-bentonite mixtures to be used as impermeable layer in waste disposal areas.

1. GİRİŞ

Gün geçtikçe ilerleyen teknoloji, şehirleşme ve buna bağlı nüfus artışı ile birlikte atık malzemelerin getirdiği kirlilik problemi gelişmektedir. Evsel ve sanayi atık miktarlarındaki artışlar karşısında çeşitli atık bertaraf yöntemleri uygulanması gereksinimi ve buna bağlı olarak atık yönetiminde çeşitli kriterler belirlenmesi ihtiyacı doğmuştur. Atıkların yeniden kullanım alanı kazanması amacı ile çeşitli yöntemler uygulanmakta olsa da bu yöntemler mevcut atık miktarını tamamen ortadan kaldıramamakta ayrıca bir kısım atığı yeniden kullanılabilir hale getirirken yeni atık üretimi gerçekleştirmektedir. Bu nedenle ortadan kaldırılamayacak atıklar için depolama zorunlu bir hal almaktadır. Kontrol altına alınmakta zorlanılan atıklar günümüzde ve ülkemizde ne yazık ki ağırlıklı olarak vahşi depolama olarak anılan yöntem ile bir bölgeye kontrolsüzce serilmekte ve sonuçları göz ardı edilmektedir. Bu durumun önlenmesi, gelişmiş coğrafyalarda düzenli depolama sahalarının kullanılması ile mümkündür. Bu yöntem ile atıklar, belirli parametreler göz önünde bulundurularak seçilmiş bir bölgeye, çeşitli altyapı çalışmaları tamamlandıktan sonra kontrollü olarak serilmekte ve atıkların çevre ile etkileşimi minimuma indirgenmektedir. Uygulanabilirliği açısından gelişen coğrafyalarda ağırlıklı olarak tercih edilen düzenli depolama yöntemi ile atıkların kontrolü sağlanmakla birlikte sızıntı suların arıtılmasına da imkan sağlanmaktadır.

Düzenli depolama sahalarının uygulanmasında başarı sağlanabilmesi için bölge seçiminde ve tasarım parametrelerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Atıklar, yaratacakları çevresel etkileşimin büyüklüğüne göre derecelendirilmeli ve depolama esnasında bu sınıflandırma göz önünde bulundurulmalıdır. Depo sahasının seçiminde büyüklük, iklim, sahanın jeolojik özellikleri ve yapısı, yer altı suyu durumu ve sosyal koşullar değerlendirilmelidir. Tehlike teşkil edebilecek en önemli unsurlardan biri atıklardan sızan kirli suların depo tabanına ulaşarak yer aldığı zemini ve yer altı suyunu etkilemesidir. Bu durumda öncelikli olarak atık depolama sahasında geçirimsizliğin sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla serilecek atık yığının altına geçirimsiz şilte olarak anılan tabaka serilmelidir. Böylece atık malzemelerden sızan

öp suları zemin içerisinde ve yer altı suyunu kirletmeyecektir. Taban şiltelerinde doğal olarak oluşmuş geçirimsiz özellik taşıyan malzemeler kullanılabilmeyle birlikte, genellikle geçirimsizlik özelliğı taşıyan malzemeler beraberinde şişme özelliğı de göstermekte ve bu durum uzun vadede olumsuz sonuçlara yok açabilmektedir. Doğru taban teşkilinin yanı sıra atık yığınının hava ve canlılar ile temasının kontrollü olarak gerçekleşmesi amacı ile deponun üzerinin de standartlara uygun şekilde örtülmesi gerekmektedir. Örtü teşkili tamamlandıktan sonra bölgenin verimli arazi olarak kullanımı mümkün kılınmaktadır.

Taban ve örtü teşkilinde kullanılacak malzemelerin özellikleri denetleyici kuruluşlar tarafından belirli değerler arasında sınırlandırılmıştır. Genel olarak geçirimsizlik katsayısının tehlikeli atık, endüstriyel atık ve kentsel katı atıkları depolamada kullanılan zemin kaplama ve örtüleri için 1×10^{-8} m/s'den daha büyük olmaması istenmektedir.

Türkiye'de düzenli depolama alanlarının kullanımı son yıllarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Türkiye Katı Atıkları Kontrol Yönetmeliğı'nce (1991), depo tabanında en az 60 cm kalınlığında geçirimsiz tabaka serilmeli ve geçirimsizliğı 1×10^{-8} m/sn' den büyük olmamalıdır.

Depo tabanında istenilen geçirimsizliğı sağlamak amacı ile kil şilte kullanılmaktadır. Önceki çalışmalarda tamamen kil tabakadan oluşan geçirimsiz tabaka, sonraları geliştirilerek geosentetik kil tabaka (GCL) şeklinde, geomembran ile birlikte veya kum, kireç gibi malzemeler ile karıştırılmış halde uygulanmaya başlanmıştır. Kullanımda tercih edilen başlıca malzemelerden biri, yüksek su tutma ve düşük geçirimsizlik özellikleri nedeni ile bentonittir. Ancak yüksek plastisitesi nedeni ile uygulamada zorluk teşkil eden durumların engellenmesi için genellikle gerekli standartları sağlayacak şekilde kum ile birlikte kullanımı günümüzde daha yaygın hale gelmiştir.

Taban şiltelerinde kum ve kil karışımlarının kullanılması üzerine bir çok çalışma mevcut bulunmaktadır. Katkı malzemesi olarak kireç kullanımı ile ilgili Tsai ve Vesilind (1998), kireç katkısı sonrası geçirimsizliğı azaldığını ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmalarda düzenli depolama sahalarında taban şiltesi teşkilinde ağırlıklı olarak tercih edilen malzeme olan bentonit-kum karışımının yüksek fırın cürufu ve kireç katkısı ile iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Katkı olarak yüksek fırın cürufu

seçilmesinde, malzemenin yüksek üretim miktarına sahip endüstriyel atık sınıfında olmasının etkisi büyüktür. Diğer bir katkı malzemesi olan kireç, yine endüstriyel atık olarak ortaya çıkabilen bir malzemedir. Önceki çalışmalarda, Khattab ve diğ. (2006), normal kireç katkısı ve atık kireç katkısı ile zemin iyileştirme deneyleri yaparak, atık kireç katkısının kireç katkısına göre olumsuz herhangi bir sonuç vermediğini göstermiştir. Çalışmada atık stabilizasyonunda geri dönüşüm yapılarak atık miktarı azaltılması, ayrıca bu atıkların bir diğer stabilizasyon yöntemi olan düzenli depolama sahalarında kullanımına olanak sağlanması amaçlanmıştır.

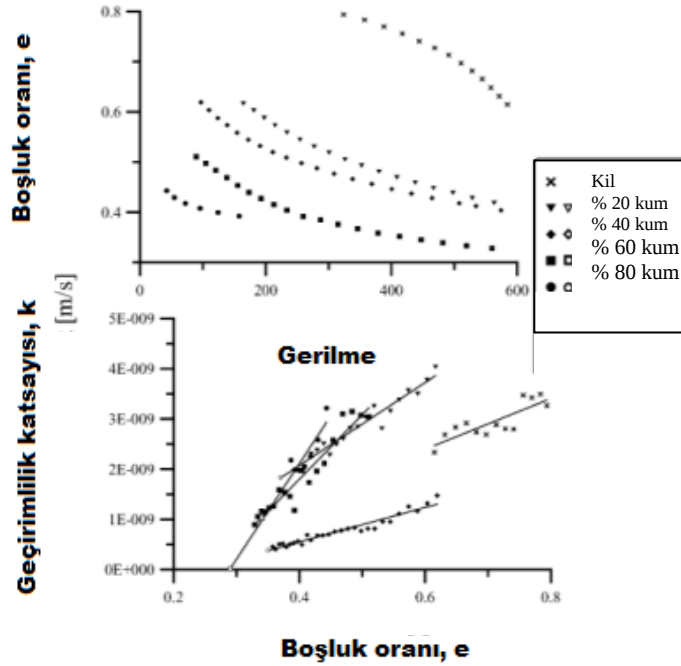
Çalışmada, hazırlanan değişik oranda karışımların sıkışma özellikleri, mukavemeti, oturma özellikleri ve geçirimsizliklerinin belirlenmesi amacı ile numuneler üzerinde standart proktor, özgül ağırlık, serbest basınç ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Önceki çalışmalarda ağırlıklı olarak ağırlıkça % 20 ila % 50 oranında bentonit kullanılmış olması dolayısı ile öncelikle uygun kum-bentonit oranının belirlenmesi amacı ile % 100 bentonit (B), % 60 bentonit % 40 kum (BES40), % 50 bentonit % 50 kum (BES50), % 40 bentonit % 60 kum (BES60) numuneleri üzerinde çalışılmıştır. Kullanılan bentonit önem arz etmeyecek ölçüde şişme göstermiş bu nedenle karışımların şişme özellikleri incelenmemiştir. Sonuçlar doğrultusunda iyileştirilecek malzemede % 50 bentonit oranı uygun görülerek, % 2, % 4 ve % 6 kireç katkısı ile deneyler tekrarlanmış ve uygun kireç oranı % 6 olarak belirlenmiştir. Belirlenen % 50 bentonit ile % 4 kireç oranı sabit tutularak ağırlıkça % 1, % 2 ve % 3 yüksek fırın cürufu ilave edilmiş ve deneyler tekrarlanmıştır. Yapılan çalışmalar detaylı olarak beşinci bölümde yer almaktadır.

Malzeme seçiminde ve karışımların oranlarının belirlenmesinde göz önünde bulundurulmuş önceki çalışmalara, ikinci bölümde yer verilmiştir. Düzenli depolama tesislerinde yer alacak atıklar ile ilgili genel bilgi ve alternatif bertaraf yöntemleri, çalışmanın hangi amaca hizmet ettiğini daha iyi betimlemek amacı ile atık yönetimi başlığı altında çalışmanın üçüncü bölümünde anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçların kullanım amacına uygunluğunun analizini anlaşılır kılmak amacı ile düzenli depolama tesislerinin tasarım ve inşasında dikkat edilmesi gereken unsurlar ve göz önünde bulundurulmuş parametrelere yer verilmiştir. Yapılan laboratuvar çalışmalarının tümü ve elde edilen sonuçlar beşinci bölümde anlatılmış ve detaylı genel değerlendirmeye çalışmanın altıncı bölümünde yer verilmiştir.

2. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çalışmalar ağırlıklı olarak kullanılan kil tabakasının değişen şartlarda davranışının belirlenmesi ve bu doğrultuda iyileştirilmesi konularında yoğunlaşmaktadır. İncelenen çalışmalarda genel olarak şişen zeminlere kireç katkısının zemin özelliklerini olumlu yönde etkilediği anlaşılmıştır.

Luczak-Wilamowska (2002), Polonya neojen killeri ve kum karışımları üzerinde, atık depolama sahalarında kullanılabilirliğini araştırmak üzere deneyler yaparak, yeterli mukavemeti kilin tek başına sağlamadığını ortaya koymuştur. Permeabilite katsayısı ve gerilmenin boşluk oranı ile değişimi, Şekil 2.1’ de görülmektedir.



Şekil 2.1 : Gerilme ve geçirimsizlik katsayısının boşluk oranı ile değişimi
(Luczak-Wilamowska, 2002).

En düşük geçirimsizlik değerleri % 20 ve % 40 kum içerikli karışımlarda elde edilmiş ve bu karışımlara ait geçirimsizlik değerleri $1,83 \times 10^{-10}$ m/s ve $3,8 \times 10^{-10}$ m/s olarak belirlenmiştir.

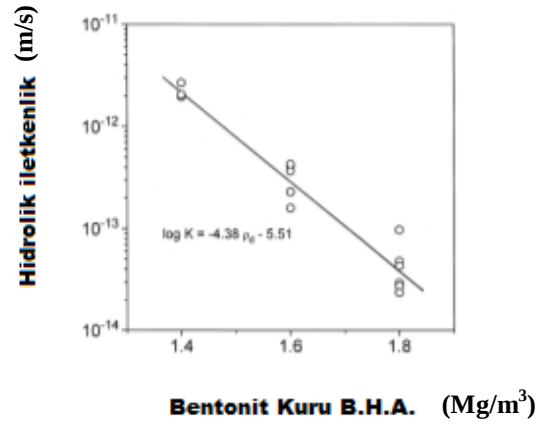
Mitchell ve diğ. (1965), sıkıştırılmış killeri üzerinde geçirimsizlik analizi yaparak optimum su muhtevasından daha yüksek su muhtevalarında sıkıştırılmış killerin, optimumun kuru tarafında yapılan sıkışmalardan daha düşük geçirimsizlik özelliği gösterdiğini belirtmişlerdir. Sonraki çalışmalarda bu durum dikkate alınarak, Dunn ve Mitchell (1984) tarafından sıkıştırılmış killeri üzerinde geçirimsizlik incelemesi optimumun % 2 - % 3 ıslak tarafında sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2.1’ de görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Sızıntı karakteristikleri ve sonuçlar (Dunn ve Mitchell., 1984).

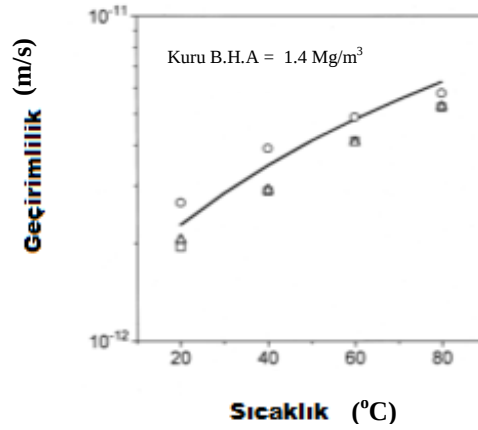
Test	Kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Su muhtevası (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (%)	Kür süresi (gün)	Hidrolik iletkenlik (cm/s)
Altamont					
AW-13	17,03	15.7	90.1	15	1.4x10 ⁻⁷
AW-14	16,88	15.7	89.5	1	2.5x10 ⁻⁸
AD-1	16,96	15.7	89.7	1	1.6x10 ⁻⁸
AT-1	16,96	15.7	89.7	56	5.6x10 ⁻⁶
AT-2	16,96	15.7	89.7	1	3.8x10 ⁻⁷
Rockville	0,00				
RW-1	15,04	23.4	90.7	1	1.1x10 ⁻⁷
RT-1	15,17	23.5	91.4	9	2.4x10 ⁻⁷
RT-2	14,93	23.2	90.1	16	9.6x10 ⁻⁷

Cho ve diğ. (1999), sıkıştırılmış bentonitin geçirimsizlik özelliklerine sıcaklık etkisini araştırmışlardır. 1.4 g/cm³ kuru birim hacim ağırlığına sahip kalsiyum bentonite ait geçirimsizlik değerlerinin 10⁻¹¹ m/s den küçük olduğunu tespit etmiş, ayrıca logaritmik geçirimsizlik değerleri ile kuru birim hacim ağırlığı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.2 ve Şekil 2.3’ de görülmektedir.

Kayabalı (1997), bentonit-zeolit karışımları üzerinde kompaksiyon, permeabilite ve basınç deneyleri yaparak geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bentonit oranının % 5 ten büyük olduğu durumlarda uygun geçirimsizlik değerleri elde edilmiştir. Farklı bentonit/zeolit oranlarına ait geçirimsizlik değerleri, Şekil 2.4’te görülmektedir.



Şekil 2.2 : 20°C’de sıkıştırılan bentonitin kuru birim hacim ağırlık-geçirimlilik değerleri (Cho vd., 1999).

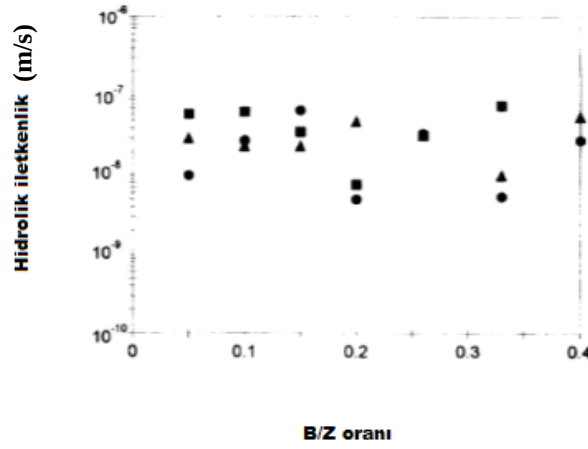


Şekil 2.3 : Farklı sıcaklık değerlerinde sıkıştırılan 1,4 g/cm³ kuru birim hacim ağırlığına sahip bentonitin geçirimsizlik özellikleri (Cho vd., 1999).

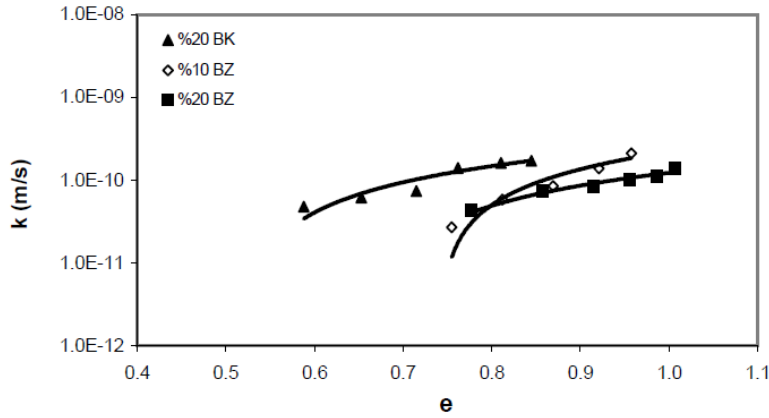
Tuncan ve diğ. (2003), bentonit-zeolit karışımlarının mukavemet, geçirimsizlik ve pH özelliklerini inceleyerek % 10 bentonit içeren karışımların atık depolama tesisinde bariyer olarak kullanımında ideal malzeme olduğunu belirtmişlerdir.

Kaya ve diğ. (2006), bentonit-kum (BK) karışımına alternatif olarak bentonit-zeolit (BZ) karışımlarını önermiş ve karışımlara ait katyon değişim kapasitesi (KDK), büzülme, sıkıştırılabilirlik ve geçirimsizlik özelliklerini incelemişlerdir. Zeolitin yüksek katyon değişim kapasitesine bağlı olarak karışımların depolama tesislerinde çeşitli avantajlar sağlayacağını belirtmişlerdir. Değişen bentonit/zeolit oranı ile elde edilen geçirimsizlik değerleri Şekil 2.4’ te görülmektedir. Ağırlıkça % 20 bentonit içeren kum-bentonit (% 20 BK) karışımının geçirimsizlik değeri 4.81×10^{-11} m/s olarak

belirlenmiştir. Boşluk oranı ile değişen permeabilite değerleri, Şekil 2.5' te verilmiştir.



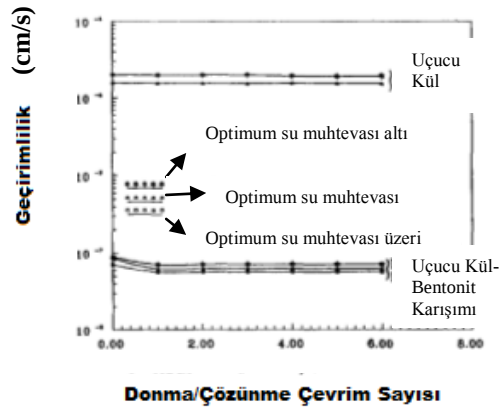
Şekil 2.4 : Bentonit/Zeolit oranlarına göre hidrolik iletkenlik değerinin değişimi (Kayabalı, 1997).



Şekil 2.5 : Permeabilitenin boşluk oranı ile değişimi (Kaya ve diğ, 2006).

% 10 ve % 20 oranında bentonit içeriğine sahip karışımların geçirimsilik değerlerinin belirlenmesinde, bariyer tabakalarında istenen 10^{-8} m/s değerinin altında sonuç alınmıştır. Ayrıca farklı gerilmelere ait geçirimsilik değerlerinin uygulamada önem arz etmeyecek seviyede olduğu belirtilmiştir.

Fleming ve Inyang (1995), kilin uçucu külün geçirimsiliği üzerindeki etkisini araştırmış ve sonuçta kil katkılı uçucu külün geçirimsiliğinin azaldığını ortaya koymuşlardır. Donma-çözünme çevrimlerine maruz bırakılan numunelerin geçirimsilik değerleri Şekil 2.6' da görülmektedir. Geçirimsilikte azalmanın, uçucu kül daneleri arasındaki kil minerallerinin topaklanma göstermeyerek dağılmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.6 : Donma/çözünme çevrimlerine maruz bırakılan uçucu kül/bentonit karışımlarının permeabilite değerleri (Fleming ve Inyang, 1995).

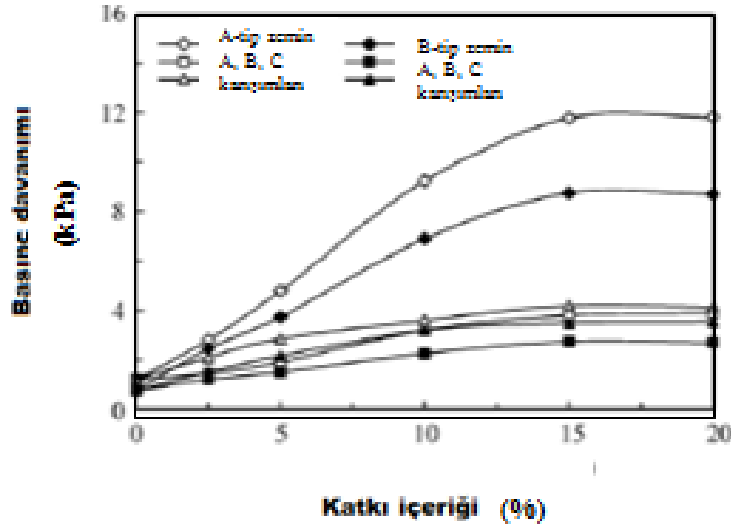
Palmer ve diğ. (2000), atık depolama tesislerinde kullanılmak üzere çeşitli malzemeler üzerinde uçucu kül katkısı ile permeabilitedeki değişimi incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda agregaya ilave edilen uçucu küllerin optimum su muhtevasının üzerinde su muhtevası ile sıkıştırıldığı takdirde 10^{-7} m/s den düşük ve dolayısı ile yeterli permeabilite değerlerini sağladığını ortaya koymuşlar, ancak çatlak sistemlerinin göz önünde bulundurulması gerektiğini önemle belirtmişlerdir.

Prashanth ve diğ. (2001), uçucu küllerin geçirimsiz tabaka olarak kullanımının uygunluğunu araştırmak üzere büzülme, permeabilite, sıkışabilirlik, konsolidasyon ve mukavemet özelliklerini belirleyerek sonuçta düşük rötre gösteren uçucu külün çatlak oluşturmuyarak uygunluğunu teyit etmişlerdir. Ayrıca sıkıştırılmış uçucu küllerde hacimsel değişikliğin oldukça düşük olduğunu ve mukavemet değerlerinin yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır.

Yarbaşı ve diğ. (2006), tampon malzeme olarak uçucu kül katkılı sıkıştırılmış kil numunelerini serbest basınç deneylerine tabi tutarak uçucu kül etkilerini araştırmış ve uçucu kül katkısının mukavemeti artırdığını ortaya koymuşlardır. Uçucu kül katkısının basınç dayanımına etkisi, Şekil 2.7' de görülmektedir.

Al-Rawi ve Awad (1981), kötü derecelenmiş kum ile kumlu silt malzemelerine kireç ilave ederek sıkıştırılmış numuneler üzerinde geçirimsizlik değişimini incelemişlerdir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde geçirimsizliğin kireç katkısı ile arttığı gözlenirken, farklı su muhtevalarında sıkıştırılan numunelerde kireç katkısının geçirimsizliği azalttığı ortaya konmuştur. Kum-kireç katkısı için geçirimsizliği düşüren

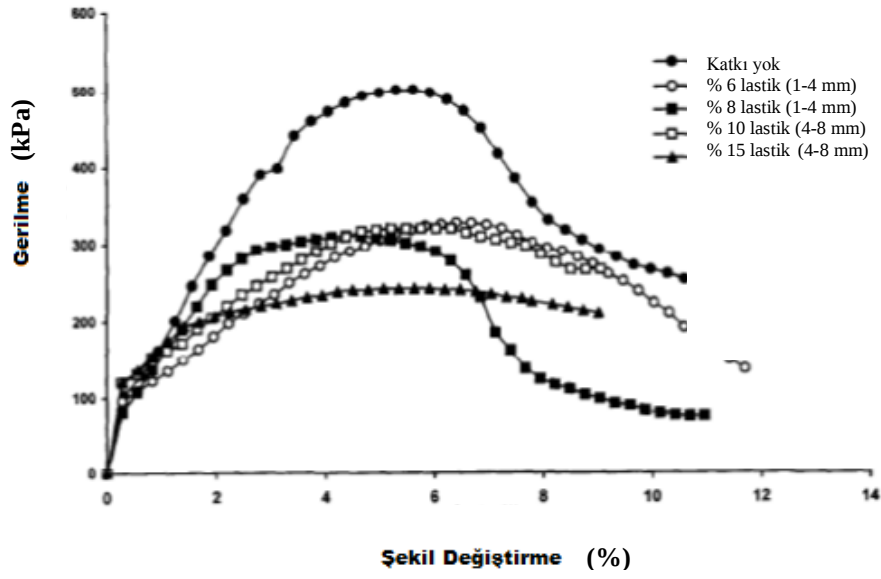
belirli bir su muhtevası tespit edilirken, kumlu silte ilave edilen kireç miktarının artması ile geçirimsizliğin arttığı belirtilmiştir.



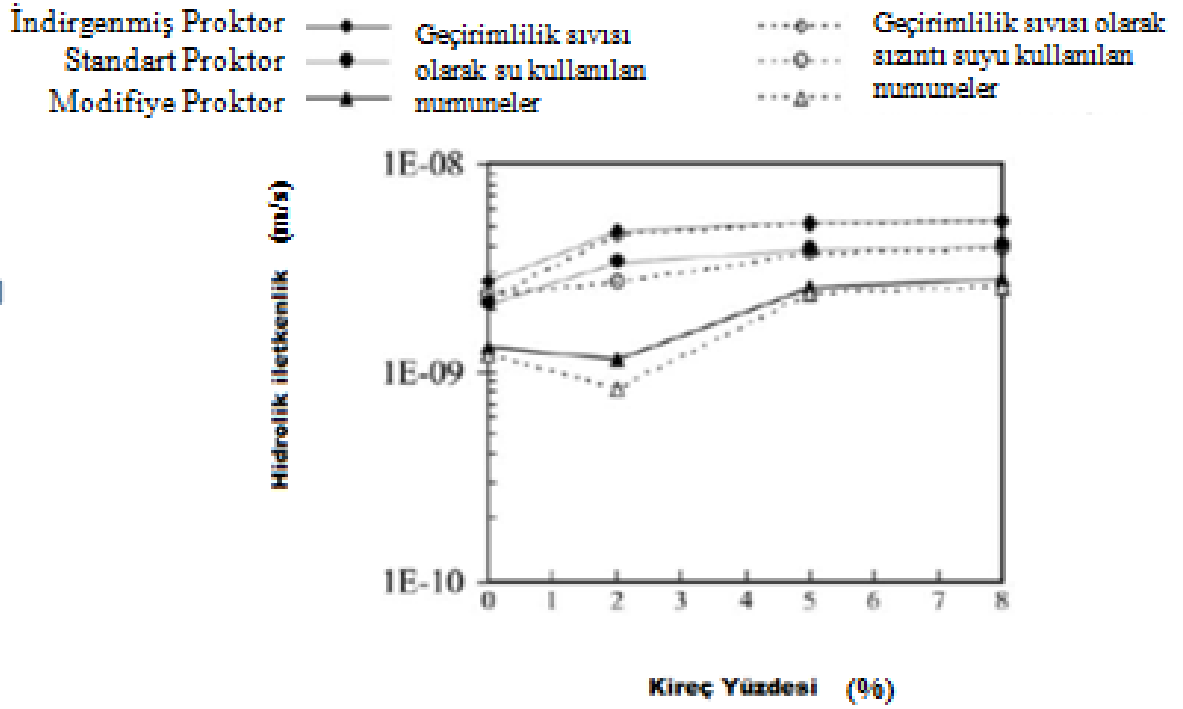
Şekil 2.7 : Uçucu kül katkılı karışımların serbest basınç değerlerinin değişimi (Yarbaşı vd., 2006).

Al-Tabbaa ve Aravinthan (1998), doğal halde aşırı konsolide kil türüne ağırlıkça % 6 - % 15 oranlarında şerit halinde lastik parçaları ekleyerek serbest basınç, sızma ve gerilme-şekil değiştirme testleri uygulamış ve artan lastik oranının mukavemeti düşürdüğünü, birim şekil değiştirmenin ise yalnızca kile göre yaklaşık 2 kat oranında arttığını belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.8' de görülmektedir.

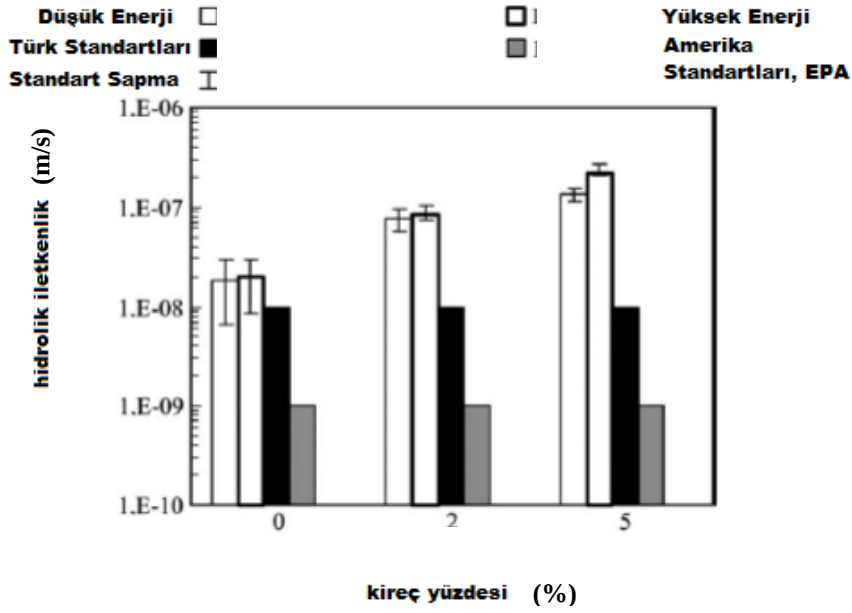
Bozbey ve Güler (2002), yüksek plastisiteli killerin işlenilebilirliğini artırmak amacı ile kireç katkısı ile geçirimsizlik değişimini incelemişlerdir. Kirecin ortaya çıkaracağı topaklaşma etkisinin kompaksiyon ile giderilebileceği öngörülerek farklı sıkıştırma enerjilerinde hazırlanan numuneler üzerinde geçirimsizlik deneyleri uygulanmış, sonuçta sıkıştırma enerjisinin büyük bir etkisi olmadığını ve kireç ilavesi ile geçirimsizlikte artışa neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Geçirimsizliğin kireç yüzdesine bağlı olarak değişimi Şekil 2.9' da görülmektedir. Diğer bir çok çalışmadan farklı olarak arazide yapılan deneyler ile laboratuvar deney sonuçları karşılaştırıldığında, çöp sızıntı suyunun geçirimsizliği artırmadığını belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçlar ile ulusal standartların karşılaştırmalı olarak sonuçları, Şekil 2.10' da verilmiştir.



Şekil 2.8 : Farklı oranda lastik parçaları eklenen kilin serbest basınç deney sonuçları (Al-Tabbaa ve Aravinthan, 1998).



Şekil 2.9 : Katkısız ve kireç katkılı numunelerin farklı sıkıştırma enerjileri altında elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri (Bozbey ve Güler, 2002).



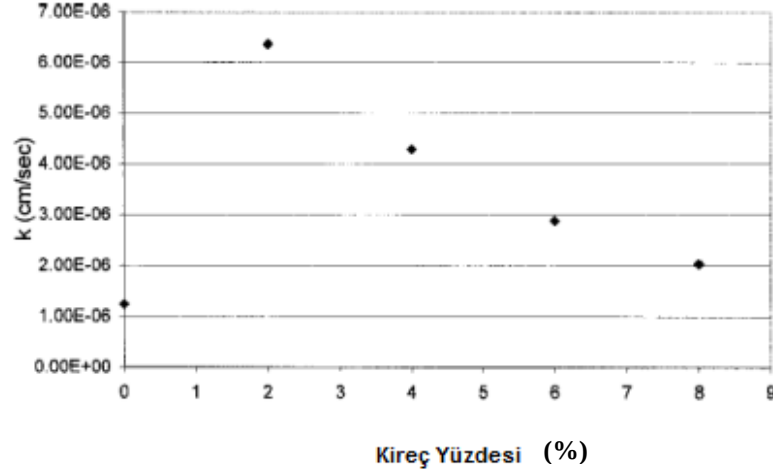
Şekil 2.10 : Arazide elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri ile Türkiye ve Amerika standartlarınca belirlenen değerlerin karşılaştırılması (Bozbey ve Güler, 2002).

Galvao ve diğ. (2006), 2 farklı tip zemine kireç ilave ederek geoteknik özelliklerini incelemiştir. Kireç ilavesi yapılan zemin özellikleri Çizelge 2.2’ te verilmiştir.

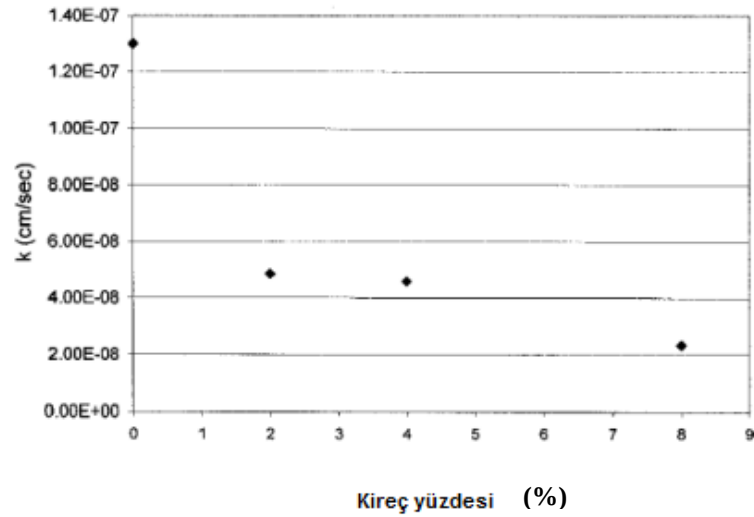
Çizelge 2.2 : Kireç ilavesi yapılan zemin özellikleri (Galvao ve diğ, 2006).

Özellik	Zemin-1	Zemin-2
Likit Limit (%)	35	58
Plastik Limit (%)	21	30
#200 elek altı (%)	94	69
>2mm (%)	20	67
pH	6.9	5.5
Renk	kahverengi	kırmızı
Özgül ağırlık	2.84	2.9
Optimum su muhtevası (%)	26.5	29.8
Maksimum kuru b.h.a (g/cm ³)	1.46	1.44

1. Tip zeminde (Zemin-1) %2 oranında kireç ilave edilen zeminde geçirimsizlik değerinde dört kat oranında artış olduğu sonucunu ortaya koymuşlar, ancak daha fazla kireç ilavesi ile geçirimsizlikte azalma görüldüğünü belirtmişlerdir. 2. Tip zeminde ise (Zemin-2) kireç ilavesi ile geçirimsizlik değeri direkt olarak azalmıştır. Her iki tip zemin üzerinde kireç yüzdesine bağlı olarak geçirimsizlik değişimi, Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’ de verilmiştir. Diğer çalışmalar ile benzer şekilde bu durumun meydana gelen topaklanmaya bağlı olarak ortaya çıktığını ifade etmişlerdir.



Şekil 2.11 : Zemin-1 geçirimsizlik değerlerinin kireç yüzdesi ile değişimi (Galvao ve diğ, 2006).



Şekil 2.12 : Zemin-2 geçirimsizlik değerlerinin kireç yüzdesi ile değişimi (Galvao ve diğ, 2006).

Smith ve Fey (1996), geosentetik kil tabakalarının kullanımı yerine depolama alanında yer alan malzemenin kimyasal olarak iyileştirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Killerin dağılma ve topaklanma özelliklerine bağlı olarak farklı zeminler üzerinde yapılan farklı kimyasal çalışmalar sonucu sodyum karbonatın (Na_2CO_3) güçlü dağıtıcı ve alçı taşının güçlü topaklandırıcı özellik taşıdığını ortaya koymuşlardır. Mevcut standartlara göre avantaj ve dezavantajları netleştirilmemiş olmakla birlikte kimyasal iyileştirme yöntemini özellikle ağırlıklı olarak kullanılan mevcut

yöntemlerin uygulanabilirliğinin kısıtlı olduğu durumlarda ekonomik bir alternatif olarak sunmuşlardır.

Nhan ve diğ. (1996), bentonit, uçucu kül ve kireç tozu karışımları üzerinde atık depolama sahalarında kullanılmak üzere geçirimsizliği belirlemek amacı ile yaptıkları çalışmada geçirimsizlik sıvısı olarak suyun yanı sıra çöp sızıntı suyu kullanmışlardır. Su kullanılarak yapılan deney sonucu geçirimsizlik değeri $4.3 \pm 1.6 \times 10^{-8}$ m/s olarak belirlenmiş ve sızıntı suyunda yer alan iyonların kimyasal bariyer niteliği taşıdıkları belirtilmiştir.

Lakshmikantha ve Sivapullaiah (2006), kaolinitik kil, illit ve uçucu kül malzemelerine ağırlıkça % 20 oranında bentonit ilave ederek atık depolama sahalarında bariyer malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacı ile geçirimsizlik deneylerine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda bentonit ilavesinin beklenen şekilde geçirimsizliği düşürdüğü ancak hacimsel stabiliteyi de azalttığı ortaya konmuştur. Karışımlara % 1 oranında kireç ilave edilerek hacimsel stabilitede meydana gelen azalmanın engellenebileceği öngörülmüştür.

Holopainen (1984), radyoaktif atık depolama alanlarında kullanılmak üzere ezilmiş kaya agregası, ince kaya agregası ve bentonit karışımlarının geçirimsizlik özelliklerini incelemiştir. Bentonit oranı % 15 olan karışımlarda 5×10^{-9} m/s değerinde geçirimsizlik değerleri belirlenmiştir.

Geçirimsizlik değerlerindeki değişimi azaltmak açısından kum-bentonit karışımlarının sıkıştırılabilirliği önem arz etmektedir. Haug ve Wong (1992), kum-bentonit karışımlarının, optimum su muhtevassından yaklaşık % 2 oranında daha fazla su muhtevası ile sıkıştırıldığında geçirimsizliğin azaldığını belirtmiştir.

Chapius (1990), proktor testinde optimum su muhtevassından daha yüksek su içeriğine sahip numunelerin yaklaşık % 90 doygunluğa ulaştığını, bu nedenle sıkıştırılmış zemin içerisinde sıkışan havaya bağlı olarak danelerin daha iyi kenetlendiğini belirtmiştir. Çalışmasında, kum-bentonit karışımlarının geçirimsizliğinin artan bentonit miktarı ile birlikte arttığını ortaya koymuştur. % 15 üzerinde bentonit içerikli karışımlarda geçirimsizlik değerinin neredeyse % 100 bentonit ile eşdeğer olduğunu, ancak % 5 in altında bentonit oranının sızma kuvvetlerine bağlı olarak iç erozyona neden olmasının beklendiğini belirtmiştir.

Kenney ve diğ. (1992), kum-bentonit karışımları üzerinde bentonit oranının ve sıkıştırma su muhtevasının etkilerini incelemişlerdir. % 4, % 8, % 12, % 16 ve % 22 oranında bentonit içeren karışımlar % 7, % 12, % 17 ve % 22 su muhtevalarında sıkıştırılarak, 2.1×10^{-10} m/s ile 6.8×10^{-11} m/s aralığında geçirimsizlik değerleri elde edilmiştir. Bentonitlerin kümelenerek üniform dağılımın engellendiği optimum su muhtevasından düşük su içerikli numunelerde, bu duruma bağlı olarak su içeriğinin geçirimsizliğe büyük etkisi olduğu sonucu ortaya konulmuştur. Su içeriğinin artırıldığı durumlarda karışımlar daha üniform hale gelerek daha düşük geçirimsizlik sonuçları vermişlerdir.

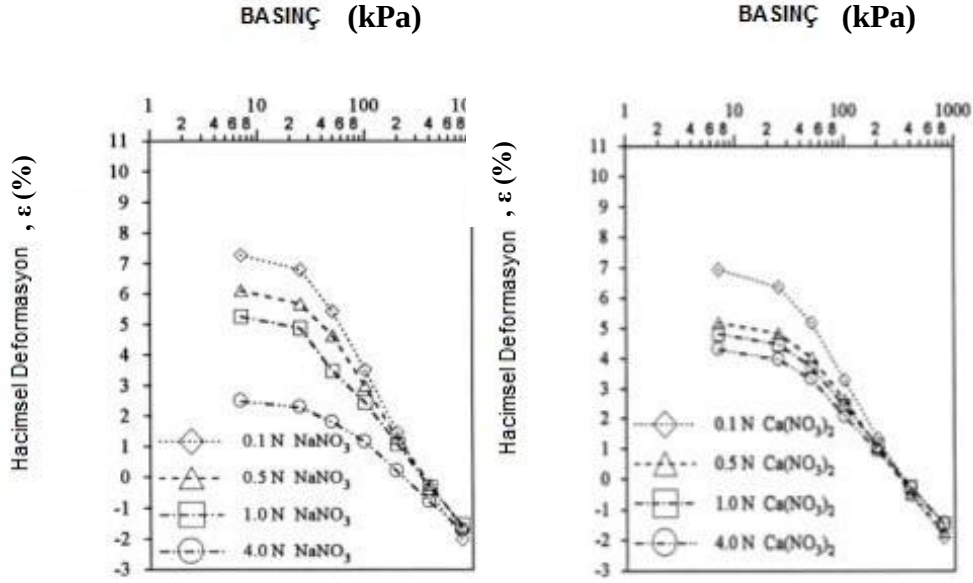
Tashiro ve diğ. (1998), benzer şekilde % 10, % 20 ve % 30 oranında bentonit içeren kum-bentonit karışımlarının farklı su muhtevalarında geçirimsizlik değerlerini inceleyerek, % 10 bentonit oranı için 1.2×10^{-12} m/s ile 3.8×10^{-10} m/s aralığında, % 20 bentonit oranı için 9.2×10^{-13} m/s ile 1.2×10^{-11} m/s aralığında ve % 30 bentonit oranı için 8.2×10^{-13} m/s ile 4.2×10^{-12} m/s aralığında sonuçlar elde etmiştir.

Alawaji (1999), kimyasal sıvıların şişme ve sıkışabilirlik özellikleri üzerinde etkilerini araştırmak üzere kum-bentonit karışımları üzerinde ödometre deneyleri yapmıştır. Geoteknik özellikleri Çizelge 2.3' te verilen iyi kalitede bentonit (HQB) ve kötü kalitede bentonit (LQB), % 20 oranında kum ile karıştırılarak, farklı konsantrasyonlarda kalsiyum nitrat [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$] ve sodyum nitrat (NaNO_3) sıvıları kullanılarak şişme ve sıkışabilirlik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.13 ve Şekil 2.14' te görülmektedir.

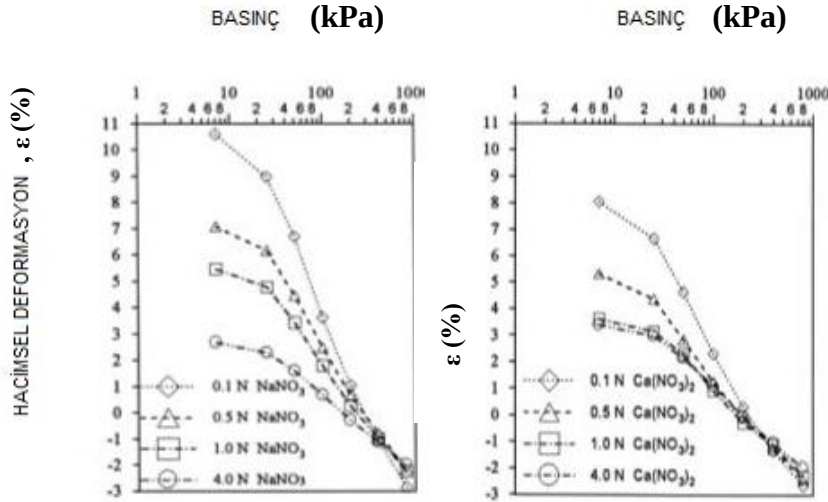
Çizelge 2.3 : İyi kalite ve kötü kalite bentonit numunelerinin geoteknik özellikleri (Alawaji, 1999).

Özellik	HQB	LQB
Likit Limit (%)	505	316
Plastisite İndisi (%)	459	254
Kil (%)	89	78
Silt (%)	11	22
Özgül ağırlık (G_s)	2.68	2.61

Sonuçta şişme ve hacimsel sıkışabilirliğin kimyasal konsantrasyon artışına bağlı olarak azaldığı ortaya konmuştur. Kullanılan kimyasalların farklı uygulamalarda şişmeyi engellemek üzere kullanılabileceği belirtilmiştir.



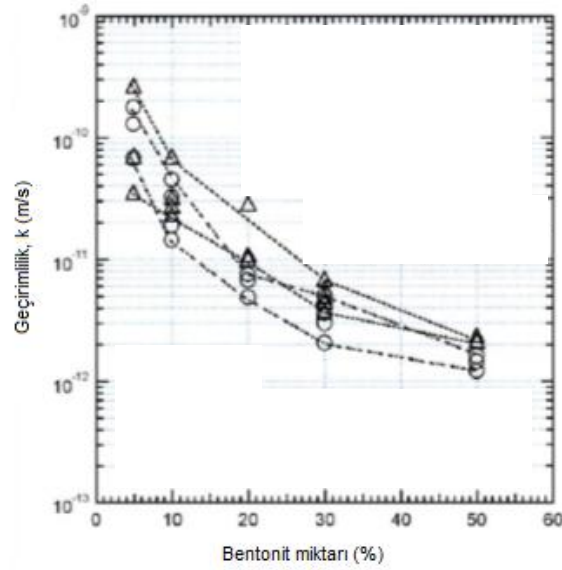
Şekil 2.13 : Kötü kalite bentonit-kum karışımlarında farklı sodyum nitrat ve kalsiyum nitrat konsantrasyonlarına karşılık hacimsel sıkışma değerleri (Alawaji, 1999).



Şekil 2.14 : İyi kalite bentonit-kum karışımlarında farklı sodyum nitrat ve kalsiyum nitrat konsantrasyonlarına karşılık hacimsel sıkışma değerleri (Alawaji, 1999).

Komine (2004), % 5 ila % 50 bentonit oranlarında kum-bentonit karışımlarının geçirimsizlik özelliklerini incelemiş, çalışmalar sonucunda % 5 ila % 20 bentonit içerikli karışımlarda 2.66×10^{-10} ila 4.85×10^{-12} m/s aralığında, % 30 ila % 50 bentonit içerikli karışımlarda 6.87×10^{-12} ila 1.21×10^{-12} aralığında geçirimsizlik değerleri elde edilmiştir. Değişen bentonit oranına bağlı elde edilen geçirimsizlik değerleri Şekil

2.15' te görülmektedir. Diğer çalışmalar ile benzer olarak artan bentonit oranının geçirimsizliği azalttığı ortaya konmuştur.

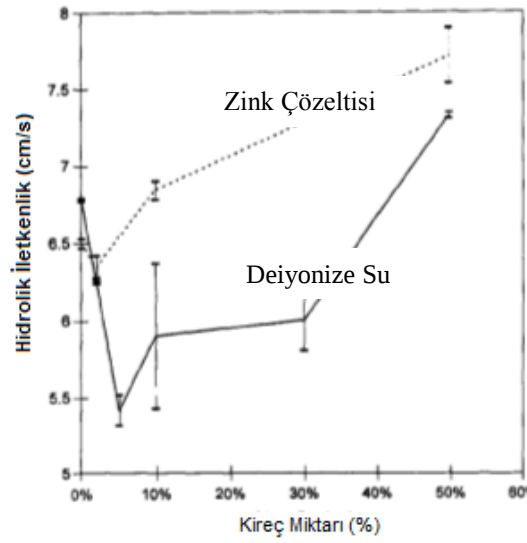


Şekil 2.15 : Bentonit içeriği ile hidrolik iletkenlik arasındaki ilişki (Komine, 2004).

Velosa ve Colmenares (2006), yaptıkları çalışmada sabit düşey yük altında suya maruz bırakılan sıkıştırılmış kum-bentonit karışımlarının hacimsel davranışını incelemişlerdir. Çalışmada başlangıç sıkılık durumunun, uygulanan yükün ve karışımdaki bentonit miktarının etkileri araştırılmış, sonucunda ise şişme potansiyelinin başlangıç sıkılığına ve uygulanan yüke bağlı olarak değişim gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Deneyler sonucunda maksimum şişme deformasyonları, düşük yüke maruz bırakılan yüksek sıkılıktaki numunede görülmüştür. Aynı zamanda düşük su muhtevasına sahip numunelerde yapılan testlerde, yüksek su muhtevasına sahip numunelere göre daha fazla şişme gözlenmiş, yüksek su muhtevasına sahip numunelerde düşük miktarda şişme gerçekleştiği anlaşılmıştır.

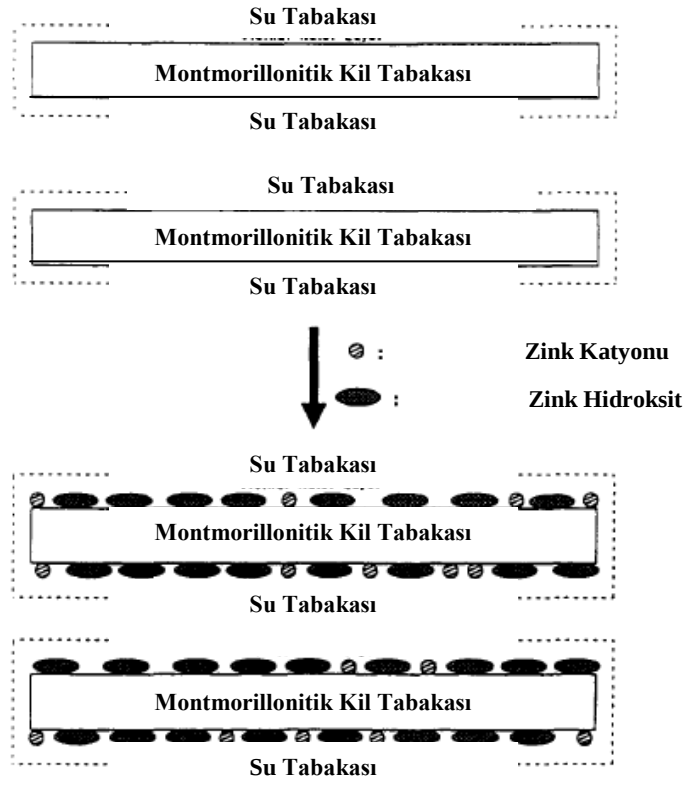
Tsai ve Vesilind (1998), montmorillonit kili, kum ve kireç karışımının 1,000 µg/mL yoğunlukta zink-klorit çözeltisi kullanarak geçirimsizlik özelliklerini incelemişlerdir. Kireç katkısının, kilin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişime neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Kireç miktarına bağlı olarak değişen hidrolik iletkenlik değerleri Şekil 2.16' da verilmiştir. Kireç katkısının meydana getirdiği puzolanik reaksiyona bağlı olarak boşluk dağılımı değiştiğini ve daha küçük boyutta boşlukların yer aldığı bir yapı meydana geldiğini belirterek, bu duruma bağlı olarak

kireç miktarı puzolanik reaksiyon oluşturacak miktardan az olması halinde topaklanma meydana gelerek geçirimsizliği artırdığını belirtmişlerdir. Ancak yeterli miktarda kireç ile geçirimsizlikte artış gözlenmiştir. Bu durumu Şekil 2.17’ de görüldüğü şekilde açıklamışlardır. Çalışmaları sonucunda geçirimsizlik özelliklerinin başlangıçta artan kireç oranı ile artış gösterdiği, sonrasında ise artan kireç yüzdesi ile azaldığı görülmüş ve sonuçta kireç ilave edilmiş kilin dolgularda kullanılabilirliğini göstermişlerdir.



Şekil 2.16 : Su ve zink klorit çözeltileri kullanılarak belirlenen geçirimsizlik değerlerinin kireç yüzdesi ile değişimi (Tsai ve Vesilind, 1998).

Önceki çalışmalarda ağırlıklı olarak saf killer ve geosentetik kil tabakaları (GCL) üzerinde çalışılmış, kil ile çeşitli doğal ve yapay malzemelerin karışımlarına ait davranışlar incelenmiştir. Kireç katkısının araştırıldığı bir çok çalışma mevcut bulunmakla birlikte yüksek fırın cürufunun (YFC) zemin davranışına etkisinin araştırıldığı çok sayıda çalışma yer almamaktadır. Yüksek fırın cürufu (YFC) katkılı beton ve doğal malzemelerin ağırlıklı olarak mukavemet etkisi araştırılmış olup, tek başına sonuç vermeyerek bağlayıcı kireç katkısı ile birlikte kullanımı önerilmesinden ve mevcut kireç katkılı çalışmalar bulunmasından dolayı, bu çalışmada kireç ve kireç+YFC katkılı malzemeler üzerinde atık depolama alanlarında kullanılmak üzere oturma ve geçirimsizlik özellikleri araştırılması hedeflenmiştir.



Şekil 2.17 : Şematik olarak montmorillonit killerini çevreleyen suyun zink katyonlarına bağlı yer değişimi (Tsai ve Vesilind, 1998).

.

3. KATI ATIKLAR VE ATIK YÖNETİMİ

Toplumsal, teknolojik ve endüstriyel gelişmelere bağlı olarak yükselen yaşam standartları, doğa üzerinde insan etkisinin artmasına yol açarak çeşitli sorunları da beraberinde getirmektedir. İhtiyaçlar doğrultusunda üretim miktarı artarken kullanım süresi kısaltmakta, bu nedenle üretim hızı, tüketimin çok üzerinde kalmaktadır. Bu durumda atık malzeme miktarı artışı kaçınılmaz olmakta, sonuç olarak atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi süreçlerini içeren atık yönetimi konusu önem kazanmaktadır. Çevre bilinci gelişmediği takdirde, ortaya çıkan atıklar atık yönetimi tanımından oldukça uzak bir şekilde vahşi çöp depolama yöntemi ile rastgele seçilen bir araziye kontrolsüzce serilmekte ve kötü görüntü ve kokunun yanı sıra çevre sağlığını ciddi anlamda tehlikeye atacak durumların ortaya çıkması göz ardı edilmektedir. Vahşi depolamanın görsel ve duyuşsal etkileri Şekil 3.1’ de görülmektedir. Atık yönetimi, bu gibi durumların zararlarının anlaşılması ve çevre bilincinin gelişmesi ile birlikte günümüzde oldukça önem kazanmış durumdadır.

Atıkların çevreye zararlı etkilerini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak çeşitli atık bertaraf yöntemleri ile mümkün olmaktadır. Kullanımı mümkün olmayan ve çevreye zararlı bütün maddeleri kapsayan atık tanımı kendi içerisinde bir çok şekilde sınıflandırılmaktadır ve her çeşit atık türü için farklı bertaraf yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle atık yönetiminin doğru şekilde gerçekleştirilmesi için atıkların tanınması ve farklı bertaraf yöntemlerine uygun şekilde ayrılması esastır. Sınıflamanın yalnızca teoride değil, pratikte de yapılması halinde atık yönetimine ciddi katkılar sağlanarak ekonomik ve çevresel açıdan avantajlar kazanılmış olacaktır. Atıkların genel sınıflandırılmasına ve bertaraf yöntemlerine bu bölümde yer verilmiştir.

3.1 Atık Türleri

Atık, kullanılmış, artık istenmeyen ve çevre için zarar oluşturan her türlü maddedir. Doğada, çeşitli insan aktivitelerine bağlı olarak ortaya çıkan yabancı maddeler olarak nitelendirilebilecek atıklar, insan ve çevre sağlığına zarar vermeden bertaraf edilmesi gereken ürünlerdir. Gelişen yaşam şartları ve kentleşme neticesinde bilinçlenen toplumlarca atık yönetimi bilinci ortaya çıkmıştır. Atık yönetiminde verimli sonuçlar ortaya çıkarabilmek

adına atıkların sınıflandırılması ve bertaraf öncesinde gruplandırılarak uygun şekilde bertarafına olanak sağlanması gerekmektedir. Genel anlamda çöp, cam atıklar, elektronik atıklar, kağıt atıklar, sanayi atıkları, inşaat atıkları, organik atıklar ve inşaat atıkları gibi alt türlere ayrılan atıklar bu başlıklar altında toplanmak yerine çevresel tehlike oluşturma potansiyelleri göz önünde bulundurularak daha genel olarak sınıflandırılmışlardır.

3.1.1 Evsel atıklar

Evsel atıklar konutsal kullanım sonucu ortaya çıkan ve tehlikeli sayılmayan atıklar olarak nitelendirilebilir. Genel yiyecek-içecek artıkları, evsel kullanım sonucu ortaya çıkan kağıt, karton, cam, plastik kap ve şişeler, hijyenik ürünler ve benzeri bir çok ürün evsel atık tanımı içerisinde verilebilecek örneklerdendir. Kendi içlerinde organik ve inorganik olarak gruplanabilen evsel atıkların yaklaşık % 15 ini meyve sebze ve diğer yiyecek atıkları gibi organik atıklar oluşturmaktadır. Çeşitli ticari ve inşaat faaliyetleri sonucu ortaya çıkan artıklar yine bu kapsamda değerlendirilmektedir.

3.1.2 Özel atıklar

Evsel atık tanımı içerisinde bulunmayan ve farklı yöntemler ile toplanma ve bertaraf gerektiren, endüstriyel üretim ve kullanıma bağlı veya farklı amaçlara hizmet doğrultusunda ortaya çıkan atıklardır.

3.1.2.1 Tıbbi atıklar

Sağlık sektörüne bağlı olarak ortaya çıkan atıklar tıbbi atık olarak sınıflandırılmaktadırlar. Hastane ve laboratuvar kaynaklı kullanım görmüş şırınga, tüp gibi ürünler, patolojik artıklar ve çeşitli ilaç artıkları tıbbi atıklara örnek olarak verilebilir.

3.1.2.2 Tehlikeli atıklar

Çeşitli etkileşimler sonucu çevreye zarar verebilecek sonuçlara neden olması muhtemel patlayıcı, zehirli, parlayıcı veya toksik içerik ihtiva eden ürünler ilgili kurum ve kuruluşlarca belirlenerek tehlikeli atıklar olarak sınıflandırılmışlardır. Tehlikeli atıklar evsel veya sanayi kökenli olabilmekle birlikte toplanmaları ve bertaraf sırasında belirli sınırlar içerisinde hareket edilerek önlemler alınmasını gerektirmektedir. Çeşitli metal içerikli artıklar, makine yağları, enerji üretimi sağlayan akü ve pil gibi ürünler ve tüm toksik içeriğe sahip artıklar tehlikeli atık sınıfında değerlendirilmektedir.

3.1.2.3 Radyoaktif atıklar

Radyoaktif özellik taşıyan ve çevre sağlığını büyük ölçüde tehdit eden atıklardır. Diğer atıkların işlenebildiği çeşitli tesislere kabul edilmeyen radyoaktif atıkların doğa üzerindeki etkisinin yaklaşık 200 yıl içerisinde sonlanmakta olması nedeniyle bertarafı da büyük önem arz etmektedir. İçeriklerinin yarı ömürlerine bağlı olarak belirlenen süre boyunca belirli ortamlarda ve belirlenen şartlar çerçevesinde depolanması gerekmektedir.

3.2 Atık Yönetimi

Endüstriyel ve teknolojik gelişmeler, bir yandan insanların yaşam şartlarını daha yaşanabilir kaliteye taşıırken, diğer taraftan demografik yapı ve kontrolsüz olarak gelişen kentleşme ile birlikte doğal yapıyı oluşturan tabiat dengelerinin bozulmasına ve tüm organizmaları tehdit edecek seviyelere varan ekolojik ayak izlerine neden olmaktadır. Teknolojik ve nüfus gelişimleri doğrultusunda kirlenmenin engellenebilmesi için, kirlenmenin en temel nedeni olan nüfusun sivil toplum kuruluşları tarafından bilinçlendirilmesi, atıkların belli bir sistematik içerisinde taşınması, toplanması, depo alanlarının oluşturularak geri dönüşüm sürecinde doğaya zararsız bir şekilde kazandırılması gerekmektedir.

Zamana bağlı olarak gelişen teknoloji, artan sanayileşme ve nüfus gibi etkenler bir çok olumsuz durumu da beraberlerinde getirmektedir. İnsan ile doğa arasındaki bağlar gittikçe zayıflamakta ve bu durum doğal dengeyi bozmaktadır. Doğayı olumsuz etkileyen faktörlerin başında, her yönü ile ele alınabilecek kirlilik gelmektedir. İnsana bağlı kullanımlar sonucunda ortaya çıkan bir çok zararlı atığın doğaya en az zarar verecek hale getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla dünyada atık yönetimi adı altında çeşitli uygulamalar yapılmaktadır. Alınabilecek önlemler arasında atık kaynaklarını azaltarak ortaya çıkan atık miktarını azaltmak, geri dönüşüm gibi yöntemler mevcut olmakla birlikte, yeniden değerlendirilemeyecek ve doğada var olması kaçınılmaz atıklarda yakma, kompostlama ve düzenli depolama gibi yöntemlere başvurulması gerekmektedir.

Katı atıkların insanların yaşam şartlarına ve doğal yapıya zarar vermeyen hale getirilmesine, atıkların bünyesinde bulunan, geri dönüştürülebilir niteliklere sahip maddelerin ekonomik açıdan yeniden değerlendirilmesine atık bertarafı denilmektedir. Katı atıkların bertarafında genel olarak yakma, düzenli depolama, geri kazanma ve kompostlama yöntemleri kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemler arasında düzenli depolama dışındaki diğer yöntemler

bertaraf edilmesi gereken yeni atıkların oluşmasına neden olurken, düzenli depolama kesin bir çöp uzaklaştırma yöntemidir.

Türkiye’de sosyal popölasyon artışına bağılı olarak son 50 yılda konut amaçlı olarak kullanılan alanlarda ortaya çıkan evsel atık miktarı 3-4 milyon ton/yıl’dan 25 milyon ton/yıl düzeylerine ulaşmış durumdadır. Katı atıklar günümüzde toplama, taşıma ve geri dönüşüm süreçlerini içerisine alan sistematik bir düzeni gerekli kılmaktadır. Bu gereksinim doğrultusunda atık yönetimi günümüzde önemli bir kavram haline gelmektedir.

Atık yönetiminin temelini atıkların bertaraf edilmesi oluşturmaktadır. Atıkların ortadan kaldırılması, miktarının azaltılması veya yeniden değerlendirilmesi gibi süreçleri içeren çeşitli bertaraf yöntemlerine bu bölümde yer verilmiştir.

3.2.1 Kaynakta azalma

Ortaya çıkacak atık miktarının azaltılması kullanım kalitesinin artırılması ile mümkündür. Bu konuda yeterli toplumsal bilincin gelişmesi halinde atık miktarının azalmasının yanı sıra diğer yöntemlerin uygulanması da kolaylaşmış olacaktır. Özellikle konutlarda bilinçli tüketim, cam ve kağıt gibi geri dönüştürülebilir atıkların plastik gibi çevreye zararlı diğer atıklardan ayrılması gibi basit önlemler genel anlamda atık yönetimine fayda sağlayabilecek seviyeye getirilebilir. Kullanılan ürünlerde pet şişe yerine cam şişe tercih edilmesi, plastik kaplar yerine atık oluşturmayacak alternatif ürünlerin tercih edilmesi gibi tüketim bilincinin yeterli hale gelmesi durumunda ortaya çıkacak atık miktarı büyük oranda azalma göstermiş olacaktır. Üretici firmaların da katkısı ile bu bilincin oluşturulması bu nedenle önem arz etmektedir. Büyük ölçekte ise sanayi yapıları çevreye zararlı ve görsel açıdan şehir silüetini bozan atık tepecikleri oluşturmak yerine, bunların yeniden değerlendirilebileceğı diğer sanayi kollarına dağıtımını mümkün kılacak doğrultuda yapılandığı takdirde hem ekonomik hem çevresel açıdan büyük avantajlar sağlanacağı aşıkardır.

3.2.2 Geri kazanma

Atık maddelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslere tabi tutularak yeniden kullanımını mümkün kılan geri kazanma yöntemi, gerek doğada var olacak yabancı madde miktarının azaltılması, gerek çeşitli ekonomilere katkı amacı ile uygulanabilmektedir. Kağıt, cam gibi bir çok malzeme yeniden kullanılmaya uygun hale getirilebilirken, diğer bir takım atık malzemeler başka sektörlerde yan madde olarak kullanım imkanı bulmaktadır. Yeniden değerlendirilen atıkların, ürünün yanı sıra enerjiye dönüştürülmesi de mümkün olup sonuçta

yine ortaya çıkan atık miktarında azalma olması beklenir, ancak yöntemin bir sonucu olarak yeni atık malzemelerin ortaya çıkması da kaçınılmazdır. Uygulanabilirlik açısından en önemli unsur ise atıkların gruplanarak atılması ve toplanmasıdır.

3.2.3 Yakma

Yakma işlemi atık hacminin büyük oranda azaltılmasını sağlayan bir işlemdir. İşlem sonucunda atıkların ortalama % 25 i miktarında yeni atık üretilmekte, yani sistem % 75 verim sağlamaktadır. Yakma yöntemi, enerji üretilebilecek, işlem için ek yakıt gerektirmeyerek kendi yakma enerjisini üretebilecek atıklar üzerinde uygulanması uygun olan bir yöntem olmakla birlikte uygulanabilirlik imkanları kısıtlı ve kontrolü zordur. Ek yakıt gereksinimi ortaya çıktığı takdirde işlemin ekonomik boyutu olumsuz yönde gelişecek olmakla birlikte işlem çeşitli kurum ve kuruluşlarca belirlenen kurallar dahilinde gerçekleştirilmediği takdirde artan hava ve çevre kirliliği kaçınılmazdır. Uygulama esnasında doğal dengeyi bozmadan zararsız bir şekilde gerçekleşmesi için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Kısıtlı durumlarda tercih edilen bir yöntem olan yakma yöntemi, nihai ürün stabilizasyonunda ve enerji üretimi gerçekleştirilebilecek durumlarda tercih edilmelidir. Yöntemin gerçekleştirildiği tesislerin çevre kirliliğine yol açarak insan sağlığına zarar verme, yüksek enerji ve kaynak tüketimi, alternatif yöntemlerin gelişmesini kısıtlama gibi olumsuz etkilerinin yanı sıra yerel ekonomilere de ciddi anlamda zarar verdikleri tartışılmaktadır.

3.2.4 Kompostlama

Atık malzeme içerisindeki organik maddelerin bozularak yeniden değerlendirilmesi işlemi olan kompostlama yönteminde de atık maddenin tamamı kullanılamamakta, işlem sonucunda ortaya yine bertaraf edilmesi gereken atık malzeme çıkmaktadır. İşlem sonucu ortaya çıkan malzemelerin tarım alanında kullanımı yaygındır. İşlem, atık malzemelerin yalnızca organik kısımları üzerinde uygulanabilir olup tek başına yeterli bir yöntem olamamaktadır.

3.2.5 Düzenli depolama

Gerekli araştırmalar yapılarak seçilmiş bir alan üzerinde geçirimsizlik sağlandıktan sonra atık maddelerin kontrollü olarak serilerek sıkıştırılması ve üzerinin uygun malzeme ile örtülmesi işlemidir. Atıkların nihai bertarafında tercih edilmesi gereken yöntem olup kalıcı çözüm sunmaktadır. Belirlenen şartlar çerçevesinde uygulandığı takdirde en uygun atık bertaraf yöntemi düzenli depolamadır. Her türlü atık malzemenin depolanması için uygun hale getirilebilen düzenli depo sahaları, arazinin yeniden kullanımına da olanak vermektedir.

Ekonomik ve nihai bir yöntem olmasının yanında tasarım ve sonrasında kontrol ve takip gerektirmektedir.

Depolama sahasında çevrenin, özellikle zeminin ve yeraltı suyunun kirlenmemesi esastır. Bu nedenle serim yapılmadan önce geçirimsiz taban şilteleri oluşturulur, üzerinde ise drenaj sistemi kurularak sızıntı sularının kontrolü sağlanmış olur. Kontrollü serim yapıldıktan sonra üzeri kapatılmalı, ayrıca zehirli gazların sıkışarak patlamaya yol açmaması için borular vasıtasıyla içerisindeki hava yine kontrollü olarak uzaklaştırılmalıdır. En üst tabakada ise geçirimsiz bir örtü üzerinde tarım toprağı serilmektedir. Üst örtü tabakasının uygun şekilde imal edildiğı koşullarda arazinin park, oyun alanı gibi kullanım bulması mümkün kılınmaktadır.

Temel adımları genel olarak zeminin atık dökülmesi için hazırlanması, drenaj sisteminin kurulması, atıkların serimi ve sıkıştırılarak düzenli olarak örtülmesi sonrasında gaz drenaj sistemi kurularak geçirimsiz örtü ile kapatılması ve arazinin kullanıma uygun hale getirilmesi olarak sıralanabilir. Zemin şartlarının sorun teşkil etmediğı durumlarda ekonomik oluşu, kalıcılığı ve esnekliği ile büyük avantaj sağlayan bir yöntem olmakla birlikte, kaçınılmaz olarak çeşitli olumsuz durumlar da ortaya çıkarabilmektedir. Yer seçiminde dikkat edilmesi gerektiğı gibi yüksek nüfus yoğunluğuna sahip büyük şehirlerde gözü rahatsız etmeyecek kadar uzak ancak atıkların taşınmasının ekonomik açıdan uygun kılacak kadar yakın mesafede sahaların seçilmesi gereksinimi imkanları kısıtlamaktadır. Diğer yandan halkın koku ve toza maruz kalmaması sağlanmalıdır. Ancak genel anlamda doğru uygulama ile olumsuz sonuçlara yol açmadan atıkların nihai bertarafını sağlayan tek yöntemdir.

Düzenli depolama yönteminde uygun şekilde hazırlanması gereken düzenli depolama tesislerinin hazırlık ve işletme aşamaları ile ilgili genel bilgiler bir sonraki bölümde yer almaktadır.

4. DÜZENLİ DEPOLAMA TESİSLERİ

Yerleşim bölgelerinde nüfus artışına ve çeşitli endüstriyel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak ortaya çıkması ve imhası önlenemez atıkların depolanması zorunlu hale gelmektedir. Yeterli çevre sağlığı bilinci gelişmemiş toplumlarda atık depolama, “vahşi çöp depolama” adı altında yerleşimden uzak olarak nitelendirilebilecek bir bölgeye kontrolsüz olarak yığılmakta ve atıkların çevre ile etkileşiminden meydana gelecek sonuçlar göz ardı edilmektedir. Şekil 4.1’ de görülen görüntü kirliliğin yanı sıra çevresel kirlilik de kaçınılmaz olmaktadır. Vahşi depolama tesislerinde atıklar hava ve zemin ile doğrudan temas halinde olup çevreye verecekleri zarar konusunda herhangi bir önlem alınmamaktadır. Bu durum gelişmiş toplumlarda düzenli depolama sahalarının imalatı ile önlenilmektedir.



Şekil 4.1 : Vahşi çöp depolama örneği (www.mozturk.net).

Düzenli depolama, Çevre ve Orman Bakanlığı (2010) tarafından “katı atık sızıntı sularının ve depo gazının olumsuz etkilerini kontrol altına alınacağı, sızdırmazlık ve gaz kontrolü sisteminin yapılmış olduğu alanlara, katı atıkların çevre problemleri oluşturmayacak şekilde kademeli olarak zemin üzerinde depolanarak bertaraf edilmesi” olarak tanımlanmıştır. Çöp dökümü için hazır bir tesis örneği, Şekil 4.2’ de görülmektedir. Depolama tesislerinin tasarımında yapılması gereken ön etütler ise;

ilgili meslek gruplarından uzmanları tarafından uygun saha araştırmasının yapılması, saha ile ilgili jeolojik, hidrojeolojik, geoteknik ve depremsellik özelliklerinin ve benzeri bir çok parametrenin incelenmesi ve Çevresel Etki Değerlendirilmesi (ÇED) yapılması olarak belirlenmiştir. Düzenli depolama tesislerinde atıklar atıkların kontrollü olarak depolanarak çevre ile etkileşimi kontrol altına alınmış olmaktadır. Genel olarak yapım aşamaları kademelendirme, geçirimsiz tabaka serimi, drenaj tabakası imalatı, kademeli çöp serimi ve sıkıştırılması, geçirimsiz örtü serimi ve arazinin yeşillendirilmesi olarak sıralanabilir. Temel olarak düzenli depolama tesislerinde alt ve yanal sızdırmazlık sistemi, sızıntı drenaj ve toplama alanı, gaz drenaj sistemi, üst örtü, yer altı suyu ve gaz kontrolü takip sistemi yer almaktadır. Gerekli geçirimsizlik ve hava ve su drenajı sağlandıktan ve üzeri uygun şekilde kapatılan depolama sahaları, çeşitli açık alan fonksiyonlarına uygun olarak kullanılabilir. Düzenli depolama, ekonomik ve kolay uygulanabilir bir yöntem olmasından dolayı sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir.



Şekil 4.2 : Düzenli depolama tesisinin hazırlanması (<http://www.cevkainsaat.com>).

Atık depolama sahalarında geçirimsiz tabaka olarak sıkıştırılmış zemin tabakaları kullanılmaktadır. Geçirimsizlik sistemleri bazen tek bir dolgu tabakası ihtiva ederken diğerleri iki veya daha fazla tabakadan oluşabilmektedir. Ağırlıklı olarak geomembranlar ile birlikte kompozit bir yapı oluşturularak uygulanmaktadır. Genellikle kil içerikli malzemelerin kullanımının tercih edildiği bariyerler doğal zemin, bentonit-zemin karışımları veya yapay malzemeler içeren çeşitli karışımlardan oluşabilmekte olmakla birlikte doğal malzeme olarak USCS sınıflamasına göre CL, CH ve SC sınıfından malzemeler tercih edilmektedir (Daniel ve Koerner, 2007).

Bariyer tabakada kullanılmak üzere saha içerisinde veya yakınlarında uygun killi malzeme bulunması durumunda direkt olarak veya çeşitli özelliklerin sağlanması amacı ile işlenerek uygulanabilir. Eğer saha içerisinde veya yakınında yer alan doğal malzeme bariyer malzemesi olabilmek için gerekli şartları sağlamıyorsa, mevcut doğal malzeme bentonit türü malzeme ile karıştırılarak uygulanabilir hale getirilebilmektedir. Uygulamada bahsi geçen bentonit, ağırlıklı olarak smektit minerali içeren ticari olarak işlenmiş tüm materyalleri tanımlamaktadır. Granüler veya pulverize olarak elde edilebilmektedir. Bunların yanı sıra çeşitli yapay malzemeler ile birlikte de geçirimsiz tabakalarda kullanımı mümkündür. Genellikle bentonit ile birlikte uçucu kül, veya polimer ve benzeri ticari katkıları tercih edilmektedir.

4.1 Standartlar

Katı Atık Kontrol Yönetmeliği'nde (1991) belirtilen bazı önemli maddeler aşağıda sıralanmaktadır:

- Evsel ve evsel nitelikli endüstriyel katı atıkları ve arıtma çamurlarını düzenli olarak depolamak amacıyla inşa edilen depo tesisleri, Bakanlık veya ilgili belediyeler tarafından içme suyu temin edilen ve edilecek olan yüzeysel su kaynaklarının korunması ile ilgili olarak, çıkarılan yönetmeliklerde, çöp dökülemeyeceği ve depolanamayacağı belirtilen koruma alanlarında kurulamaz. (Madde 24)
- Depo tesisleri, en yakın yerleşim bölgesine uzaklığı 1000 metreden az olan yerlerde inşa edilemez. Ancak, depo tesislerinin çevresinde tepe, yığın ve ağaçlandırma gibi tabii engeller varsa mahalli çevre kurullarının kararı ve gerektiğinde Bakanlığın uygun görüşü ile, bu mesafeden daha az olan yerlerde de ilgili belediye ve mahallin en büyük mülki amirliğince depo kurulmasına müsaade edilebilir. (Madde 24)
- Taşkın riskinin yüksek olduğu yerlerde, heyelan, çığ ve erozyon bölgelerinde, içme, kullanma ve sulama suyu temin edilen yeraltı suları koruma bölgelerine katı atık depo tesislerinin yapılmasına müsaade edilemez. (Madde 24)
- Bu alanlar işletmeye açıldıktan sonra iskâna açılmayacak şekilde planlanır ve etraflarına bina yapılmasına müsaade edilmez. (Madde 24) Depo tesisleri aşağıda belirtilen özellikleri taşımalıdır : (Madde 25)

- Evsel ve evsel katı atık özelliğindeki endüstriyel atıklar ile bunların atık su arıtma çamurlarını depolamak üzere inşa 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.

- Depo tesisine ulaşım ve depo iç yollarında geçiş her türlü hava şartlarında mümkün olacak şekilde düzenlenir.

- Planlanan depo tesisi bir çitle çevrilir.

- Depolama sahasında kirlenen araba tekerleklerinin yolları ve caddeleri kirletmemesi için, tekerlekleri temizleyecek teknik tedbirler alınır.

- Depo tesisi girişinde, girişi kontrol altında tutmak, gelen katı atıkları muayene etmek, tartmak amacı ile güvenlik kulübesi, işletme odası, kantar ve binası bulunur.

4.2 Yer Seçimi

Yer seçiminde, depolama yapılacak arazinin doğal nitelikleri de doğru imalat kadar önem taşımaktadır. Sahanın yerleşim bölgelerine uzaklığı, ulaşım durumu ve maliyetinin yanı sıra topografyası ve jeolojisi gibi bir çok etmen yer seçiminde etkili olmalıdır. Sahanın konumu, manzara açısından olumsuz görüntü oluşturmamalı ancak atıkların taşınmasını ekonomik kılacak ölçüde taşınma mesafesinde yer almalıdır. Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından hazırlanan Düzenli Depolama ve Tıbbi Atık Bertaraf Tesisleri İşletme ve Kontrol Kılavuzu'nda (2010), arazinin konutlardan en az 1 km ve havaalanlarından en az 3 km mesafede yer alması gerektiği belirtilmiştir. Kurak araziler ve maden boşluklarının yer aldığı çöküntü araziler düzenli depolama için uygun arazilerdir. Seçilen sahanın yer altı suyu durumu, sızıntı sularının yer altı suyunu kirletmemesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle yer altı suyu koruma bölgelerinde bu tip tesisler inşa edilmesi uygun olmamaktadır. Arazinin heyelan ve erozyona müsait bir yapı teşkil etmemesi gibi yapısal koşullara dikkat edilmelidir. Depolanacak atık miktarı, nüfus ve ihtiyaca göre belirlenerek seçilecek sahanın büyüklüğü bu durum göz önünde bulundurularak planlanmalıdır. Arazinin topografyasının ise birikintiye neden olmayacak ölçüde eğimli ancak erozyon meydana getirmeyecek ölçüde düz olması gerekmektedir.

Genellikle bu aralık % 1 ile % 20 aralığında uygun olarak belirtilmiştir. Çevresel etkileşimi kontrol altında tutmak amacı ile inşa edilecek geçirimsiz tabakanın daha verimli sonuç vermesi ve daha ekonomik olması adına sahanın jeolojik yapısı da geçirimsizliğe karşı dirençli olmalı, akifer niteliği taşımamalı veya çatlak sistemleri barındırmamalıdır. Sahada yer alan zeminin ayrıca taşıma kapasitesi ve depremselliği incelenmelidir. Özellikle yer altı suyu seviyesinin derinliği, hidrolik eğimi ve kalitesinin belirlenerek saha seçiminde dikkate alınması gerekmektedir. Seçilen bölge çevresindeki doğal bitki örtüsü, toz, gürültü ve koku gibi etkileri azaltarak yine çevre ile etkileşimi kısıtlayan önemli bir unsurdur. Yaşamsal açıdan hakim rüzgar yönünün yerleşim bölgelerine kokuyu taşımayacak şekilde sahanın konumlandırılması önemlidir. Amerika Çevre Koruma Ajansı (EPA, Environmental Protection Agency) tarafından (1992) çevresel açıdan hassas alanlar aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

1. Sulak ve bataklık araziler,
2. Taşkın potansiyeli olan alanlar,
3. Yer altında donmuş tabakası bulunan alanlar,
4. Soyu tükenmekte olan canlı türlerinin yaşam alanları,
5. Yer altı sularının geri dolum bölgesi olan alanlar

olarak belirlenmiştir. Bunlardan başka kullanımdan kaçınılması gereken alanların başında sızmaya elverişli çatlak sistemleri barındıran kaya yapıları, içme suyu temin edilebilen havzalar, çığ veya heyelan riskli bölgeler, bataklık alanları yer almaktadır. Atık depolama tesisi inşa edilecek en uygun alanları ise kil çukurları ve yüzey sularının minimum olduğu vadi başları oluşturmaktadır. Her koşulda, uygun sahayı belirlemeden önce arazi ile ilgili jeolojik ve geoteknik etütler, hidrojeolojik ölçümler, trafik ve harita etütleri yapılması gereklidir.

4.3 Tasarım Parametreleri

Tasarımda önem arz eden hususlar Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından Düzenli Depolama ve Tıbbi Atık Bertaraf Tesisleri İşletme ve Kontrol Kılavuzu'nda (2010) aşağıdaki şekilde belirtilmiştir:

- Düzenli depolamaya kabul edilmeyecek atıklar

- Düzenli depolama yapılacak sahanın yapısı
- Yaklaşım yolları,
- Toprak hareketleri,
- Sahanın hazırlanması,
- Sızıntı sularının toplanıp arıtılması,
- Depo gazlarının toplanıp işleme tabi tutulması,
- Depo tabanı ve üst tabakaları,
- Ana bina ile yardımcı bina ve tesisler.

Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından Düzenli Depolama ve Tıbbi Atık Bertaraf Tesisleri İşletme ve Kontrol Kılavuzu'nda (2010) belirlenen genel şartlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- Düzenli depolama sahalarının sayısı az olmalıdır.
- Yeraltı sularını kontrol için kontrol kuyuları açılmalıdır.
- Heyelana yol açabilecek uygulamalardan kaçınılmalıdır.
- Yollar her türlü hava şartlarında araç trafiğine elverişli olmalıdır.
- Alt yapı tesisleri, arıtma tesisleri dahil, planlanmalıdır.
- Alan trafik bağlantısı, yol ve köprü bağlantıları yük sınırları açısından uygun olmalıdır.
- Depolama tesisi etrafı tel çitle çevrilmeli ve sahaya giriş kontrol altında tutulmalıdır.
- Düzenli deponun tabanında yönetmeliklere uygun bir sızdırmazlık tabakası bulunmalıdır.
- Gaz toplama boruları ile pasif veya aktif yöntemler kullanılarak gazlar kontrol edilmelidir.
- Depolama tesisi çevresinde yapılacak hendeklerle drenaj sağlanmalıdır.
- Depo tesisine girişte bekçi kulübesi ve kantar bulunmalıdır.
- Depo tesisi içinde tesisin büyüklüğüne uygun şekilde idare ve işletme binaları olmalıdır.

- Depolama yerini terk eden araçların tekerlekleri ve çevresi yıkanıp temizlenmelidir.
- Çöp üzerindeki nihai örtü tabakası, suyu geçirmeyen katmanlardan oluşmalıdır.
- Deponun üst yüzeyinin eğimi yeterli olmalıdır.
- Tehlikeli atıklar evsel atıkların depolandığı tesise kabul edilmemelidir.
- Deponun son seviyesine ulaşmış kısımlarında yeşillendirme ve ağaçlandırma yapılmalıdır.

Düzenli depolama sahalarında yer alması gereken ana ünite ve ekipmanlar ise şu şekilde sıralanmıştır.

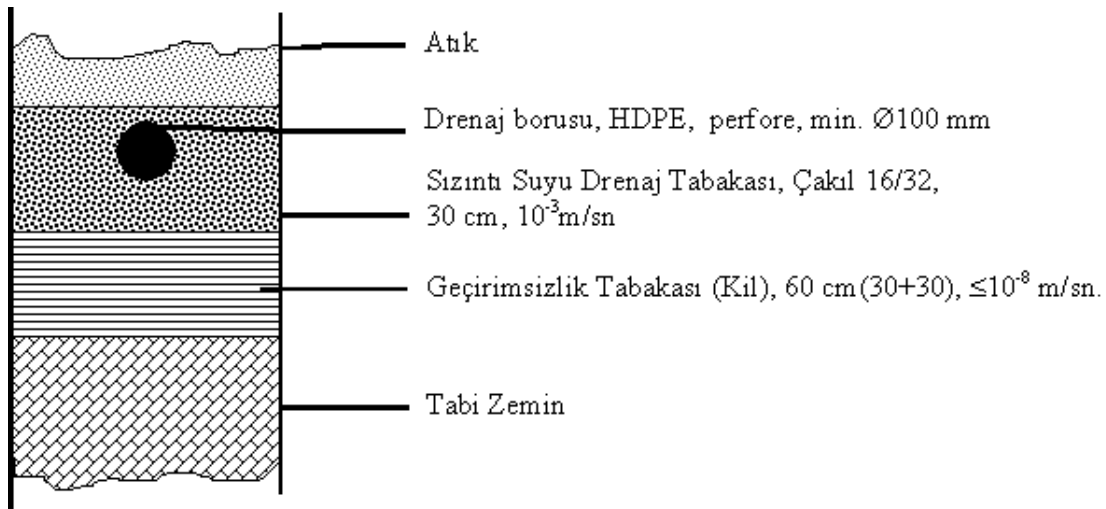
- Yer altı suyunu ve sızıntı suyunu izlemek üzere açılacak sondaj kuyuları,
- Depo sahası etrafındaki çit ve yüzeysel drenaj sistemi,
- Depo tabanında oluşturulacak sızıntı suyu toplama ve arıtma sistemi (veya uygun bir arıtma tesisine nakil sistemi),
- Tesise girişe ait yaklaşım yolları, tesis içi kalıcı ve geçici yollar; köprü ve menfezler,
- Elektrik, su, doğalgaz, telefon, içme suyu ve atık su sistemi ve arıtma tesisleri; diğer alt yapı tesisleri,
- Giriş kantar ve güvenlik binası,
- İdare binası,
- Garaj ve tamir atölyesi, teknik servisler,
- Tesis çıkışında araç tekerlek yıkama ünitesi,
- Yangın söndürme tertibatı,
- İlk yardım seti,
- Trafik işaretleri,
- Araçlar (buldozer, yükleyici, ekskavatör ve benzeri)
- Radyasyon ölçüm sistemi.

Saha seçimi gerçekleştirildikten sonra tasarım aşamasına geçilmeden önce bölgenin iklim koşulları belirlenmelidir. Zira sıcaklık, yağış miktarı, buharlaşma ve rüzgar yönü gibi parametreler atık depolama tesisleri üzerinde etkili olmaktadır.

4.3.1 Taban teşkili

Atık depolama tesislerinde özellikle atıklardan sızan kirli suyun zemini ve dolayısı ile yer altı suyunu etkilememesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle tabanda geçirimsizlik sağlamak önceliklidir. Depo tabanında sızdırmazlık tabakası oluşturularak geçirimsizlik değeri istenen düzeye getirilebilmektedir. Belirlenen standartlarca oluşturulacak bariyer tabakasının geçirimsizliği 1×10^{-8} m/s değerinden düşük olmalıdır. Atıkların serilmesinden önce oluşturulması gereken düzen, Şekil 4.3' te görülmektedir.

Atık depolama sahalarında taban teşkili bir çok önemli adım içeren ve dikkat edilmesini gerektiren zorlu bir süreçtir. Uygun malzemenin seçimi, seçilen malzemenin uygun bir şekilde doldurulması ve sıkıştırılması ve sıkıştırılan tabakanın korunmasının sağlanması taban teşkilinde en önemli basamakları oluşturur. Alt basamaklarda ise geçirimsiz tabakanın üzerinde yer alacağı depo tabanının uygun şekilde hazırlanması, kullanılan malzemenin uygulama amacına yönelik gereksinimlerinin karşılanması, eğer gerekli ise uygun boyut ve su içeriğine getirilmek üzere işlenmesi veya katkı malzemeleri ile iyileştirilmesi, tabakanın uygun kalınlıklarda serilerek düzgünce sıkıştırılması ve kuruma, donma gibi iklimsel etkilere karşı korunması ve en üstte yer alacak tabakanın altında yer alacağı malzemenin amacını desteklemesinin sağlanması yer almaktadır.



Şekil 4.3 : Düzenli depolama tesisi taban kesiti (<http://eski.yerelnet.org.tr>).

Taban şiltesinin altında yer alacak zeminin, kil tabakanın sıkıştırılabilmesi için uygun hale getirilmesi ve kütleli hareketlerin engellenmesi gerekmektedir. Taban teşkilinde kullanılacak malzemeye bağlı olarak bariyer malzeme doğal veya

geosentetik malzeme üzerine inşa edilebilmektedir. Kil tabakası serim aşaması Şekil 4.9’ da görülmektedir. Eğer en alt tabakada doğal zemin yer alacaksa, depo tabanını sağlam anakayanın oluşturması gerekmektedir. Bu gibi durumlarda zeminin sıkıştırılması gerekmektedir. Su miktarı, uygun şekilde sağlam zemin özellikleri elde edecek şekilde artırılmalı veya azaltılmalıdır. Eğer bariyer malzeme geosentetik üzerinde yer alacaksa geosentetik malzemenin altında yer alan doğal zemin ile uyumunun sağlanması esastır.

Düzenli depolama yönteminin istenilen sonuçları vermesi için doğru şekilde tasarlanması ve sistemin doğru şekilde uygulanması gerekmektedir. Aksi takdirde çevre kirliliği açısından, hava ve yer altı suyu kirliliği başta olmak üzere büyük tehlikeler oluşabilmektedir. Atık malzeme ile doğal ortamın etkileşiminin kontrol altında tutulması, özellikle atıklardan sızan suların zemine ve dolayısı ile yer altı suyuna karışmamasının sağlanması bu nedenle büyük önem taşımaktadır. Bu etkileşimi engellemek amacı ile depo tabanında geçirimsizlik sağlanması amacı ile geçirimsizlik tabakası oluşturulmaktadır. Tabaka oluşturmak için kullanılacak malzemelerin sağlaması gerekli çeşitli kriterler, yerel yönetimler tarafından belirlenmektedir. En önemli unsur olan geçirimsizlik değerinin, bölgesel ve amaca yönelik olarak değişim göstermekle birlikte genel olarak 1×10^{-8} m/s değerinin altında olması tercih edilmektedir.

Düzenli depolama sahalarında taban teşkilinde kullanılacak geçirimsiz şiltelerde düşük geçirimsizlik özellikleri ve yüksek su tutma kapasitesine bağlı olarak bentonit kullanımı yaygındır. Cho ve diğ. (1999), bentonitin geçirimsizlik özelliklerinin kuru birim hacim ağırlığına bağlı olarak değişim gösterdiğini ve ağırlıklı olarak birim hacim ağırlığının artması ile geçirimsizliğin azaldığını belirtmişlerdir. Bu nedenle kullanılacak malzemenin istenilen sıklığa getirilmiş olması önem arz eder.

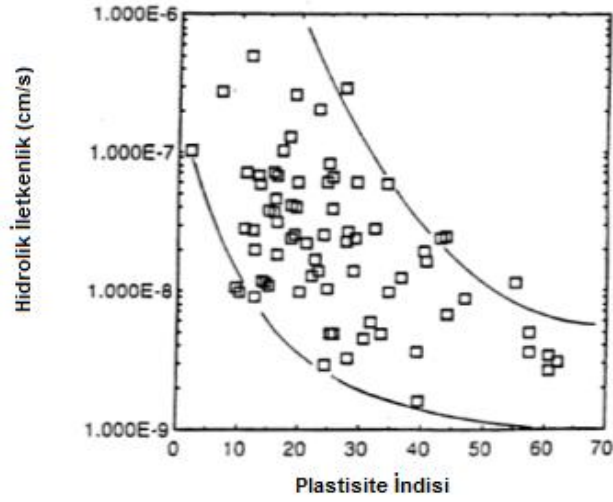
Dolgu malzemesinin seçiminde düşük geçirimsizlik özelliklerinin yanı sıra likit limit, plastik limit, dane çapı dağılımı gibi parametrelere de zaman zaman sınırlamalar getirilebilmektedir (Daniel, 1993). Proje gereksinimlerine bağlı olarak malzemelerin uygunluğu değişiklikler gösterebilmektedir. Genel olarak malzeme seçiminde, uygulama öncesi laboratuvar ve uygulama sonrası arazi deneylerinin yapılması gerekmektedir birlikte uygulama sırasında belirlenen malzeme özelliklerini teyit edebilmek amacı ile davranış incelenmelidir.

Düzenli depolama tesislerinde geçirimsiz şilte oluşturma uygulamasında, uygun olduğu takdirde kullanılacak bentonit üzerinde incelemeler yapılarak türü, yapısı ve dane doyu dağılımı tespit edilerek, yalnızca özellikleri tanımlanmış olmayıp ayrıca bu doğrultuda uygulamada gereken miktar belirlenmeli ve mali yaklaşımlarda bulunulmalıdır. Bentonit özelliklerini belirlemek için çeşitli deneyler yapıldıktan sonra, belirli oranlarda kum/bentonit karışımları hazırlanarak kompaksiyon deneyine tabi tutulmalı ve sonrasında geçirimsizlik özelliklerinin incelenmesi amacı ile optimum su muhtevassından % 2 daha yüksek su muhtevasına getirilen numuneler proktor sıkılığına getirilmelidir. Geçirimsizlik deney sonuçları ile bentonit oranı ilişkilendirilerek en düşük geçirimsizlik özelliğine sahip oran belirlenir. Dolgu yapılması sırasında dolgunun kalitesini olumsuz yönde etkileyecek durumlar yaratılmaması için işlem dikkatli bir şekilde gerçekleşmelidir. Uygulama sonrasında arazi geçirimsizlik deneylerinin yapılması gereklidir.

Kullanılan malzemenin plastisite özellikleri, geçirimsizlik sağlanması açısından önem arz etmektedir. Düşük geçirimsizlik sağlanabilmesi için kullanılan malzemede yüksek plastisite aranır. Daniel ve Koerner (2007), uygun plastisite indisi değerinin $> \%10$ olarak değerlendirmiş, ancak $\% 7$ plastisite indisine sahip zeminlerde de geçirimsizlik açısından iyi sonuçlar alınabildiğini eklemiştir. Benson ve diğ. (1992), plastisite indisi ile geçirimsizlik arasındaki ilişkiyi Şekil 4.4' te gösterildiği şekilde belirlemişlerdir. Şekilde görüldüğü üzere 10^{-7} m/s den daha düşük geçirimsizlik değerleri, $\% 10$ plastisite indisi değerine karşılık gelmektedir.

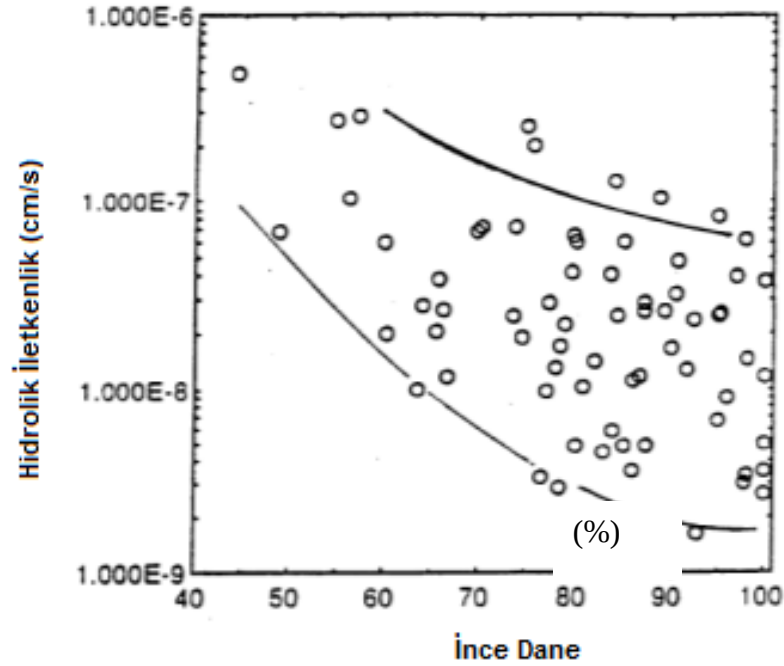
Daha yüksek plastisite indisine sahip zeminlerin, kurudukları halde topaklanmalar oluşturabilecekleri Daniel ve Koerner (2007) tarafından belirtilmiştir. Yüksek plastisiteli zeminlerin, ıslanma-kuruma karşısında büyük ölçüde şişme ve büzülme göstermeleri de beklenen bir sonuçtur. Bu nedenle kullanılan malzemede, bu durumlar arasında optimum davranış aranmalıdır.

Plastisitenin yanı sıra, ince dane içeriği de dolgu malzemenin davranışına etki etmesi beklenen bir parametredir. Ancak Daniel ve Koerner (2007) tarafından yeterli ince dane içeriğine sahip olmayan malzeme içerisindeki çok küçük dane boyutunun gereken miktarda düşük geçirimsizlik sağlanmasını engelleyeceğini belirtmiştir. Dolguda gerekli ince dane miktarı minimum $\% 30$ olarak belirlenirken, Benson ve diğ. (1992) bu değeri $\% 50$ olarak öngörmüşlerdir. Aralarında kurulan ilişki, Şekil 4.5' te gösterilmiştir.

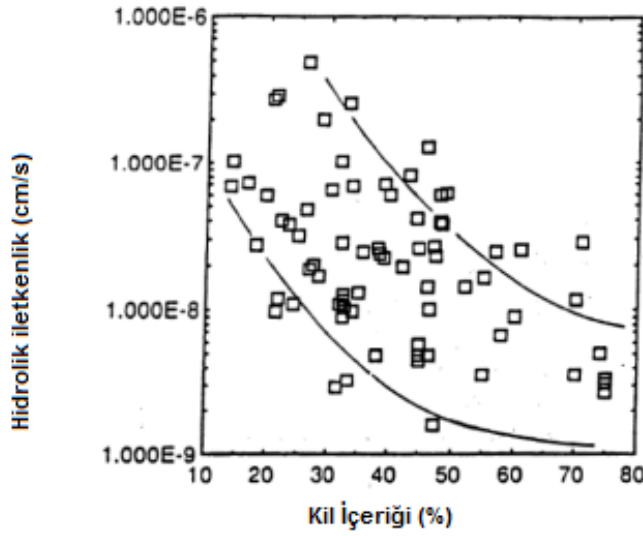


Şekil 4.4 : Plastisite indisi ile hidrolik iletkenliğin değişimi (Benson ve diğ, 1992).

Her durumda, dolguda yer alması gereken en büyük dane boyutunun belirli bir değerin üzerinde olmaması gerekmektedir. Çok iri boyutta malzemenin varlığı sıkıştırılma verimini düşürmekle birlikte üstüne örtülecek geomembrana da zarar verme tehlikesi taşımaktadır. Genellikle bu değer 25 mm ile 50 mm arasında belirlenmiştir. İnce dane içeriğinin yanı sıra malzeme içerisindeki kil yüzdesi de hidrolik iletkenliği etkileyen bir parametre olarak Benson ve diğ. (1992) tarafından belirlenmiş ve aralarındaki ilişki Şekil 4.6' da verilmiştir.



Şekil 4.5 : İnce dane içeriği ile hidrolik iletkenliğin değişimi (Benson ve diğ, 1992).



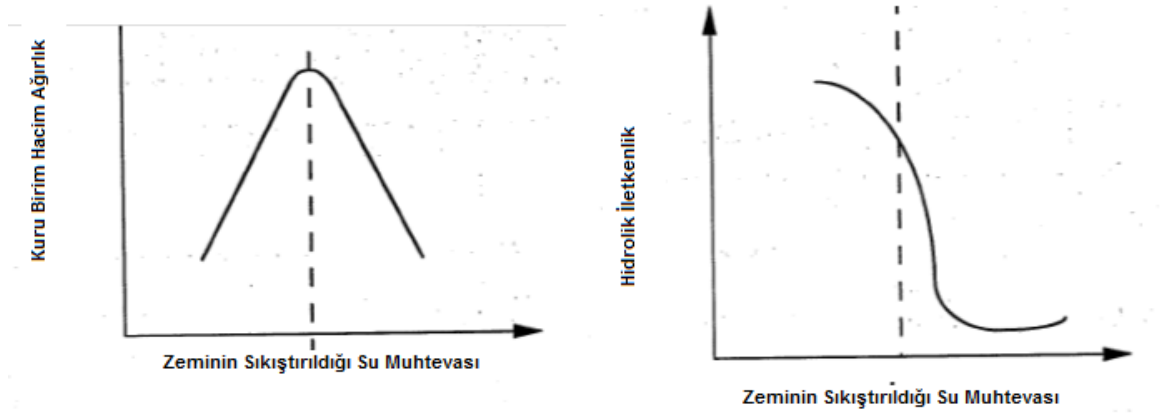
Şekil 4.6 : Kil yüzdesi ile hidrolik iletkenliğin değişimi (Benson ve diğ, 1992).

Belirtilen nedenler dolayısı ile dolgu malzemesinde iri dane boyutuna sahip malzeme oranı değiştirilerek uygun miktar elde edilmelidir. Dolgu malzemesi içeridindeki kil miktarı da istenen düzeyde düşük geçirimsizlik değerine etkiyen bir parametre olmakla birlikte, Benson ve diğ. (1992), 10^{-7} m/s den daha düşük geçirimsizlik elde edilebilmesi için en az % 10 - % 20 oranında kil içeriği gerektiğini belirtmişlerdir.

Sıkıştırıldığında çok düşük geçirimsizlik elde edilebilmesi nedeniyle bentonit, dolgu malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Daneler arasındaki boşlukların verimli bir şekilde dolmasını sağlayarak daha düşük geçirimsizlik değerleri elde edilmesini sağlamaktadır. Kuşkusuz bentonit ile karıştırılan zeminde karışımın üniform hale getirilmesi büyük önem arz etmektedir. Sodyum ve kalsiyum bentonit olarak sınıflandırılan bentonit çeşitleri arasında sodyum bentonit daha yüksek su tutma ve şişme kapasitesine sahip iken, kalsiyum bentonit stabilite açısından daha avantajlıdır (Gleason ve diğ, 2007). Sonuç olarak geçirimsizlik sağlanması istenen tasarımlarda sodyum bentonit kullanımı daha avantajlı olmaktadır. Dolguda istenen sıkıştırma sonucunu sağlayabilmek açısından, farklı boyutlarda elde edilebilen bentonitin iyice öğütülmüş boyutlarının tercih edilmesi gerekmektedir.

Sıkıştırılmanın gerçekleştiği su muhtevası değeri de dolgu malzemesinin kalitesini etkileyen parametrelerden biridir. Genel olarak su muhtevası ile zemin davranışı arasındaki ilişki Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Görülmektedir ki, optimum su muhtevasının altında su içeren zeminlerde yüksek geçirimsizlik özellikleri

gözlenirken, artan su muhtevası ile birlikte geçirimsizlik azalmaktadır. Ancak mukavemetin de artan su içeriği ile azalması gibi bir sonuç da ortaya çıkmaktadır. Daniel ve Koerner (2007), plastik limitin üzerinde su ihtiva eden zeminlerin plastik halde olduklarını ve düşük geçirimsizlik özelliği gösterecek şekilde işlenebileceğini belirtmiştir. Plastik limit değerinin altındaki su muhtevalarında ise zemin düşük plastisite gösterecek ve istenilen düşüklükte geçirimsizlik özelliğinin sağlanması için daha yüksek kompaksiyon enerjileri gerektirecektir.



Şekil 4.7 : Su içeriğine bağlı olarak hidrolik iletkenliğin değişimi (Benson ve diğ, 1992).



Şekil 4.8 : Kil tabakasının serilmesi (<http://www.cevkainsaat.com>).

Atık depolama sahalarından çevreye zararlı madde yayılımını engellemek amacı ile sıkıştırılmış kum-bentonit karışımlarının kullanımı yaygındır. Bu malzemeden imal edilen bariyerler yüksek dayanım, düşük sıkıştırılabilirlik ve çok düşük geçirimsizlik

özelliklerine sahiptir. Karışımlardaki kum stabiliteyi sağlamak amacı ile, bentonit ise kum daneleri arasındaki boşlukları doldurma amacı ile kullanılmaktadır (Velosa ve Colmenares, 2006).

Malzemenin hazırlanması esnasında uygun su içeriğinin sağlanması önemlidir. Dolgu malzemesinde çok iri daneler varsa, dolguda yer almaları engellenmeli ve eğer topaklanmalar mevcutsa giderilmelidir. Zemin homojen hale getirildikten sonra, gerekiyorsa bentonit ilavesi yapılarak dolguya hazır hale getirilmelidir.

Kademe kademe yerleştirilip sıkıştırılması gereken dolgu malzemesi öncelikle yeterli kalınlıkta gevşek olarak serilmelidir. Tabaka kalınlığı uygun olarak ayarlanmadığı takdirde sıkıştırma enerjisi alt kademelerde etkili olmayacaktır. Sıkıştırma koşulları, geçirimsizlik üzerinde önemli bir etki oluşturmaktadır. Bu sebeple yöntem ve araç uygun şekilde seçilmelidir. Her tabaka serim için işlemler aynı titizlikle tekrarlanmalıdır.

Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından hazırlanan “Düzenli Depolama ve Tıbbi Atık Bertaraf Tesisleri İşletme ve Kontrol Kılavuzları”nda (2010), evsel atıklar için 60 cm olarak belirlenen kil tabakasının 15-20 cm kalınlığında 3-4 tabaka halinde, paletli açık kepçe ile serimi tavsiye edilmektedir.

Sıkıştırılan tabakanın iklimsel değişikliklere bağlı olarak zarar görmemesi sağlanmalıdır. Donma veya kurumaya karşı önlemler alınması gerekmektedir. İklimle bağlı olarak su ile etkileşime girecek olan zeminlerde şişme ve büzülme davranışları önem arz etmektedir. Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde çeşitli kimyasal katkıları, ön ıslatma, sıkıştırma kontrolü ve sürsaj yükleme gibi yöntemler uygulanabilir. Kimyasal katkılardan sönmüş kireç, sıklıkla kullanılmaktadır. Kireç ile stabilizasyonda katyon değişim kapasitesi (KDK), flokulasyon – aglomerasyon, karbonatlaşma ve puzolanik reaksiyonlar ortaya çıkar. Kireç, temel olarak zeminde plastisitenin azalmasına yol açar. Ancak sülfatlar ve bazı demir bileşiklerinin varlığı ile kireç reaksiyonu engellenmiş olur (Demir ve Kılıç, 2010).

Bariyer sisteminin üst yüzeyi, üstünde yer alacak geomembran veya diğer örtü sistemi için temel teşkil edecek şekilde sıkıştırılmalıdır. Geotekstil malzeme ve serim aşamasından bir kare Şekil 4.9’ da görülmektedir. Katı Atık Yönetmeliği’nce (1991), “İçme ve kullanma suyu havzalarının uzun mesafeli koruma alanında inşa edilecek düzenli depo sahası tabanında, sıkıştırılmış kalınlığı 60 cm olan kil tabakasının

üzerine, kalınlığı 2 mm olan yüksek yoğunluklu polietilen folye (HDPE) serilir. Serilecek folyenin yoğunluğu 941-965 kg/m³ arasında olmak zorundadır.”(Madde 26/2).



Şekil 4.9 : Geotekstil serimi (<http://www.cevkainsaat.com>).

4.3.2 Drenaj tabakası oluşturulması

Depolama tesisinde atıklardan sızan suların kontrolü amacıyla drenaj sistemi kurulmaktadır. Drenaj, alan drenajı veya boru drenajı ile sağlanmakta olup, alan drenajı ile drenaj tabakasının altında yer alan sızdırmazlık tabakasının korunması sağlanır. Boru drenaj sistemi ise tek başına yüksek yağış aldığı takdirde verimli olamayacağından tek başına yeterli değildir. En sağlıklı drenaj ise, alan drenajı ile boru drenajının birlikte uygulandığı birleşik drenaj sistemi ile sağlanmaktadır. Drenaj sisteminin oluşturulması amacı ile çakıl malzeme serimi Şekil 4.10’ da görülmektedir.

Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından hazırlanan “Düzenli Depolama ve Tıbbi Atık Bertaraf Tesisleri İşletme ve Kontrol Kılavuzları”nda (2010) belirtildiği üzere, drenaj sisteminde kullanılacak çakılların temiz ve köşesiz, yuvarlak yapıda olmaları önemlidir. Sistem tabanının dikey eğimi minimum % 2, yanal eğimi ise minimum % 1 olarak belirlenmiştir. En fazla 150 mm çapındaki borular ile paralel toplama hatları oluşturularak minimum 30 cm drenaj tabakası kalınlığı sağlanmalıdır. Drenaj tabakası üzerinde yer alacak atık tabakasının kalınlığı minimum 2 m olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.10 : Drenaj için çakıl tabaka oluşturulması (<http://www.cevkainsaat.com>).

Dren boruları çevresine minimum 30 cm yüksekliğinde kum ve çakıl filtre malzemesi yerleştirilmelidir. Dren boruları, doğrusal bir şekilde depo sahası dışına çıkarılarak bu şekilde sızıntı sularının toplanması sağlanmaktadır.

Düzenli Depolama ve Tıbbi Atık Bertaraf Tesisleri İşletme ve Kontrol Kılavuzları'nda boru seçiminde istenilen kriterler aşağıdaki şekilde belirtilmiştir.

- Saha içersinde kalan kısımlar 1/3 dolu, 2/3 delikli kesite sahip olmalıdır.
- Borular iç basınca değil dış basınca dayanıklı olmalıdır.
- Boru et kalınlığına dikkat edilmelidir.

Bu aşama tamamlandıktan sonra düzenli depolama tesisi işletmeye açık hale getirilmektedir. Atıkların yerleştirilmesine hazır haldeki sahanın görüntüsüne dair bir örnek, Şekil 4.11' de verilmiştir. Atıklar düzenli olarak serildikten sonra örtme işlemleri tamamlanacak ve arazi park, spor alanı gibi çeşitli faaliyet olanakları sağlarken yeniden kullanılabilir duruma getirilecektir (Şekil 4.13).



Şekil 4.11 : Çöp dökümüne hazır duruma getirilmiş saha
(<http://www.cevkainsaat.com>).

4.3.3 Atıkların serilmesi

Saha, serim için hazırlandıktan sonra çöplerin gelişigüzel boşaltılmaması önem arz etmektedir. Kademe kademe düzenli bir biçimde yerleştirildikten sonra her kademe sıkıştırılarak ve üzeri ara tabaka ile örtülerek sistem devam ettirilmelidir. Sahaya giren atıkların niteliği de en az depolanma şekilleri kadar önemli olup, depolanması yasak olan atıklar Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'nde (1991) aşağıdaki gibi belirtilmiştir (Madde 22) :

- Sıvıların ve sıvı atıkların,
- Akıcılığı kayboluncaya kadar suyu alınmamış arıtma çamurlarının,
- Patlayıcı maddelerin,
- Hastane ve klinik atıklarının,
- Hayvan kadavralarının,
- Depolama esnasında aşırı toz, gürültü, kirlenme ve kokuya sebep olabilecek atıkların,
- Radyoaktif madde ve atıkların,
- Tehlikeli atık sınıfına giren katı atıkların,
- Ambalaj atıklarının, depolanması yasaktır.

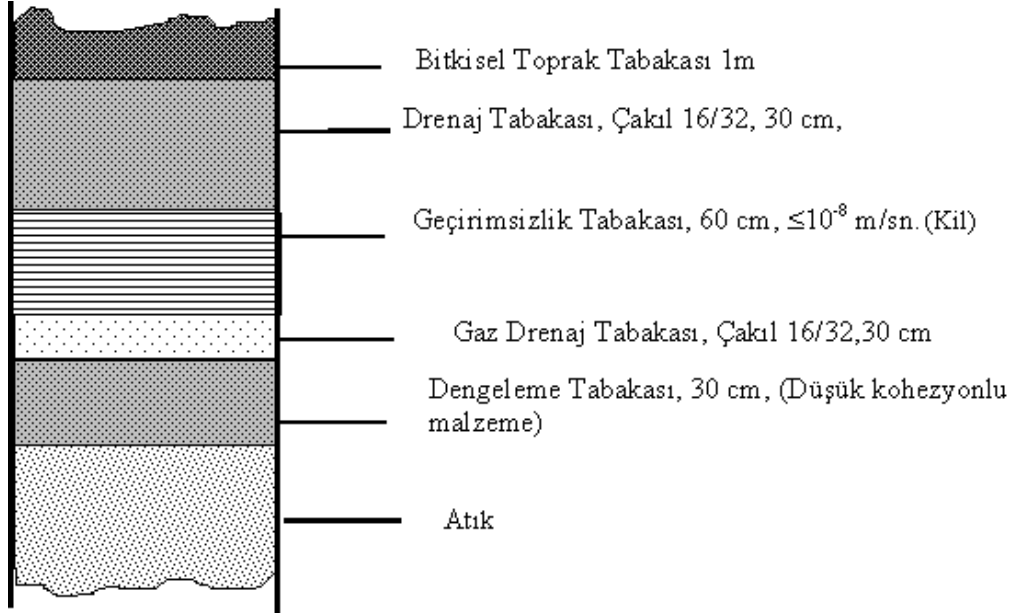
Atıklar ilk olarak gevşek durumda en fazla 50 cm kalınlık oluşturacak şekilde, sıkıştırılmasına imkan bırakacak şekilde dağıtılmalıdır. Döküm yapılırken nihai çöp eğiminin yaklaşık % 3 civarında olması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır. Sıkıştırıldıktan sonra yaklaşık 5 m kalınlığa ulaşan atık tabakası, sıkıştırılarak örtü malzemesinin serimi için hazırlanır.

Tamamlanan bölmeler üzerinde sinek yumurtaları gibi hastalık taşıyıcı unsurları engellemek, açıkta çöp kalmamasını sağlamak, güneşe maruz bırakılan çöplerin yanma olasılığını ortadan kaldırmak ve kokuları azaltmak amacı ile günlük örtü tabakaları oluşturulmalıdır.

4.3.4 Örtü teşkili

Atık depolama tesislerinde serim tamamlandıktan sonra yüzeyin çevre ile etkileşiminin kesilmesi ve yağmur sularından etkilenmemesi amacı ile sızdırmazlık

sağlanacak şekilde örtülmektedir. Atıkların üzerinde yer alması gereken tabakaların genel bir kesiti Şekil 4.12’ de görülmektedir. Herhangi bir çöp suyu sızıntısına maruz kalmayacağından dolayı örtü teşkilinde kullanılacak malzemenin kimyasal direnci taban şiltesine nazaran düşük olmaktadır. Ancak erozyon ve benzeri bir çok diğer dış etkene bağlı meydana gelebilecek sorunlar göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.12 : Düzenli depolama örtü kesiti (<http://eski.yerelnet.org.tr>).



Şekil 4.13 : Düzenli depolama yapılmış alanlar (www.mozturk.net).

Tehlike oluşturabilecek gaz birikimini engellemek amacı ile drenaj sistemi inşa edilmesi gerekmektedir. Örtü sistemlerin teşkilinde, yağışın atıkların içerisine sızmasını önlemek, atıkların çevre ile etkileşimini engellemek ve uzun vadede güzel görüntü sağlamak esastır.

5. KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

Zeminlerin karmaşık yapıları nedeni ile davranışlarını belirlemek geoteknik mühendisliğinde ve çalışma ile ilgili olarak düzenli depolama tesislerinin uygun şekilde inşa edilmesi açısından önem arz etmektedir. Katı, sıvı ve gaz olmak üzere 3 fazı birlikte içeren zeminlerde, özellikleri yalnızca zemin daneleri belirlememekte, içeriğindeki su ve sıkıştırılma özellikleri gibi birtakım dış etkenler de önemli rol oynamaktadır. Bu etkileri araştırmak ve malzeme özelliklerini belirlemek amacı ile çalışma dahilinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Kullanılan bentonit, kum ve yüksek fırın cürufuna ait fiziksel özellikler belirlenmiş, ardından uygun oranlar belirlenerek mekanik özellikler incelenmiştir. Kullanılan malzemelerin özelliklerine, yapılan çalışmalar ve deney prosedürlerine bu bölümde yer verilmiştir.

5.1 Kullanılan Malzemeler

5.1.1 Bentonit

Bentonit, alüminyum ve magnezyumca zengin volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal ayrışması ve bozunmasıyla oluşmuş, başta montmorillonit olmak üzere çok küçük kristal yapıdaki kil minerallerinden oluşmuş, yumuşak, gözenekli ve şekil verilmesi kolay açık renkli malzeme olarak tanımlanır.

Bentonit, A.B.D. Wyoming eyaletinde suyla karıştırıldığında sabunsu bir hal alması nedeniyle bölgede sabun kili olarak anılmaya başlanmıştır. Bölgedeki bentonit yataklarını işleten William Taylor' a bağlı olarak sonraları taylorit olarak anılan malzeme, tayloritin potasyum amonyum sülfat için de kullanılması sebebiyle daha sonra bölgedeki Ford Benton yakınlarında bulunması nedeniyle "bentonit" olarak anılmaya başlanmıştır. Bentonitler, genel olarak sodyum bentonit ve kalsiyum bentonit olmak üzere iki grupta incelenmektedirler.

Doğal halde oldukça yumuşak ve suda kendiliğinden dağılan bir yapıya sahiptir. Çok küçük dane boyutu ve buna bağlı yüzey alanının fazla olmasına bağlı olarak su tutma kapasitesi fazladır. Su ile karıştırıldığında yüksek yapışkanlık özelliği kazanan

bentonit, bu özelliği nedeniyle sondaj çamuru olarak kullanılmaktadır. Negatif bir kolloit olan bentonitin parçacıklarının %80 kadarı 1 mikrondan daha küçüktürler (Hekimoğlu, 1996).

Yapısal özellikleri, bentonitin bir çok endüstriyel kullanım alanında yer almasına neden olmuştur. Geçirimsizlik özellikleri nedeniyle atık depolarında geçirimsiz tabaka oluşturulmasında, bir çok inşaat alanında, sondajlarda ve ilaç, boya, gıda gibi çeşitli sanayilerde bentonit kullanımı yaygındır. Çalışmada kullanılan bentonitin ham ve ezilmiş haldeki görünüşleri Şekil 5.1’ de görülmektedir.

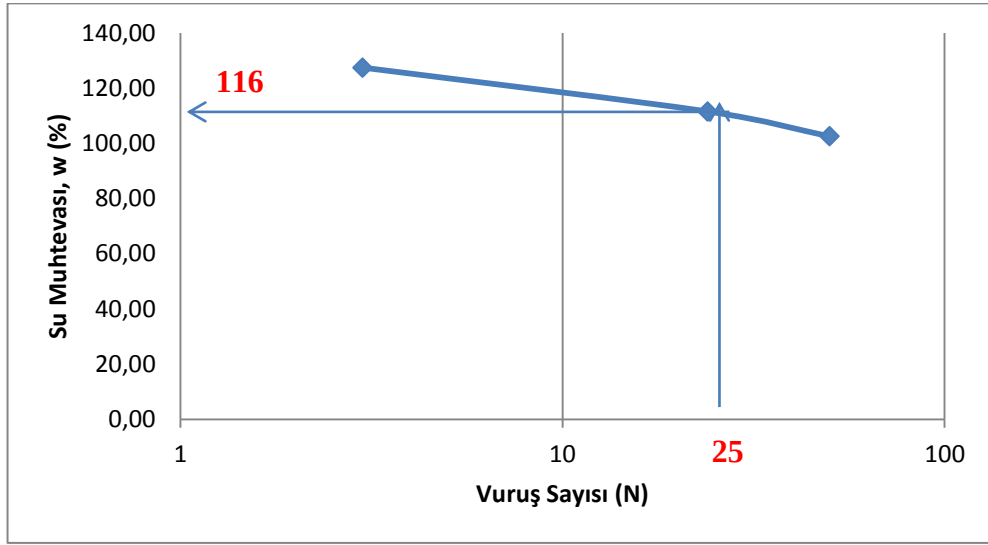


Şekil 5.1 : Kullanılan bentonit numuneleri.

Çalışmada kullanılan bentonit, gerekli özellikleri belirlenerek ASTM sistemine göre CH olarak sınıflandırılmıştır. Casagrande yöntemi ile likit limit değeri % 116 olarak belirlenmiş ve deney sonucu Şekil 5.2’ de verilmiştir. Çalışma kapsamında belirlenen özellikler Çizelge 5.1’ de görülmektedir.

Çizelge 5.1 : Bentonitin özellikleri

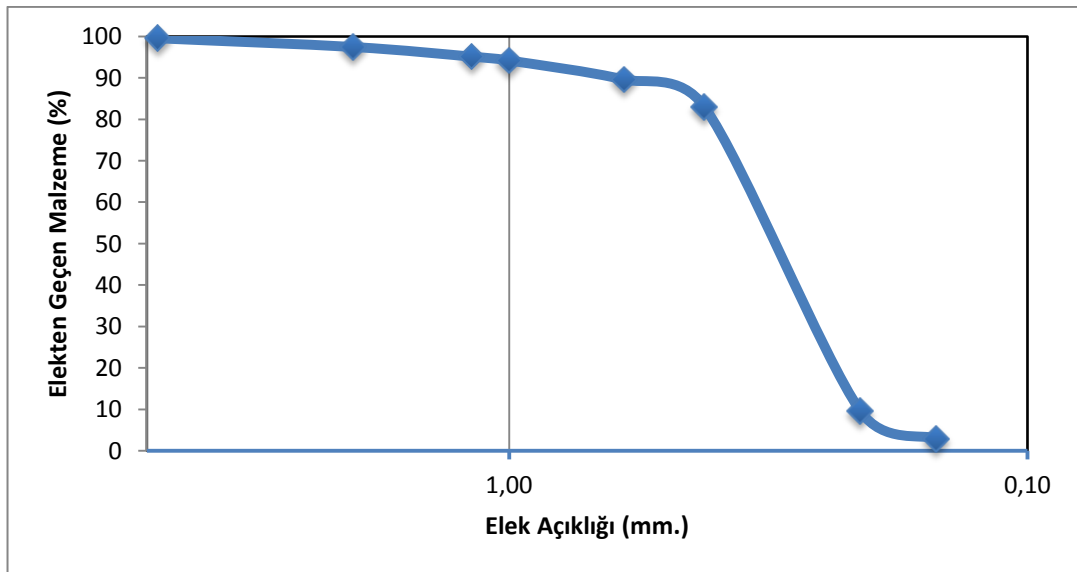
Özellik	Değer
Likit Limit (%)	116
Plastik Limit (%)	58
Kıvam İndisi	1,8
#200 elek altı (%)	90
Özgül ağırlık	2.57
Optimum su muhtevası (%)	42
Maksimum kuru b.h.a (kN/m ³)	14.6
Sınıfı	CH



Şekil 5.2 : Casagrande yöntemi ile likit limit tayini.

5.1.2 Kum

Düzenli depolama sahalarında yaygın olarak kum-bentonit karışımlarının geçirimsiz tabaka olarak uygulanması göz önünde bulundurularak, çalışmalarda doğal zemin malzemesini temsilen kum numunesi kullanılmıştır. Tek başına herhangi bir uygulamaya tabi tutulmayan kum numunesinin türü, ASTM zemin sınıflama sistemine göre “iyi derecelenmiş kum” (SW) olarak belirlenmiştir. Dane boyu dağılımı Şekil. 5.3’ de görülmekte olmakla birlikte, karışımlarda üniformluk sağlanması amacı ile sadece 40 nolu elek altında kalan malzeme kullanılmıştır.



Şekil 5.3 : Kum numunesine ait dane çapı dağılımı.

5.1.3 Kireç

Düzenli depolama tesislerinde kullanılmak üzere kum ve bentonit karışımlarında kireç ile stabilizasyon hali hazırda oldukça yaygındır. Ayrıca önceki çalışmalarda tek başına yüksek fırın cürufu katkısının bentonit üzerinde herhangi bir olumlu etkisi görülmemiş olması dolayısı ile, yine önceki çalışmalar göz önünde bulundurularak bağlayıcı malzeme olarak da kireç kullanılmasının uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Çalışmada ticari paket kireç kullanılmış olup ayrıca herhangi bir teste tabi tutulmamıştır.

Akcanca (2009), düşük taşıma gücü ve yüksek sıkışabilirliğe sahip killerin stabilizasyonu için katkı maddesi olarak kireç kullanılmasının, kirecin kil içerisindeki silikatlar ve alüminatlarla reaksiyona girmesine bağlı olarak kayma direncini ve geçirimsizliği zamanla artırdığını, sıkışabilirliği ise azalttığını belirtmiştir. Bu değişiklikler sayesinde toplam ve farklı oturmalar azalmakta konsolidasyon hızı artmaktadır.

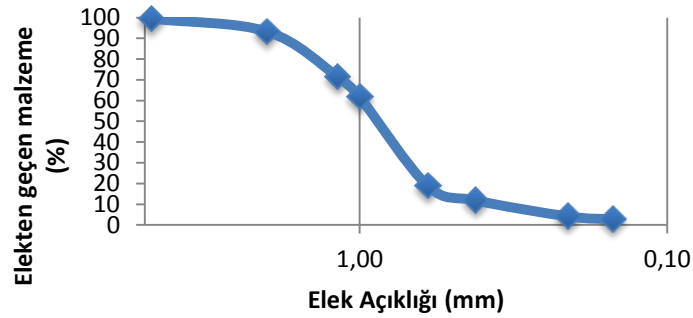
Kireç katkısı ile gerçekleşen zeminlerde çimentolaşma meydana gelebilmektedir. Kirecin içerisindeki kalsiyum katyonları, zemin içerisinde mevcut alüminyum ve silikat mineralleri ile reaksiyona girerek alüminat ve kalsiyum silikat oluşturmaları çimentolaşma olarak adlandırılmıştır (Yıldız, 1998). Kirecin havadan karbondioksit emme kapasitesi de kireç katkılı zeminler üzerinde etkili olmaktadır. Kireç ile atmosferik karbondioksitin tepkimeye girmesi sonucunda kalsiyum karbonat oluşumu karbonatlaşma olarak adlandırılmaktadır. Kireç katkılı zeminlerde kalsiyum karbonat oluşumu çimentolaşma olayını etkilediği gibi puzolanik reaksiyona da engel olur. Karbonatlaşma tepkimelerinin kireçle stabilize edilen zeminin uzun süreli mukavemeti ve dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkileri olmaktadır. (Yıldız, 1998).

5.1.4 Yüksek fırın cürufu (YFC)

Yüksek fırın cürufu, çelik üretimi esnasında, 1 ton çelik üretiminde yaklaşık 300 kg olarak ortaya çıkan atık malzemedir. Atık malzeme olarak nitelendirilen YFC'nin düzenli depolama tesislerinde katkı malzemesi olarak kullanılmasının büyük avantaj sağlayacak olması nedeni ile bu malzeme ile iyileştirmenin uygun olup olmayacağı araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu, Ereğli Demir Çelik Fabrikası'ndan temin edilmiştir. 2003 istatistiklerine göre fabrikada yılda yaklaşık

600.000 ton cüruf meydana gelmektedir. Çelik üretiminde atık olarak ortaya çıkan cüruf, mukavemet artırıcı özelliği nedeni ile beton ve zemin iyileştirmede değerlendirilmektedir. Ancak büyük oranlarda elde edilmekte olup kullanım oranı, üretim miktarına nazaran oldukça düşüktür.

Çalışmada kullanılan YFC çok çeşitli boyutlarda dane içeriğine sahiptir. Kum numunesi ile benzer şekilde kullanılacağı karışımlarda üniformluğu sağlaması amacı ile çalışmalarda 40 nolu elekten geçen malzeme tercih edilmiştir. 500 g numune ile yapılan dane boyu dağılımı Şekil 5.4’ te görülmektedir.



Şekil 5.4 : Yüksek fırın cürufuna ait dane çapı dağılımı.

5.2 Karışımlar ve Oranları

Düşük geçirimsizlik özelliği nedeni ile killi, düzenli depolama tesislerinde geçirimsiz tabaka teşkilinde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Tek başına kullanımı son yıllarda azalmış, doğal veya yapay birtakım malzemeler ile karıştırılarak uygulanması yaygınlaşmış durumdadır. Kil tabakaları, geosentetik kil tabakası şeklinde yapay malzemeler ile veya doğal zemin ile karıştırılarak hazırlanabilmektedir. Doğal malzeme olarak kum-bentonit karışımlarının özellikleri, bir çok çalışmada incelenmiştir.

Çalışmada, düzenli depolama tesislerinde kullanımı yaygın olan kum ve bentonit karışımlarının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda temini kolay ve hatta endüstriyel atık olarak sınıflandırılabilir katkı malzemeleri seçilerek aynı zamanda atık yönetimine fayda sağlanması planlanmıştır. Bu nedenle katkı malzemesi olarak kireç ve yüksek fırın cürufu seçilmiştir. Demir-çelik üretiminde, üretim miktarının yaklaşık % 30 u oranında meydana gelen YFC, mukavemet artırıcı özelliği nedeniyle beton ve çimento ürünlerinde katkı maddesi olarak kullanılmakta

ancak kullanım miktarı, üretim miktarına nazaran oldukça düşük kalmaktadır. Çalışmada hazır ticari kireç kullanılmış olmakla birlikte kireç, endüstriyel atık olarak da ortaya çıkabilmektedir. Khattab ve diğ. (2006), kireç ile endüstriyel atık olarak ortaya çıkan kirecin zemin üzerindeki etkilerini araştırmış ve endüstriyel atık olarak ortaya çıkan kirecin kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır. Bu nedenle söz konusu malzemelerin kullanımı atıkların kullanım alanı kazanmasını sağlamış olacaktır. Hazırlanan karışımlar Çizelge 5.2’ de özetlenmiştir.

Çalışmada kum-bentonit karışımlarının kireç ve YFC ile iyileştirilmesi araştırılmak üzere çeşitli karışımlar üzerinde laboratuvar da kompaksiyon, konsolidasyon ve serbest basınç deneyleri yapılarak düzenli depolama tesislerinde geçirimsiz tabakalarda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Uygun oranları sağlayabilmek amacı ile karışımlar her çeşit içerik için kademeli olarak hazırlanmıştır. Öncelikle uygun bentonit oranının belirlenmesi amacı ile % 40, % 50 ve % 60 bentonit içerikli kum-bentonit karışımları hazırlanmıştır. 3 farklı oranda hazırlanan kum-bentonit karışımları üzerinde yapılan geçirimsizlik incelemesi sonucunda % 50 ve üzerinde bentonit içeriğine sahip karışımların % 100 bentonit geçirimsizlik değerine eşdeğer veya daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle ve ağırlıklı olarak % 20 ila % 50 oranında tavsiye edildiği göz önünde bulundurularak, karışımlarda kullanılacak bentonite oranının % 50 olmasına karar verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Karışımlar ve oranları.

Bentonit (%)	Kireç (%)	YFC (%)	Kum-Bentonit Karışımları	Kireç Katkılı Kum-Bentonit Karışımları	Kireç+YFC Katkılı Kum-Bentonit Karışımları
60	0	0	BES40		
50	0	0	BES50		
40	0	0	BES60		
50	2	0		BESL2	
50	4	0		BESL4	
50	6	0		BESL6	
50	6	1			BEFS1
50	6	2			BEFS2
50	6	3			BEFS3

Önceki çalışmalarda Al-Rawi ve Awad (1981), kumlu silt ve kum numunelerine kireç ilave ederek geçirimsizlik değişimini gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda kireç katkısı kumlu silt üzerinde hidrolik iletkenliğin artmasına neden olurken, optimum su muhtevsından yüksek su içeriğine sahip kum numuneleri üzerinde geçirimsizliğin büyük oranda azaldığını ortaya koymuşlardır. Benzer sonuçlar Haug ve Wong (1992) tarafından da elde edilmiştir. Kum-bentonit karışımları üzerinde kireç etkisi incelenmiş, optimum su muhtevsında sıkıştırılan numunelerin geçirimsizlik değerlerinde artış gözlenirken yaklaşık % 1-2 oranında daha fazla su içerikli numunelerin geçirimsizlik değerlerinin ciddi oranda azaldığını belirtmişlerdir.

Zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi ile ilgili çeşitli çalışmalarda en verimli kireç oranı ağırlıklı olarak % 2 ila % 6 aralığında olarak belirlenmiştir. Galvao ve diğ. (2006), ağırlıkça % 2 den daha düşük oranda kireç katkısının, kirecin topaklanmasına bağlı olarak hidrolik iletkenliğin artmasına neden olduğunu, daha yüksek oranda kireç katkısının ise geçirimsizliği azalttığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde Kumar ve diğ. (2007), uygun kireç yüzdesini 2 ila 8 aralığında belirlemişlerdir. Khattab ve diğ. (2007), kireç katkılı zeminlerde en etkili sonuçları % 4 ün üzerinde kireç miktarında elde etmişlerdir. Abdelmadjid ve Muzahim (2008), optimum kireç yüzdesini % 6 olarak belirlenmişlerdir. Önceki çalışmaların ışığında % 50 bentonit içeren kum-bentonit karışımlarına % 2, % 4 ve % 6 kireç ilavesi yapılarak deneyler tekrarlanmıştır. Sonuçlar arasında büyük farklılıklar gözlenmemiş, yakın olarak nitelendirilebilecek değerler elde edilmiştir. YFC ilavesi için sabit % 50 bentonit ve % 6 kireç miktarı belirlenmiş ve karışımlara ağırlıkça % 1, % 2 ve % 3 oranında YFC ilave edilerek aynı deneyler tekrarlanmıştır. Deney sonuçlarına altıncı bölümde yer verilmiştir.

5.3 Yapılan Çalışmalar

Zemin davranışını belirleyen deneylerin yanı sıra kullanılan malzemelerin endeks özellikleri araştırılmış, kum ve bentonitin zemin sınıfı belirlenmiştir. Bentonit ile karıştırılan kum ve yüksek fırın cürufunun yine dane boyu dağılımları belirlenmiş ancak karışımlarda üniformluk sağlanması açısından malzemeler 40 nolu elekten elenerek, eleğin altında kalan boyutta malzeme tercih edilmiştir. Karışımların özgül ağırlıkları piknometre deneyi vasıtası ile hesaplanmıştır. Yapılan işlemlerin kısa açıklamaları aşağıdaki şekildedir.

İri daneli zeminlerin dane çapı dağılımının belirlenmesinde elek analizi yöntemi uygulanır. Etüvde kurutulan numune kuru olarak tartıldıktan sonra 200 nolu elekten yıkanarak elenir. ASTM tarafından açıklıkları belirlenen standart elekler kullanılır. Elekten geçen malzeme ayrı bir kaba alınarak, hidrometre analizi için kurutulmak üzere bekletilir. Elek üzerinde kalan malzeme yeniden kurutularak tartıldıktan sonra belirli açıklıklardaki eleklerden sıra ile elenir. İri daneli malzemelerin sınıflandırılmasında elek analizi gereklidir.

Hidrometre analizi yapmak için 200 nolu elekten geçen malzeme kurutulduktan sonra ayrıştırıcı (sodium hexa-metafosfat) içerisinde bekletilir. Malzeme, analiz için çökeltme kabına konur ve su eklenerek karıştırılır. 1000 ml. seviyesine kadar su eklendikten sonra su ve malzeme uniform olarak karıştırılır. Hidrometre yavaşça bırakılarak, 15 saniye, 30 saniye, 1 dakika ve 2 dakika okumaları alınır. Bu okumalardan sonra hidrometre, malzemelerden arındırılmak amacı ile suya bırakılır. Sonraki 4, 8, 15, 30 dakika, 1, 2, 4, 8 ve 24 saat okumaları için işlem tekrarlanır. İnce daneli zeminlerin kil ve silt yüzdeleri hidrometre analizi ile belirlenmektedir.

Likit limit deneyi, en az 24 saat fırında bekletilerek kurutulmuş numune ezilip öğütülerek 40 nolu elekten elendikten sonra yapılır ve bir kısım numune bir kaba alınarak su eklenir ve üniform hale gelinceye kadar karıştırılır. Numune Casagrande aletine 1 cm derinlik oluşturacak şekilde düzgünce sıvanarak ortasına derin bir çentik atılarak, saniyede 2 defa olmak üzere Casagrande aleti sürekli olarak düşürülür. Yaklaşık 1,5 cm kapanma için yapılan vuruş sayısı belirlenerek, deney farklı su muhtevalarında bir kaç defa tekrarlanır. Her tekrardan sonra bir miktar numune su muhtevasının belirlenmesi için ayrılır. Sonuçlar grafikte gösterilerek, 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası belirlenir ve bu değer likit limit değerini verir.

Plastik limit deneyinde numune yaklaşık 24 saat açıkta bırakılarak hava ile bir miktar kuruması sağlanır. Daha sonra bir kaba alınarak, plastik kıvama gelinceye kadar su eklenir ve üniform şekilde karıştırılır. Bir miktar ele alınarak, cam yüzey üzerinde el ile yuvarlanır. Numuneler 3 mm çapına gelip çatlaklar oluşmaya başlayana kadar işleme devam edilir. 3 mm çapında çatlaklar oluşturmaya başlayan numuneler alınarak, su muhtevaları belirlenir. Sonuç, plastik limit değerini vermektedir.

Özgül ağırlık ölçümü için kullanılacak cam kap (piknometre), içi tamamen saf su ile doldurularak tartılır. Boşaltılan kabın içerisine 50 g numune konarak bir miktar su

eklenir ve içerisindeki hava vakumlanır. Kabın tamamına su eklenerek danelerin çökmesi tamamlandıktan sonra yeniden içeride kalan hava vakumlanır. Kap, dane ve su ağırlığı tartılır. Yapılan çalışmalara ait özgül ağırlık deney düzeneği Şekil 5.5’te yer almaktadır.



Şekil 5.5 : Piknometre ve vakum düzeneği.

Gerekli özellikler belirlendikten sonra her numunenin sıkışma özelliklerini belirlemek ve konsolidasyon ve serbest basınç deneyleri için uygun numune hazırlamak amacı ile numuneler standart proktor (kompaksiyon) deneyine tabi tutularak muhtevası – kuru birim hacim ağırlığı eğrileri (kompaksiyon eğrileri) elde edilmiştir. Optimum su muhtevasının yaklaşık % 2 üzerinde su içeren ve proktor sıkılığında hazırlanan numuneler serbest basınç deneyine ve ödometre aletinde konsolidasyon deneylerine tabi tutulmuştur.

Bentonit, kum ve diğer katkı malzemeleri ile karıştırılarak, % 100 bentonit dahil toplam 10 adet karışım hazırlanmıştır. Çalışmalar öncesinde bentonit numunesi üzerinde serbest şişme deneyi yapılmış ancak bentonit göz ardı edilebilecek kadar düşük miktarda şişme göstermiştir. Bu nedenle diğer karışımların şişme özellikleri incelenmemiştir. Karışımlar, uygun oranları sağlayabilmek amacı ile her içerik için kademeli olarak hazırlanmıştır. Öncelikle uygun bentonit oranının belirlenmesi amacı ile % 40, % 50 ve % 60 bentonit içerikli kum ve bentonit karışımları hazırlanarak karışımlar üzerinde standart proktor, konsolidasyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. % 100 bentonit haricinde diğer karışımların optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde büyük ölçüde değişiklikler gözlenmemiştir.

İkinci aşamada % 50 bentonit içeren kum ve bentonit karışımlarına ağırlıkça % 2, % 4 ve % 6 kireç ilavesi yapılarak deneyler tekrarlanmıştır. Üçüncü aşamada ise YFC ilavesi için sabit % 50 bentonit ve % 6 kireç miktarı belirlenmiş ve karışımlara ağırlıkça % 1, % 2 ve % 3 oranında YFC ilave edilerek aynı deneyler tekrarlanmıştır.

5.4 Karışımların Özelliklerinin Belirlenmesi

5.4.1 Kompaksiyon

Zeminlerin sıkışma özellikleri laboratuvar ortamında standart proktor deneyi yardımı ile belirlenmektedir. Deneye başlamadan önce kullanılacak kalıbın hacmi ve ağırlığı belirlenir. Yaklaşık 3-4 kg kuru numune alınarak bir miktar su ile karıştırılır. Bir miktar malzeme, proktor kalıbına 3 eşit tabakada serilmek üzere yerleştirilerek, standart proktor tokmağı ile 25 vuruş yapılır. Diğer 2 tabaka için de aynı işlem tekrarlanır. Kap üzerinde kalan fazla malzeme traşlanarak kalıp ve numune ağırlığı tartılır ve su muhtevasını belirlemek amacı ile 2 numune alınır. Su muhtevası artırılarak deney 4-5 kere tekrarlanır.

Gerekli geçirimsizliğin sağlanması amacı ile zeminlerin uygun şekilde sıkıştırılması önem arz etmektedir. Bir zeminin belirli bir hacim içerisinde farklı su muhtevalarında sıkıştırılarak ağırlıklarının belirlenmesi sonucunda birim hacim ve kuru birim hacim ağırlıkları belirlenerek, kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası değerleri üzerinde kompaksiyon eğrileri oluşturulur. Birim hacim ağırlıkları belirlenen (γ_k) numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarına, aşağıdaki bağıntı ile ulaşılabilir.

$$\gamma_k = \gamma_n / (1 + w) \quad (5.1)$$

Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, optimum su muhtevası olarak adlandırılan su muhtevasına tekabül eden kuru birim hacim ağırlık değerinde oluşmaktadır. Eğer zemin içerisinde hava boşluğu yoksa, % 100 doygunluk eğrisi oluşur. Doygunluk eğrisi oluşturulmak istenirse, aşağıdaki formül kullanılır.

$$\gamma_k = \gamma_w / [(w + (1/G_s))] \quad (5.2)$$

Burada G_s , özgül ağırlığı temsil etmektedir.

Kompaksiyon karakteristiklerini belirlemek üzere laboratuarda uygulanabilecek standart ve modifiye proktor yöntemleri mevcuttur. Uygulanan yükün ağırlığı, yüksekliği, düşüş sayısı ve kompaksiyon enerjileri Çizelge 5.3' te gösterilmiştir.

Proktor testi ilk olarak yol ve havaalanlarında yer alan zeminlerin kompaksiyon özelliklerini belirlemek amacı ile geliştirilmiştir. 1920 ve 1930' larda arazide uygulanan sıkıştırma işlemi sonrasında ortaya çıkan birim ağırlıkların laboratuvar deneyleri ile neredeyse aynı sonuçları verdikleri belirtilmiş olmakla birlikte, gelişen sıkıştırma teknolojileri neticesinde arazide elde edilen kuru birim hacim ağırlık değerlerinin laboratuvar deneylerine göre yüksek olduğu durumlar ortaya çıkabilmektedir. Günümüzde proktor testleri kompaksiyon enerjileri değiştirilerek modifiye edilmiş olarak iki şekilde yapılmaktadır.

-Standart Kompaksiyon (ASTM D-698)

-Modifiye Kompaksiyon (ASTM D-1557)

Çizelge 5.3 : Kompaksiyon tür ve enerjileri (Daniel ve Koerner, 2007).

Kompaksiyon Türü	Tabaka Sayı	Ağırlık	Düşüş Yüksekliği	Kompaksiyon Enerjisi
Standart	3	24.5N	305 mm	594 kN-m/m ³
Modifiye	5	44.5N	457 mm	2693 kN-m/m ³

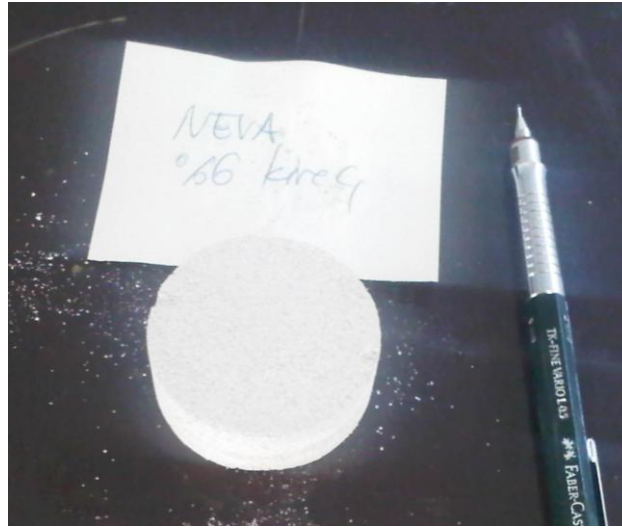
Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar arazide uygun kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevasının kontrolünde referans noktası niteliğindedirler. Yine de laboratuvar şartlarının arazi şartlarını % 100 temsil etmesi olanaksız olup, daha pratik ve doğru sonuç veren arazi deneyleri ile de kompaksiyon eğrileri oluşturulabilmektedir.

5.4.2 Konsolidasyon

Konsolidasyon deneyinde zeminlerin kademeli eksenel yük altında zemin drenajına imkan tanınarak oturma hızı ve miktarı belirlenmektedir. Geçirimlilik sonuçları, permeabilite deneyine alternatif olarak konsolidasyon ile de belirlenebilmektedir. Yapılan çalışmada, numunelerin oturma ve geçirimlilik değerlerini elde etmek amacı ile numuneler konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur.

Deneyde ödometre aleti kullanılmaktadır. Proktor sıkılığında ve tercihen optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler, ring içerisine alınarak, alt ve üst kısmında

drenaja olanak veren poroz taşlar yer alacak şekilde ödometre aletine yerleştirilir. Deformasyon ölçer sıfırlanarak, her birinde oturmaların tamamlanması beklenecek şekilde yük koluna sıra ile 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa ve 800 kPa kademeli olarak yüklenir. Standart olarak 24 saatte oturmaların tamamlanması beklenmesi dolayısı ile numune her yük kademesine 24 saat tabi tutularak, belirli aralıklarda deformasyon okumaları alınır. Maksimum yük kademesinde oturmalar tamamlandıktan sonra yük kaldırma aşamalarına geçilerek, yine oturmaların tamamlanması beklenecek şekilde yükler kademeli olarak kaldırılır ve belirli aralıklarda deformasyon okumaları alınır. Deney tamamlandıktan sonra numune çıkarılarak deney sonu su muhtevası hesaplanır. Çalışmalar dahilinde konsolidasyon sonrası kurutulmuş numune, Şekil 5.8’ de görülmektedir.



Şekil 5.6 : Konsolidasyon deneyi sonrası etüvde kurutulmuş numune.

Her yük kademesi sonunda meydana gelen deformasyonlar belirlenerek zemin boşluk oranı değişimi hesaplanır.

$$e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_s} \quad (5.3)$$

$$e = \frac{H - H_s}{H_s} \quad (5.4)$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (5.5)$$

Sonuçlar elde edildikten sonra düşey deformasyon-zaman grafikleri her yük kademesi için oluşturularak Taylor ($\sqrt{t}$) ve/veya Casagrande (logt) yöntemleri ile konsolidasyon katsayısı (c_v) elde edilir.

$$c_v = \frac{0,197 H_d^2}{t_{50}} \quad (5.6)$$

$$c_v = \frac{0,848 H_d^2}{t_{90}} \quad (5.7)$$

5.4.3 Serbest basınç

Serbest basınç deneyi, laboratuvar ortamında zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek amacı ile kullanılan yöntemlerden biridir. Proktor sıkılığında hazırlanan silindirik zemin numunesine tek yönlü yükleme yapılarak deformasyon ve yük ölçümlerinin yapılmasını kapsar. Hazırlanan numunenin çap/boy oranı genellikle 1/2 olarak seçilmektedir. Serbest basınç deneyine tabi tutulmuş ve kırılma gerçekleşmiş numune, Şekil 5.9’ da görülmektedir. Deney sonucunda gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Kırılmanın gerçekleştiği en büyük eksenel gerilme değeri, zeminin serbest basınç mukavemeti (q_u) değerini verir. Şekil 5.10’ da görülen Mohr daireleri ve zarfları oluşturularak zeminlerin kayma mukavemeti belirlenir. Deney sırasında drenaj koşulları kontrol edilmemektedir. Özellikle killerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemede tercih edilen ve uygulanması oldukça basit bir yöntemdir. Drenajsız kayma mukavemeti;

$$\tau_f = c_u = (1/2)q_u \quad (5.8)$$

formülü kullanılarak elde edilmektedir. Yapılan çalışmalarda elastisite modülü (E);

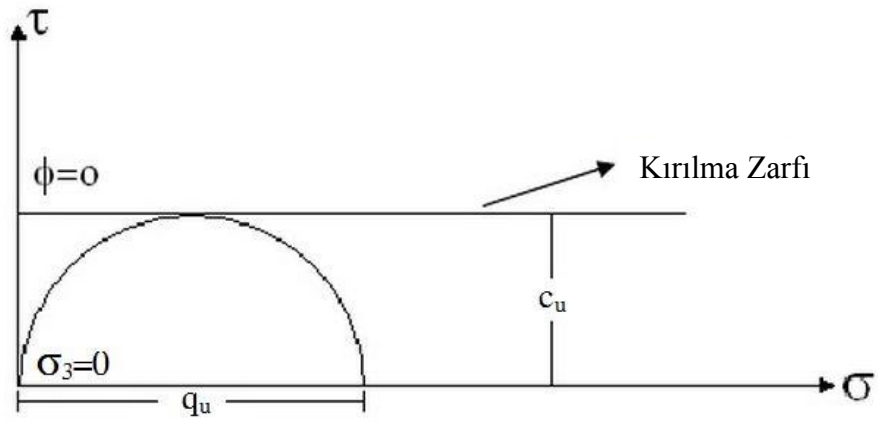
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5.9)$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

Fiziksel kısıtlamalar dolayısı ile kireç ve kireç+YFC katkılı serbest basınç numuneleri optimum değerlerin yaklaşık % 5 üzerine tekabül eden sabit % 30 su muhtevası ile sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Bu nedenle sonuçlar nümerik açıdan güvenilir olmamakla birlikte görece karşılaştırmak amacı ile değerlendirilmiştir. Kum-bentonit karışımlarında meydana gelen beklenmeyen sonuçlar da bu nedene dayandırılmıştır.



Şekil 5.7 : Kırılma gerçekleşmiş serbest basınç numunesi.



Şekil 5.8 : Serbest basınç deneyi sonucu elde edilen kırılma zarfı ve dairesi.

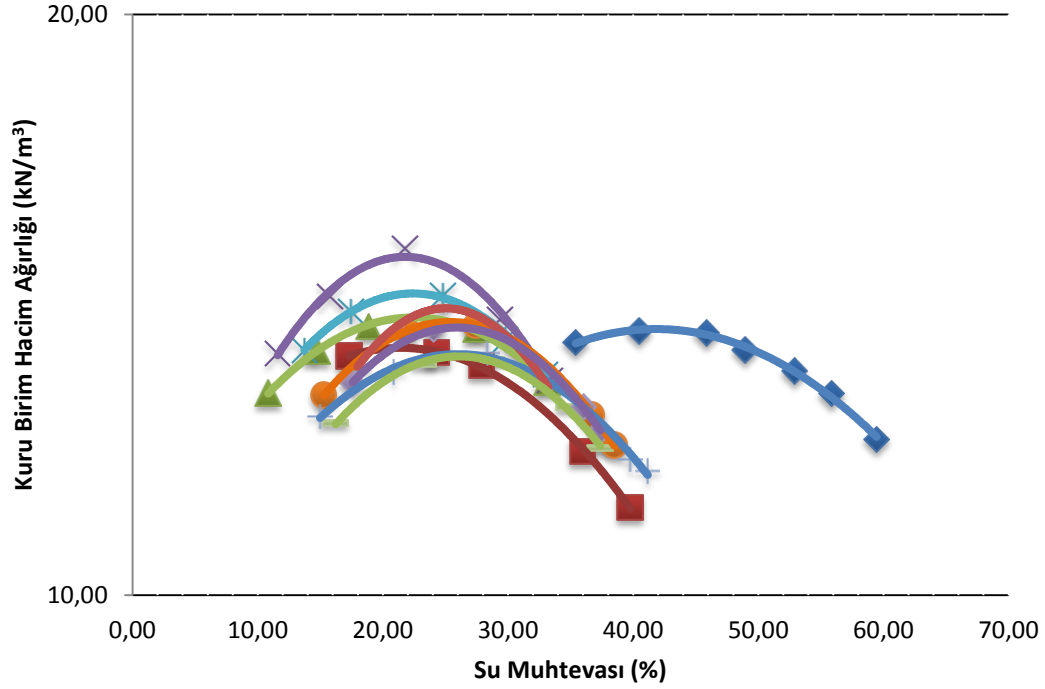
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Numuneler üzerinde yapılan kompaksiyon, konsolidasyon ve serbest basınç deney sonuçları ile düzenli depolama tesislerinde kullanılacak malzemelerde aranan özellikler bu bölümde yer almaktadır. Kireç ve yüksek fırın cürufunun kum ve bentonit karışımları üzerinde etkileri araştırılarak elde edilen sonuçlar ile aranan özellikler karşılaştırmış ve katkı malzemelerinin kullanımının uygunluğu tartışılmıştır. Deneyler sonucunda oluşturulan grafikler detaylı olarak EKLER bölümünde yer almaktadır.

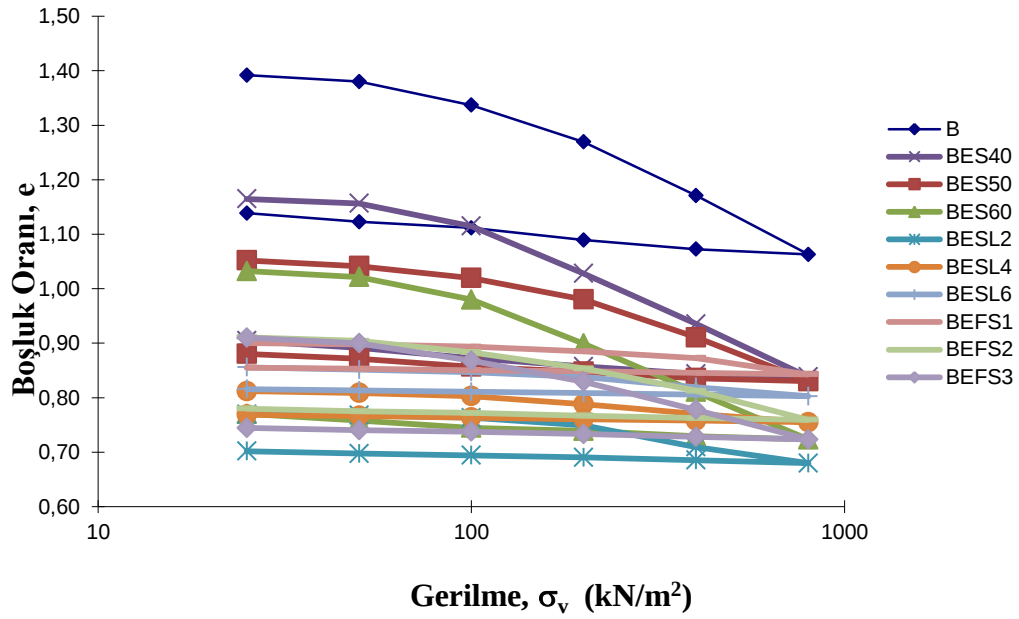
Her birim karışım için kompaksiyon, konsolidasyon ve serbest basınç deneyi sonuçları belirlenerek, katkıların zemin üzerinde etkileri araştırılmıştır. Karışımların özgül ağırlıkları artan bentonit ve kireç miktarı ile azalırken YFC katkısı ile artış göstermiştir. Kompaksiyon deneyleri sonuçları doğrultusunda ağırlıkça 40 ile 60 arasında değişen bentonit/kum oranının, zeminin sıkışabilirliğinde önemli ölçüde etkili olmadığı görülmüştür. Artan bentonit miktarı ile maksimum kuru birim hacim ağırlık veya optimum su muhtevası arasında doğrudan bir ilişki kurulamamıştır. Şekil 6.1' de görüldüğü üzere % 100 bentonit haricinde diğer karışımların optimum su muhtevası değerleri oldukça küçük bir aralık olarak nitelendirilebilecek % 22 ila % 28 aralığındadır. Maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının ise değişen kum/bentonit oranı ile % 2 oranında değişiklik gösterdiği, kireç ve YFC ilavesi ile % 15 in üzerine çıkmadığı görülmüştür. Kompaksiyon sonucu elde edilen kompaksiyon eğrilerinin bütünü Şekil 6.1' de görülmektedir.

Konsolidasyon deneyinden elde edilen grafikler kullanılarak numunelerin oturma ve geçirimsizlik özellikleri incelenmiştir. Karışımların konsolidasyon katsayıları (c_v), hacimsel sıkışma katsayıları (m_v) ve geçirimsizlik katsayıları (k), Casagrande ($\log t$) ve Taylor ($\sqrt{t}$) yöntemleri ile hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 6.1' de verilmiştir. Elde edilen konsolidasyon eğrileri Şekil 6.2' de yer almaktadır. Her yük kademesi için hesaplanan değerler ışığında geçirimsizlik katsayıları, her yük kademesinde elde edilen geçirimsizlik katsayılarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

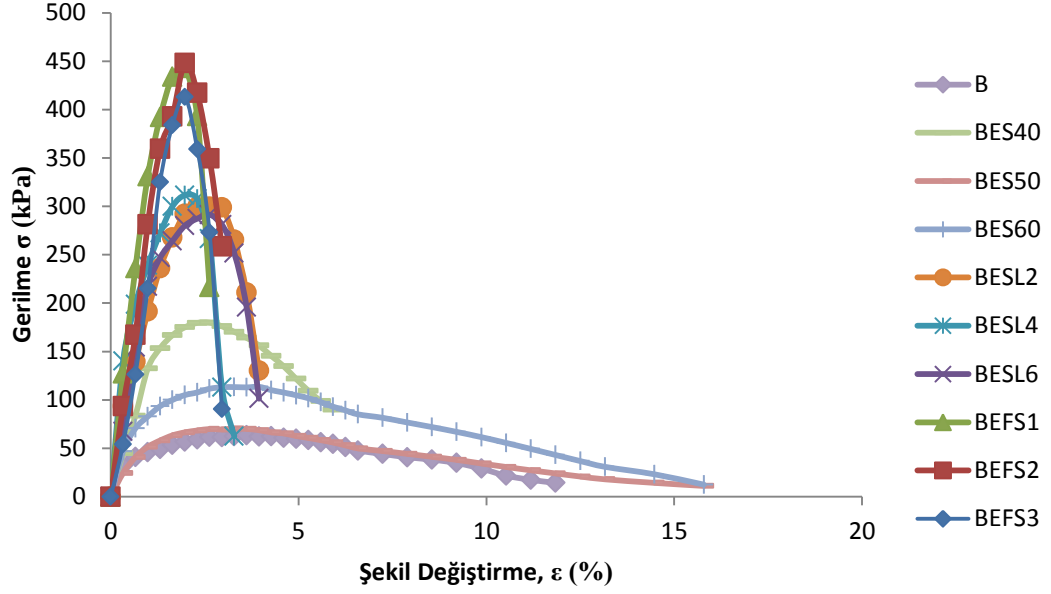
Serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri her bir numune için Şekil 6.3’ te verilmiştir. Her içerik için ayrı değerlendirme ve detay ileride anlatılacaktır.



Şekil 6.1 : Tüm numuneler için elde edilen kompaksiyon eğrileri.



Şekil 6.2 : Tüm numuneler için elde edilen konsolidasyon eğrileri.



Şekil 6.3 : Tüm numuneler için elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

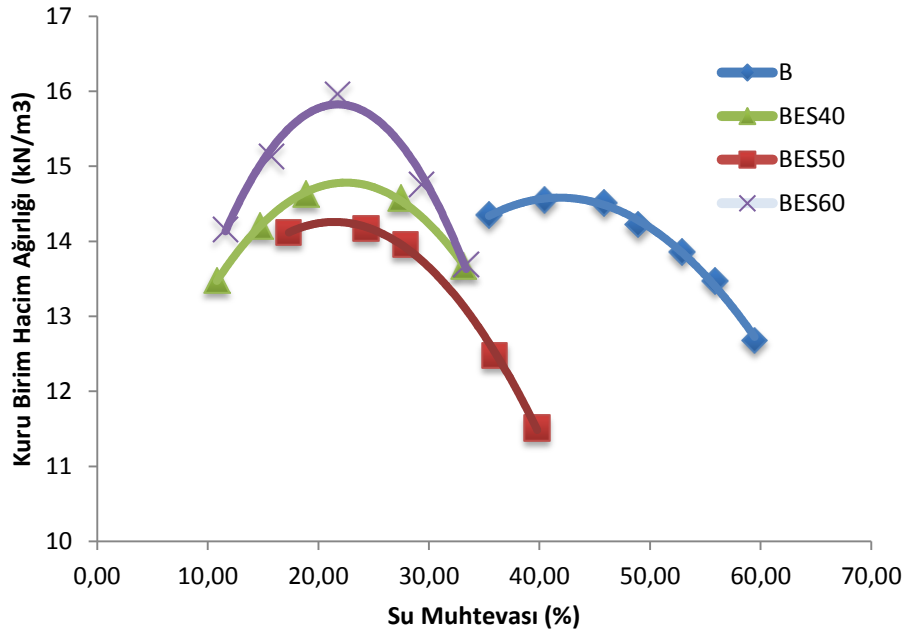
6.1 Kum-bentonit karışımlarına ait deney sonuçları

Kompaksiyon sonuçları doğrultusunda % 40 ila % 60 arasında değişen bentonit/kum oranının, zeminin sıkışabilirliğinde önemli ölçüde etkili olmadığı görülmüştür. Artan bentonit miktarı ile maksimum kuru birim hacim ağırlık veya optimum su muhtevası arasında direkt bir ilişki kurulamamıştır. Şekil 6.4' te görüldüğü üzere % 100 bentonit haricinde diğer karışımların optimum su muhtevelarının tümü yaklaşık % 22 değerine sahiptir. Maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının ise değişen kum/bentonit oranı ile % 2 oranında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Ayrıca artan kum içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde artış görüleceği beklenmiş ancak en yüksek kuru birim hacim ağırlık değeri en yüksek kum içeriğinde (% 60) olmakla birlikte BES40, BES50' ye göre daha yüksek kuru birim hacim ağırlık değerine sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1 : Konsolidasyon sonuçları.

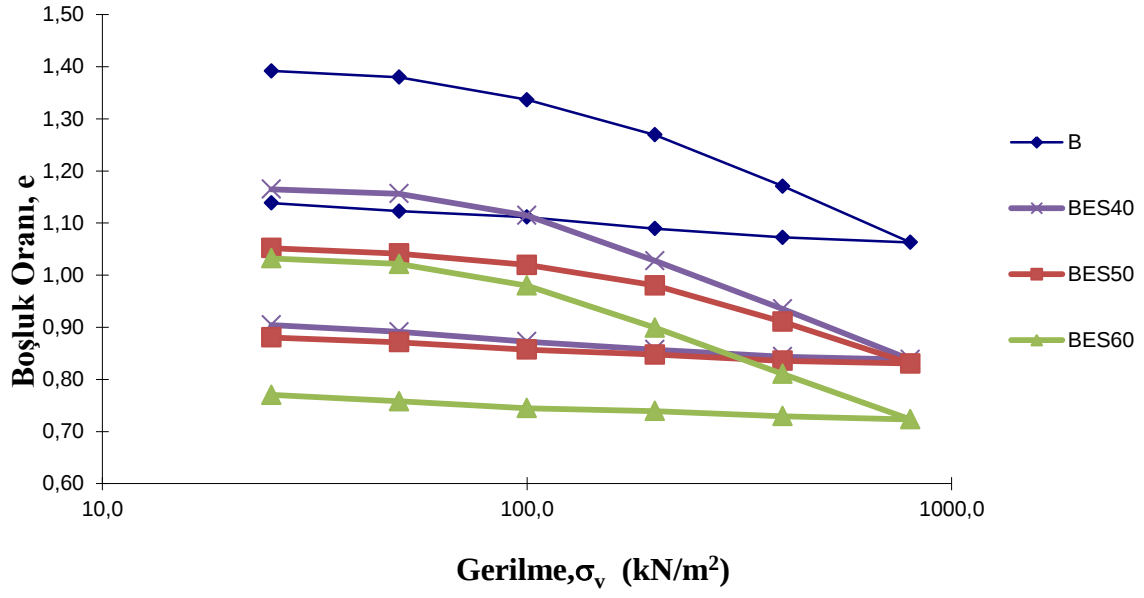
Malzeme	YÜK (kPa)	Hd (m)	t (sec)	cv (m ² /s)	Mc(kN/m2)	k (m/s)	k _{ave} (m/s)
B	25	0,019966	21,6	1,2868E-05	7328	5,23E-09	6,42 x 10⁻⁹
	50	0,019882	21,6	1,5912E-05	4958	7,73E-09	
	100	0,019652	21,6	3,8449E-05	2704	1,42E-08	
	200	0,019191	38,4	2,9507E-05	3365	1,14E-08	
	400	0,0185	38,4	3,715E-05	4412	8,69E-09	
	800	0,01764	48,6	3,7404E-05	7640	5,02E-09	
BES60	25	0,019932	21,6	3,8993E-06	3521	1,09E-08	9,61x 10⁻⁹
	50	0,019832	15	5,5588E-06	4703	8,15E-09	
	100	0,019472	25,35	3,1709E-06	2383	1,61E-08	
	200	0,01891	21,6	3,5097E-06	2355	1,63E-08	
	400	0,01809	33,75	2,0556E-06	4072	9,42E-09	
	800	0,01719	29,4	2,1308E-06	7915	4,84E-09	
BES50	25	0,019808	21,6	3,8509E-06	2579	1,49E-08	6,98 x 10⁻⁹
	50	0,019707	15	5,4889E-06	4878	7,86E-09	
	100	0,019496	33,75	2,3876E-06	4620	8,30E-09	
	200	0,019116	25,35	3,056E-06	5031	7,62E-09	
	400	0,018444	38,4	1,8781E-06	5489	6,99E-09	
	800	0,017668	38,4	1,7234E-06	9107	4,21E-09	
BES40	25	0,019968	60	1,4088E-06	15600	2,46E-09	4,02 x 10⁻⁹
	50	0,019891	31740	2,6427E-09	6458	5,94E-09	
	100	0,019506	60	1,3444E-06	2533	1,51E-08	
	200	0,018704	38,4	1,9314E-06	2332	1,64E-08	
	400	0,017851	25,35	2,6649E-06	4185	9,16E-09	
	800	0,016956	21,6	2,8218E-06	7578	5,06E-09	
BESL2	25	0,019906	33,75	2,489E-06	5294	7,24E-09	3,02 x 10⁻⁹
	50	0,019884	15	5,5879E-06	22595	1,70E-09	
	100	0,019832	21,6	3,8602E-06	19069	2,01E-09	
	200	0,019674	15	5,4705E-06	12452	3,08E-09	
	400	0,01923	21,6	3,6294E-06	8662	4,43E-09	
	800	0,018896	48,6	1,5575E-06	22630	1,69E-09	
BESL4	25	0,0199	29,4	2,8556E-06	4975	7,71E-09	2,28 x 10⁻⁹
	50	0,019864	48,6	1,7212E-06	13794	2,78E-09	
	100	0,019797	21,6	3,8466E-06	14774	2,60E-09	
	200	0,019636	21,6	3,7843E-06	12196	3,14E-09	
	400	0,01944	33,75	2,3739E-06	19837	1,93E-09	
	800	0,019272	240	3,2808E-07	45886	8,36E-10	
BESL6	25	0,019813	33,75	2,4658E-06	2649	1,45E-08	2,82 x 10⁻⁹
	50	0,019764	25,35	3,2667E-06	10084	3,80E-09	
	100	0,019718	33,75	2,4422E-06	21433	1,79E-09	
	200	0,019624	21,6	3,7797E-06	20877	1,84E-09	
	400	0,019424	29,4	2,7206E-06	19424	1,97E-09	
	800	0,019245	48,6	1,6156E-06	43006	8,92E-10	
BEFS1	25	0,019914	60	1,4012E-06	5789	6,62E-09	1,52 x 10⁻⁹
	50	0,019889	15	5,5908E-06	19889	1,93E-09	
	100	0,019842	48,6	1,7174E-06	21108	1,82E-09	
	200	0,019754	21,6	3,8299E-06	22448	1,71E-09	
	400	0,019624	38,4	2,1261E-06	30191	1,27E-09	
	800	0,01931	38,4	2,0586E-06	24599	1,56E-09	
BEFS2	25	0,019844	33,75	1,3914E-06	2649	1,45E-08	3,73 x 10⁻⁹
	50	0,019772	25,35	3,2693E-06	10084	3,80E-09	
	100	0,019556	33,75	2,1114E-06	21433	1,79E-09	
	200	0,019248	21,6	2,6715E-06	20877	1,84E-09	
	400	0,01882	29,4	2,9621E-06	19424	1,97E-09	
	800	0,018268	48,6	1,8424E-06	43006	8,92E-10	
BEFS3	25	0,019797	60	1,70962E-06	2438	1,57E-08	4,24 x 10⁻⁹
	50	0,01969	21,6	2,8261E-06	4600	8,33E-09	
	100	0,019358	38,4	1,36986E-06	2915	1,32E-08	
	200	0,01896	21,6	2,06883E-06	4764	8,05E-09	
	400	0,018424	60	1,56811E-06	6875	5,58E-09	
	800	0,01786	38,4	1,87401E-06	12667	3,03E-09	

Bentonite ait geçirimsilik değerleri 25 kPa ile 800 kPa arasında değişen yük kademelerinde $5,23 \times 10^{-8}$ m/s ile $1,74 \times 10^{-9}$ m/s aralığında değişim göstermiş ve ortalama $6,41 \times 10^{-9}$ m/s olarak hesaplanmıştır. Geçirimsilik değeri ile yük kademesi ile doğrudan bağlantı kurulamamıştır. BES60 geçirimsilik değerleri aynı yük kademeleri için $1,08 \times 10^{-8}$ m/s ile $2,63 \times 10^{-9}$ m/s aralığında değişim göstermiş ve ortalama $9,61 \times 10^{-9}$ m/s olarak hesaplanmıştır. Yük kademesinin artmasıyla geçirimsiliğin azaldığı görülmektedir.

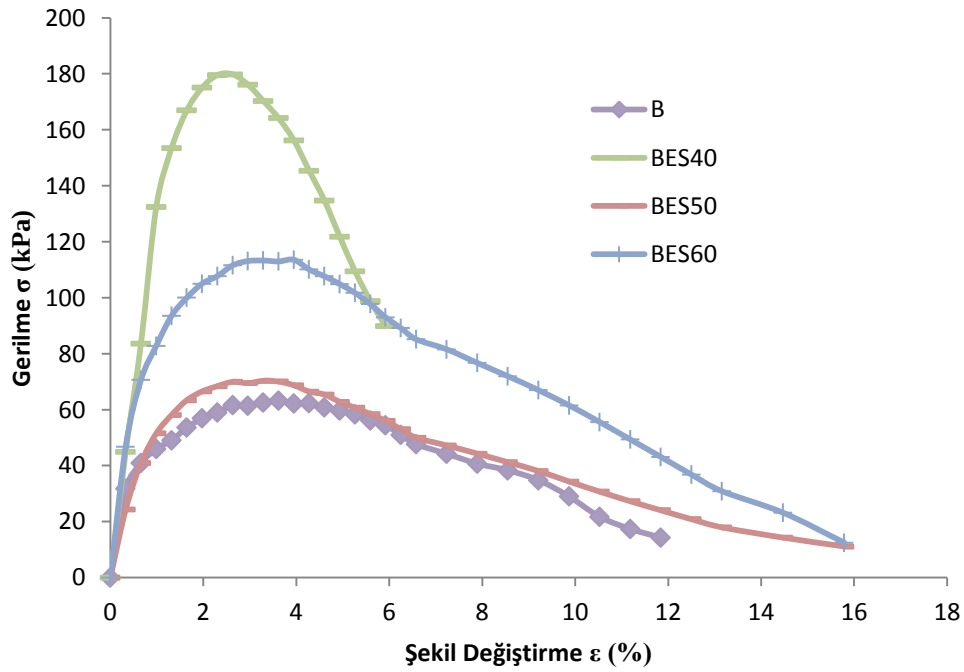


Şekil 6.4 : Kum-bentonit karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri.

Farklı yük kademeleri için BES50 geçirimsilik değerleri $1,46 \times 10^{-8}$ m/s ile $1,85 \times 10^{-9}$ m/s aralığında değişmektedir ve ortalama $6,98 \times 10^{-9}$ m/s olarak hesaplanmıştır. BES60 ile benzer şekilde geçirimsilik miktarı, artan yük kademesi ile azalmaktadır. BES40 a ait geçirimsilik değerleri, diğerlerinden oldukça büyük farklılık gösteren ve şişme meydana gelen 50 kPa yük kademesinde oluşan $4,01 \times 10^{-12}$ m/s değeri göz ardı edildiğinde $3,34 \times 10^{-9}$ m/s to $8,85 \times 10^{-10}$ m/s aralığında değişmekte ve $4,81 \times 10^{-9}$ m/s ortalamasını vermektedir. Elde edilen sonuçlar, artan bentonite oranı ile geçirimsiliğin azaldığını belirten Chapuis (1990) ile benzerlik göstermektedir. Karışımların birim deformasyon değerleri B, BES60, BES50 ve BES40 için sırası ile 14 %, 20 %, 12 % and 15 % olarak hesaplanmıştır. Karşılık gelen m_v değerleri Çizelge 6.1' de görülmektedir.



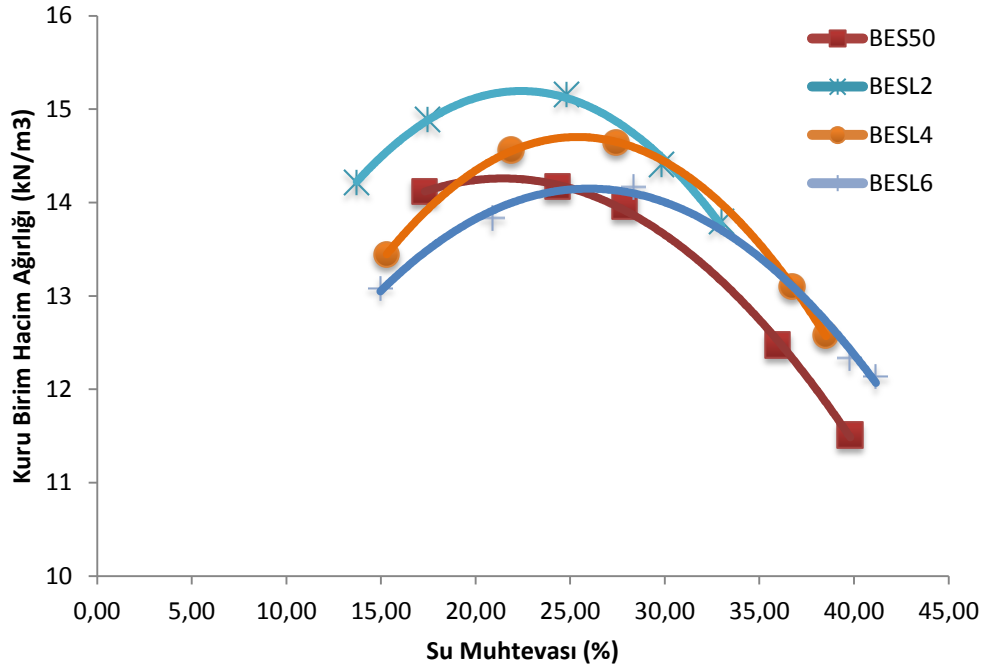
Şekil 6.5 : Kum-bentonit karışımlarına ait konsolidasyon eğrileri.



Şekil 6.6 : Kum-bentonit karışımlarına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

6.2 Kireç katkılı kum-bentonit karışımlarına ait deney sonuçları

Sıkışma açısından kireç katkısının etkileri oldukça belirgindir. % 2 oranında kireç katkısının maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerini artırdığı ancak daha fazla kireç ilavesinin kuru birim hacim ağırlığını azalttığı Şekil 6.7' de görülmektedir.



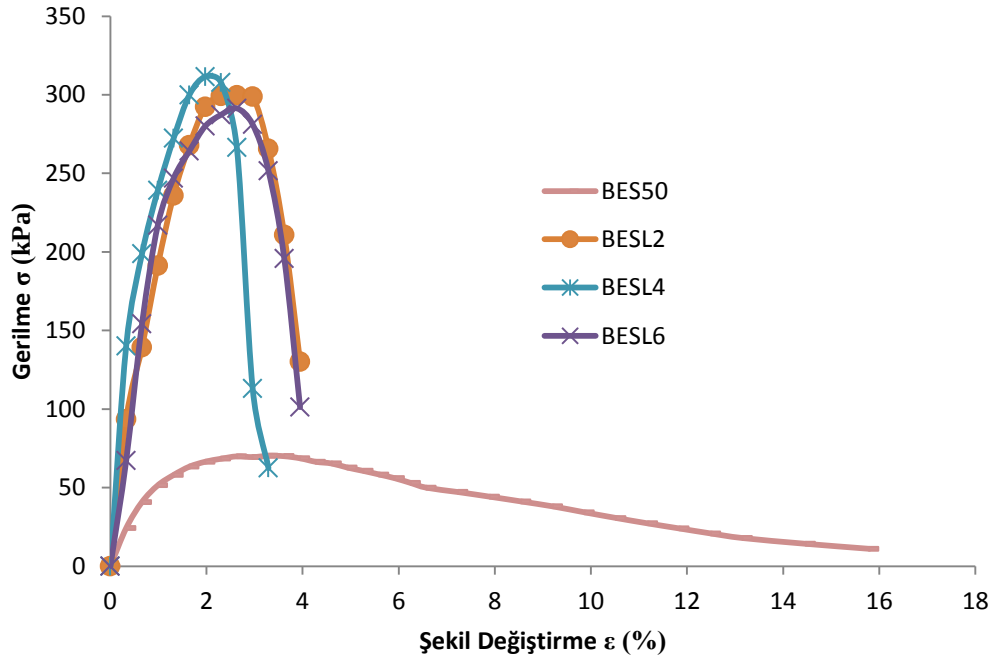
Şekil 6.7 : Kireç katkılı kum-bentonit karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri.

% 2 kireç katkılı karışımların geçirimsilik değerleri $6,7 \times 10^{-10}$ m/s ve $4,6 \times 10^{-9}$ m/s aralığında ve ortalama $3,02 \times 10^{-9}$ m/s olarak belirlenmiştir. Geçirimsilik değerleri arasında farklı yük kademelerinde büyük değişiklikler görülmemiş olmakla birlikte artan yük kademesi ile geçirimsiliğin azaldığı söylenebilir.

% 4 kireç katkılı karışımların geçirimsilik değerleri $2,28 \times 10^{-9}$ m/s ortalama ile, $5,62 \times 10^{-9}$ m/s ile 7×10^{-11} m/s aralığında belirlenmiştir. Geçirimsilik değerleri arasındaki en büyük farklılık en düşük ve en yüksek yük kademeleri arasında oluşurken ara yük kademeleriyle direkt bağlantı sağlanamamıştır.

% 6 kireç katkılı karışımlarda $9,12 \times 10^{-9}$ m/s ile $3,68 \times 10^{-10}$ m/s değer aralığında geçirimsilik sonuçları elde edilmiş ve ortalama değer $2,82 \times 10^{-9}$ m/s olarak hesaplanmıştır. Yük kademesinin artması ile geçirimsilik değerinin azaldığı görülmüştür.

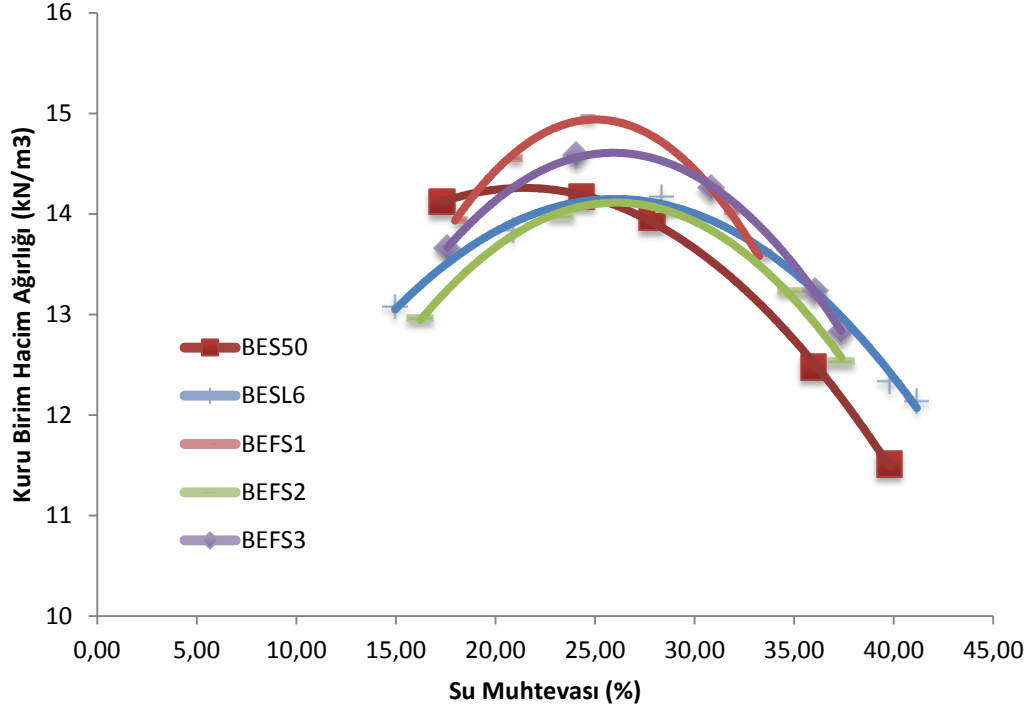
Kireç ilave edilen kum ve bentonit karışımlarının birim deformasyon ve geçirimsizlik özelliklerinin azaldığı görülmüştür. Birim deformasyon değerlerinin % 2, % 4 ve % 6 kireç katkıli karışımlar için sıra ile % 5,5 , % 3,6 ve % 3,8 olarak belirlenmiştir. BES50 ile karşılaştırıldığında kireç katkısının serbest basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Serbest basınç deneyi sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, ağırlıkça % 50 bentonit içeren BES50 ile karşılaştırmalı olarak Şekil 6.8’ de görülmektedir.



Şekil 6.8 : Kireç katkıli kum-bentonit karışımlarına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

6.3 Kireç+YFC katkıli kum-bentonit karışımlarına ait deney sonuçları

Kompaksiyon sonuçları doğrultusunda yüksek fırın cürufu katkısının zeminin sıkışabilirliğinde önemli ölçüde etkili olmadığı görülmüştür. Artan cüruf miktarı ile kuru birim hacim ağırlık veya optimum su muhtevası arasında direkt bir ilişki kurulamamıştır. Sonuçlar her oran için neredeyse sabit sayılabilecek % 26 optimum su muhtevası değerini verirken, maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerleri arasında da büyük farklar meydana gelmemiştir. En yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini ağırlıkça % 50 bentonit, % 6 kireç ve % 1 oranında YFC içeren BEFS1’in verdiği anlaşılmaktadır. Sonuçlar Şekil 6.9’ da görülmektedir.



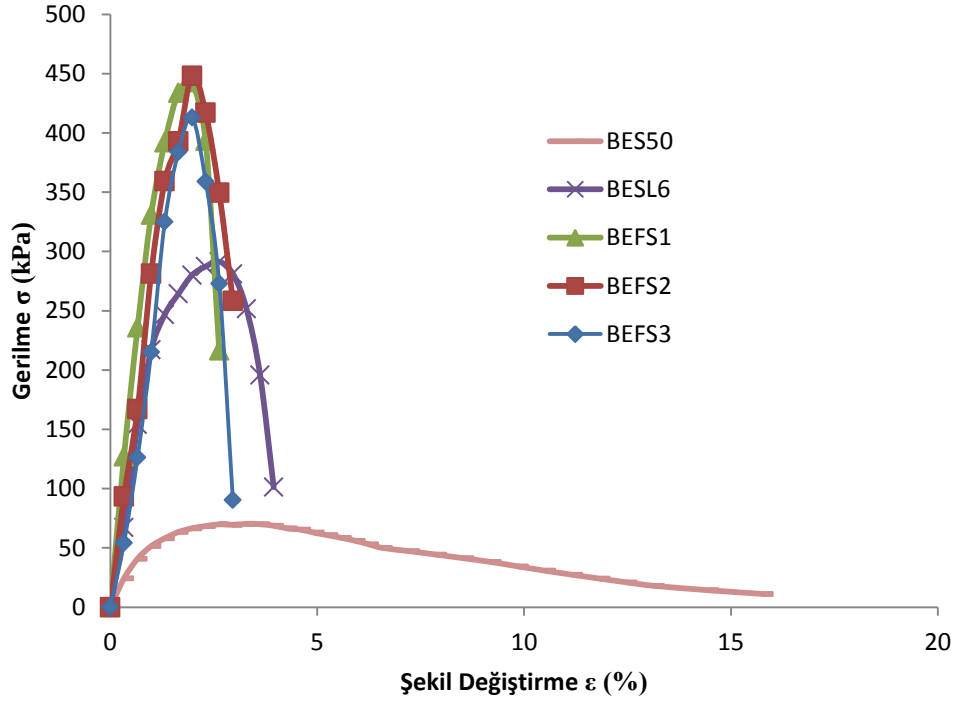
Şekil 6.9 : Kireç+YFC katkılı kum-bentonit karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri.

% 1 YFC katkılı karışımların (BEFS1) geçirimsilik değerleri $2,75 \times 10^{-9}$ m/s ve $6,90 \times 10^{-10}$ m/s aralığında ve ortalama $1,51 \times 10^{-9}$ m/s olarak belirlenmiştir. Artan yük kademesi ile geçirimsiliğin azaldığı söylenebilir. % 2 YFC katkılı karışımların (BEFS2) geçirimsilik değerleri $3,72 \times 10^{-9}$ m/s ortalama ile, oldukça küçük bir aralık olan $1,36 \times 10^{-9}$ m/s ile 4×10^{-9} m/s aralığında belirlenmiştir. Artan yük kademesi ile geçirimsiliğin azaldığı görülmektedir. % 3 YFC katkılı karışımlarda (BEFS3) $1,45 \times 10^{-9}$ m/s ile $6,87 \times 10^{-9}$ m/s değer aralığında geçirimsilik sonuçları elde edilmiş ve ortalama değer $4,24 \times 10^{-9}$ m/s olarak hesaplanmıştır. BEFS2 ile oldukça yakın değer aralığı ve ortalamasını veren geçirimsilik katsayılarının yine benzer şekilde artan yük kademesi ile azaldığı söylenebilmektedir.

Konsolidasyon sonuçları doğrultusunda % 1 oranında YFC katkısının bütün karışımlar arasında en düşük geçirimsilik değerini sağladığı anlaşılmaktadır. Artan YFC içeriği ile geçirimsilik değerinde artışlar gözlenmiş ancak YFC katkılı malzeme üzerinde görülen en yüksek geçirimsilik değeri, katkısız kum-bentonit karışımlarında görülen en düşük değere yakın bir sonuç vermiştir.

Deneyler sonucunda yüksek fırın cürufunun kireç ile birlikte ilave edildiği ağırlıkça %1, % 2 ve % 3 oranları için kum ve bentonit karışımlarının geçirimsilik

değerlerinde azalma, birim deformasyonda ciddi oranda azalma, serbest basınç dayanımında ise önemli artışlar gözlenmiştir. Sonuçlar BES50 ve BESL6 ile karşılaştırmalı olarak Şekil 6.10’ da görülmektedir.



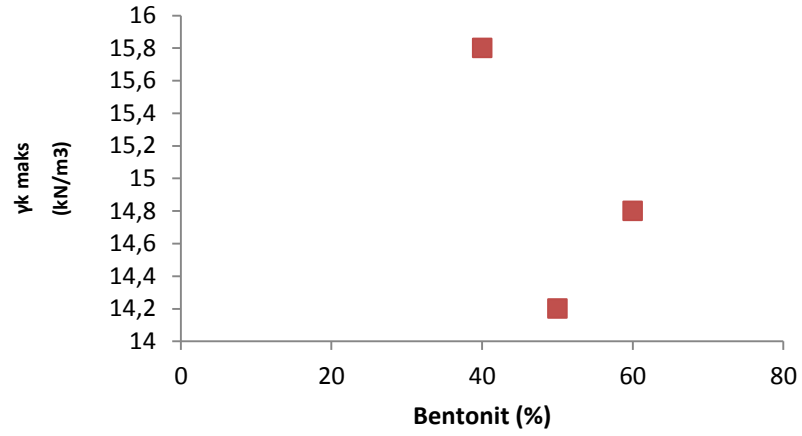
Şekil 6.10 : Kireç+YFC katkılı kum ve bentonit karışımlarına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

6.4 Sonuçların Değerlendirilmesi

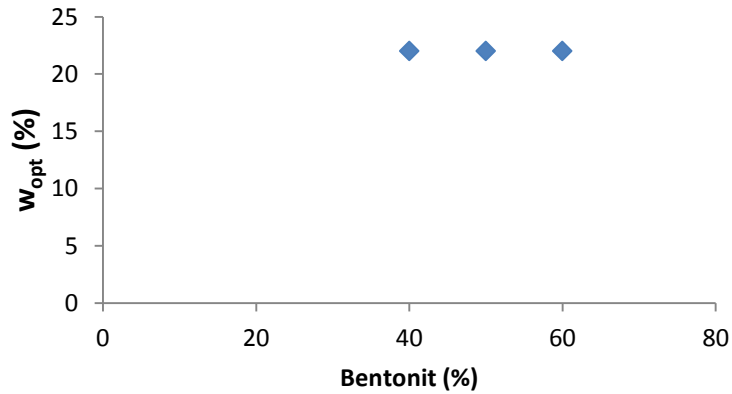
Standart proctor, konsolidasyon ve serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen birtakım değerler Çizelge 6.2’ de görülmektedir. Kompaksiyon deneyleri sonucunda, Şekil 6.11 ve 6.12’ de görüldüğü üzere bentonit içeriğinin optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) üzerinde kayda değer değişiklikler yaratmadığı anlaşılmaktadır. Ancak sonuçlar lineer olarak incelendiğinde artan bentonit miktarının maksimum kuru birim hacim ağırlığını düşürerek optimum su muhtevasında artışa neden olduğu söylenebilir.

Çizelge 6.2 : Karışımlara ait deneysel sonuçlar.

Malzeme	İçerik (%)			Kompaksiyon		Konsolidasyon			Serbest Basınç		
	Bentonit	Kireç	YFC	w _{opt} (%)	γ _{kmax} [kN/m ³]	k (m/s)	ε (%)	Mc	q _u [kPa]	ε (%)	E (MPa)
B	100	0	0	42	14,6	6,42E-09	11,80	4403	64	3,60	17,77
BES40	60	0	0	22	14,8	4,02E-09	14,05	3503	180	2,50	72,00
BES50	50	0	0	22	14,2	6,98E-09	11,66	4616	70	3,50	20,00
BES60	40	0	0	22	15,8	9,61E-09	15,22	4245	115	4,00	28,75
BESL2	50	2	0	23	15,2	3,02E-09	5,52	11417	300	2,80	107,15
BESL4	50	4	0	26	14,7	2,28E-09	3,64	12112	315	2,20	143,18
BESL6	50	6	0	27	14,2	2,82E-09	3,77	9288	290	2,60	110,69
BEFS1	50	6	1	25	14,9	1,52E-09	3,45	15435	445	2,40	185,42
BEFS2	50	6	2	26	14,1	3,73E-09	8,66	9288	450	2,50	180,00
BEFS3	50	6	3	26	14,6	4,24E-09	10,70	4271	415	2,50	166,00

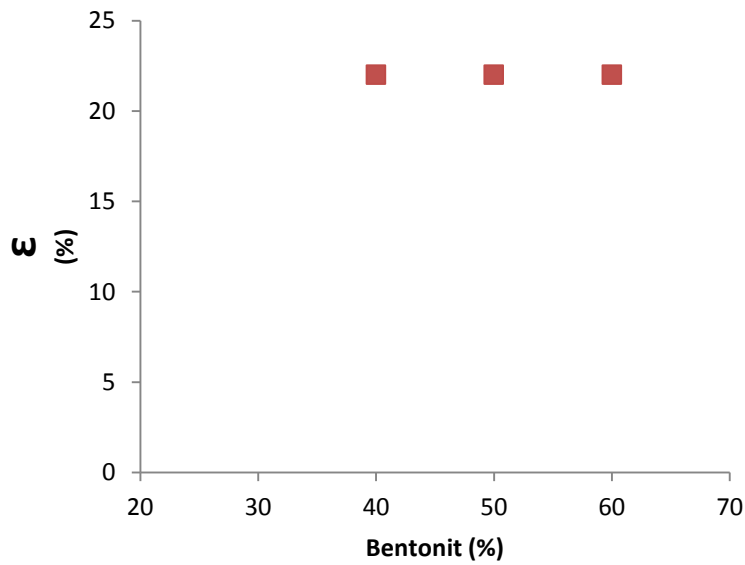


Şekil 6.11 : Maksimum kuru birim hacim ağırlık üzerinde bentonit etkisi.

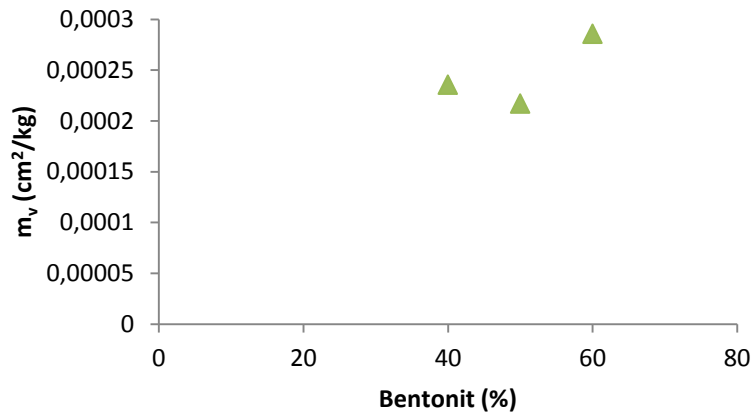


Şekil 6.12 : Optimum su muhtevası üzerinde bentonit etkisi.

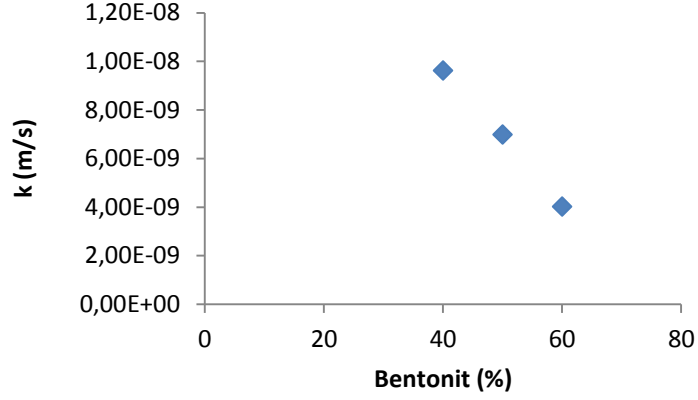
Bentonit miktarının % 40' tan % 60' a artışının geçirimsizlik katsayısının azalmasına neden olduğu Şekil 6.15' te görülmektedir. Ancak bu durum % 100 bentonit korelasyona dahil edilmediği takdirde geçerlidir. % 50 bentonit içeriğine sahip BES50' ye ait geçirimsizlik katsayısı değeri, % 100 bentonite ait geçirimsizlik değeri ile oldukça yakın sonuçlar vermişlerdir. Artan bentonit miktarının birim boy değişimi ile arasında net bir ilişki olmamakla birlikte Şekil 6.13'te görüldüğü üzere bentonit içeriğinin birim boy kısalmayı az miktarda azalttığı söylenebilmektedir. Hesaplanan hacimsel sıkışma katsayısı değerleri % 60 bentonit içeren BES40 haricinde oldukça yakın sonuçlar verdikleri Şekil 6.14'te görülmektedir.



Şekil 6.13 : Birim boy değişimi üzerinde bentonit etkisi.



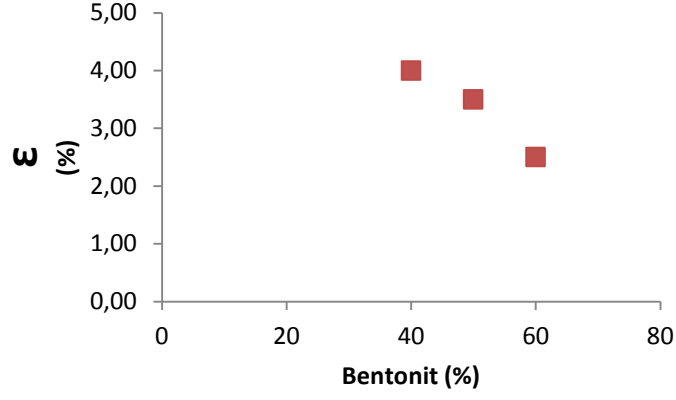
Şekil 6.14 : Hacimsel sıkışma üzerinde bentonit etkisi.



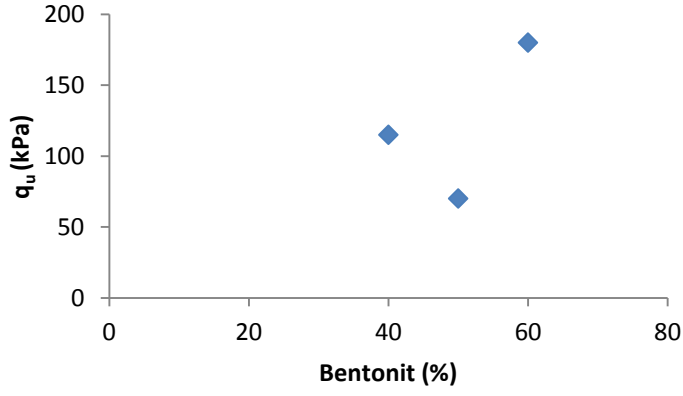
Şekil 6.15 : Geçirimsizlik üzerinde bentonit etkisi.

Kum ve bentonit karışımları mukavemet özellikleri açısından değerlendirildiğinde en yüksek serbest basınç dayanımını % 60 bentonit içerikli BES40'ın verdiği Şekil 6.17' de görülmektedir. Genel olarak bakıldığında bu değer haricinde artan bentonit içeriği ile serbest basınç dayanımının azalması beklenmektedir. Birim boy değişimi % 40 ile % 60 arasında bentonit içeriğine sahip numuneler incelendiğinde artan bentonit ile azalma göstermişlerdir. Ancak % 100 bentonit numunesi, birim kısalma açısından % 50 bentonit içeren BES50 ile oldukça yakın sonuçlar vermişlerdir (Şekil 6.16). BES40' a ait Elastisite modülü de diğer karışımlardan oldukça farklı seviyelerdedir (Şekil 6.18). Bu durumun diğer numunelerin sıkıştırıldığı su muhtevası değerinin BES40' a göre daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

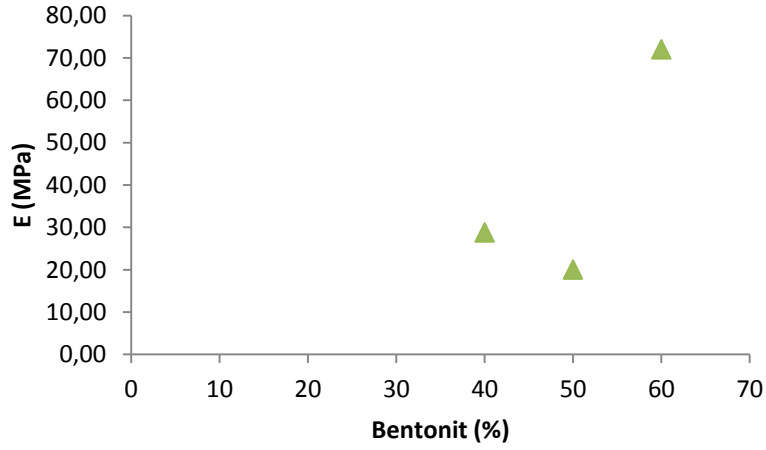
Kireç katkısının optimum su muhtevasının değişiminde belirgin olduğu ve aralarındaki doğrusal ilişki Şekil 6.20' de görülmektedir. Artan kireç miktarı optimum su muhtevası değerinin artmasına neden olmaktadır. Kireç katkısı maksimum kuru birim hacim ağırlıkları üzerinde optimum su muhtevası üzerinde olduğu kadar etkili olmamakla birlikte, BES50' ye ilave edilen % 2 kireç katkısının maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini 14,2' den 15,2'ye çıkardığı, ancak % 2'nin üzerinde ilave edilen kirecin bu değeri yeniden 14,2'ye düşürdüğü Şekil 6.19'da görülmektedir.



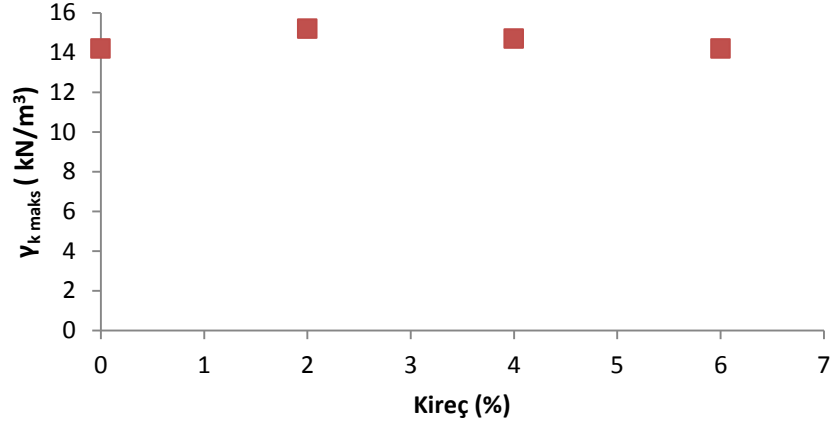
Şekil 6.16 : Birim deformasyon üzerinde bentonit etkisi.



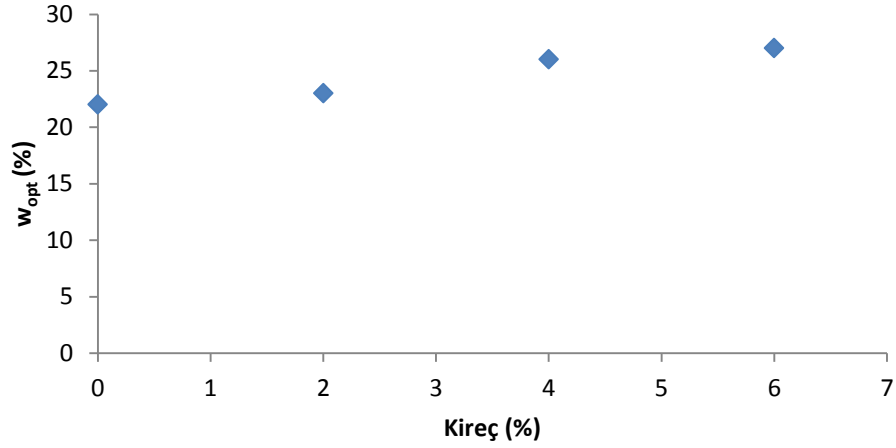
Şekil 6.17 : Serbest basınç dayanımı üzerinde bentonit etkisi.



Şekil 6.18 : Elastisite modülü üzerinde bentonit etkisi.

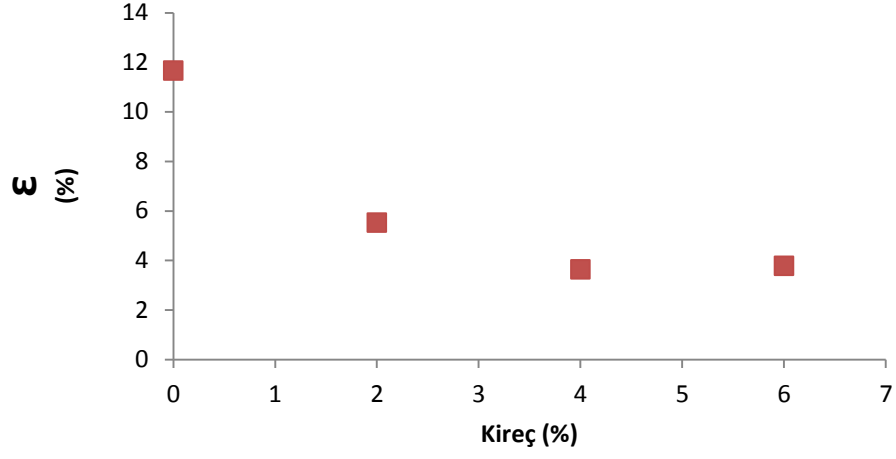


Şekil 6.19 : Maksimum kuru birim hacim ağırlık üzerinde kireç etkisi.

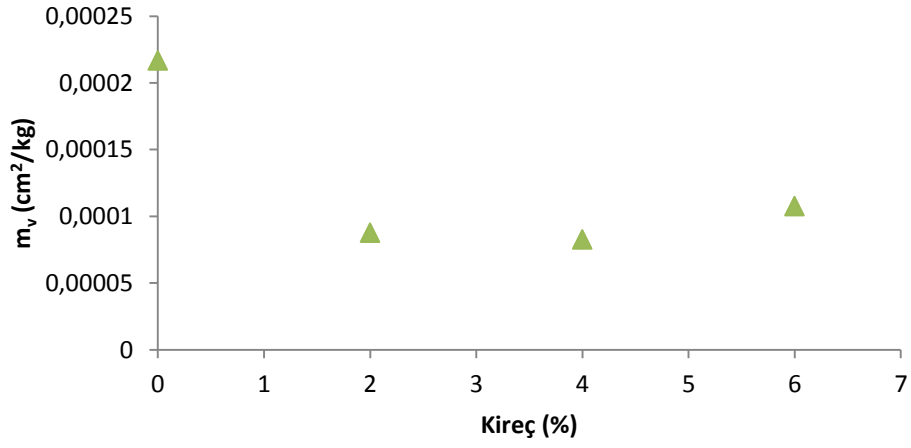


Şekil 6.20 : Optimum su muhtevası üzerinde kireç etkisi.

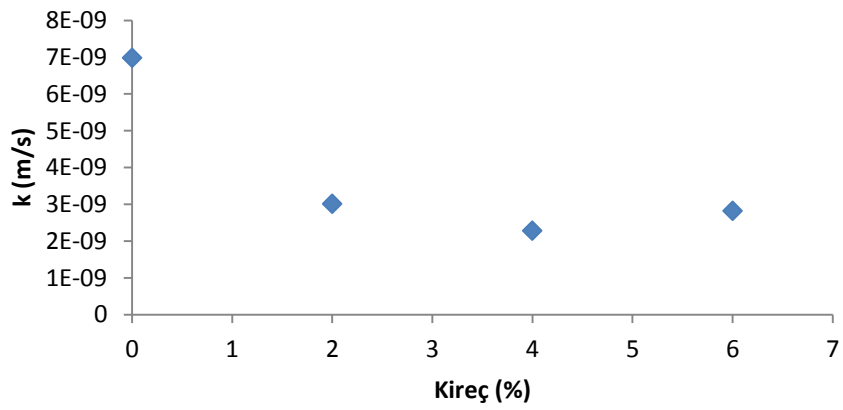
Kireç ilave edilen malzemelerin geçirimlilik katsayılarının tümü, en düşük geçirimlilik katsayısına sahip kum ve bentonit karışımına (BES40) ait geçirimlilik katsayısından daha düşük sonuçlar vermiştir. Şekil 6.23' e bakılarak genel olarak artan kireç miktarının geçirimlilikte azalmaya neden olduğu söylenebilir. % 4 kireç katkılı BESL4 ile % 6 kireç katkılı BESL6 malzemelerine ait geçirimlilik katsayıları oldukça yakın olmakla birlikte BESL4'ün daha düşük geçirimliliğe sahip olduğu anlaşılmaktadır. Artan kireç miktarının genel anlamda birim kılma ve hacimsel sıkışmayı da azalttığı Şekil 6.21 ve 6.22'de görülmektedir.



Şekil 6.21 : Birim boy değişimi üzerinde kireç etkisi.



Şekil 6.22 : Hacimsel sıkışma katsayısının değişimi ile kireç ilişkisi.

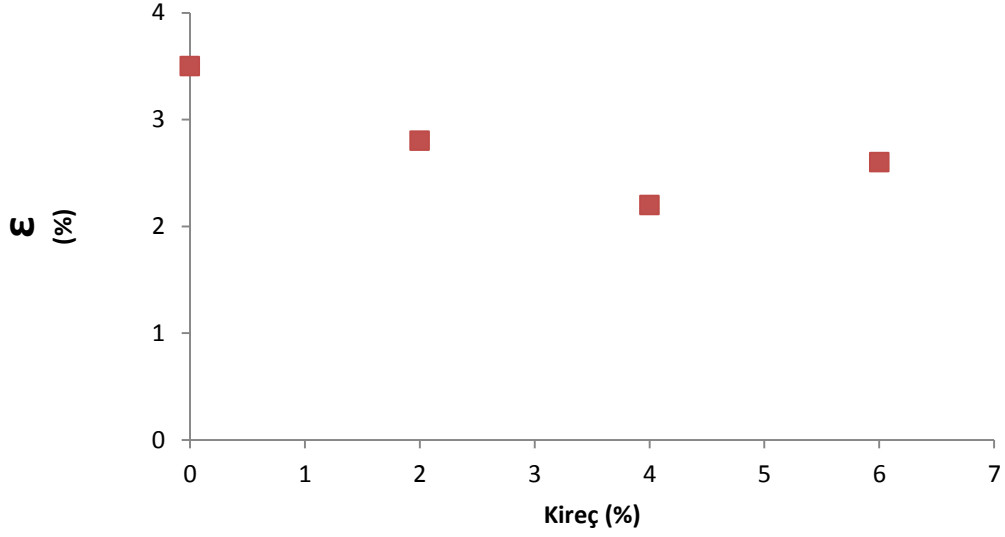


Şekil 6.23 : Geçirimsizlik üzerinde kireç etkisi.

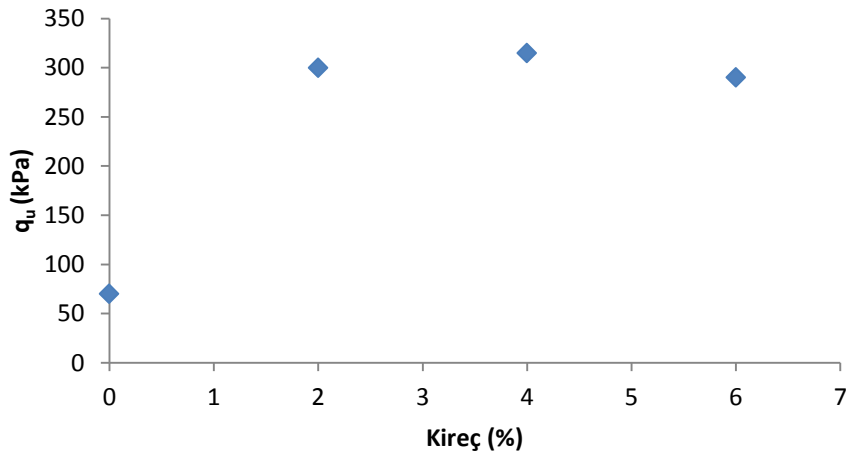
Önceki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, elde edilen geçirimsilik değerlerinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Tashiro (1998), % 30 bentonit içerikli kum bentonit karışımlarına ait geçirimsilik değerini 8.2×10^{-13} m/s ile 4.2×10^{-12} m/s aralığında, Komine (2004), % 30 ila % 50 aralığında bentonit içeren kum bentonit karışımlarına ait geçirimsilik değerlerini 6.87×10^{-12} ila 1.21×10^{-12} m/s aralığında ve Kaya (2006) % 20 bentonit içerikli kum-bentonit karışımına ait geçirimsilik değerini 4.81×10^{-11} m/s olarak elde ederken, yapılan çalışmalar sonucu ağırlıklı olarak 1×10^{-8} ile 1×10^{-9} m/s aralığında sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen maksimum değer 1×10^{-11} m/s değerinden daha yüksektir. Bu durumun kullanılan bentonitin türü ve endeks özelliklerinin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde % 2 nin üzerinde kireç katkısının daha etkili sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

Kireç katkısının BES50 ile kıyaslandığında serbest basınç mukavemetini artırdığı Şekil 6.25' te görülmektedir. Buna rağmen artan kireç miktarı daha yüksek mukavemetler sağlamamış, % 2, % 4 ve % 6 kireç katkıları için oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Yine de doğrusal bir ilişki kurulursa artan kireç miktarının serbest basınç dayanımını artırdığı söylenebilir. Birim deformasyonun % 4 oranda kireç ilavesine kadar azaldığı Şekil 6.24' te görülmektedir. Ancak kireç miktarı % 6 ya çıkarıldığında birim deformasyon miktarında artış gözlenmiştir. Elastisite modülü değerlerinin serbest basınç dayanımı ile paralel şekilde sonuçlanmıştır (Şekil 6.26). En yüksek elastisite modülü % 4 kireç içeriğinde elde edilmiştir.

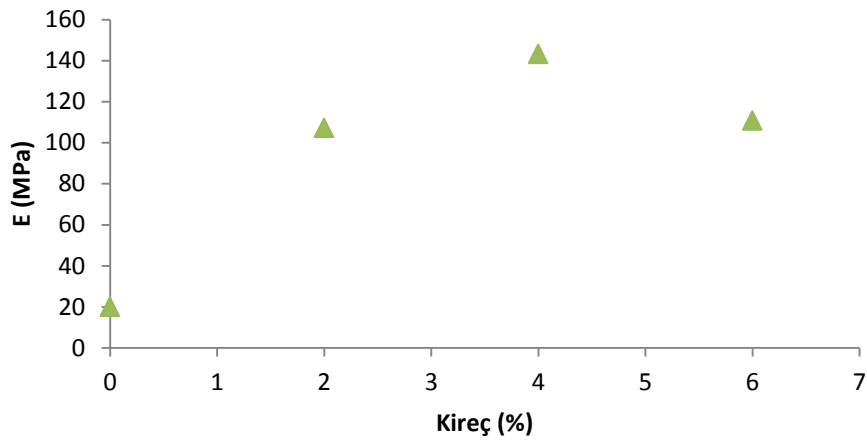
Diğer çalışmalar ile benzer şekilde % 2 nin üzerinde kireç katkısının geçirimsiliği ciddi oranda düşürdüğü anlaşılmıştır, ancak kireç katkısı ile geçirimsiliğin arttığı herhangi bir durum oluşmamıştır. Birim kısalma ve hacimsel sıkışma gibi davranışların da artan kireç miktarına bağlı olarak azalma gösterdiği anlaşılmaktadır. Genel olarak kireç katkısının kum-bentonit karışımları üzerinde, düzenli depolama tesislerinde uygulanabilirlik açısından olumsuz herhangi bir etkisi görülmemiş, aksine geçirimsiliği ve deformasyon miktarlarını düşürerek bu doğrultuda özellikleri iyileştirildiği anlaşılmıştır. Ayrıca basınç dayanımını artırdığı görülmektedir.



Şekil 6.24 : Birim deformasyonun kireç miktarı ile değişimi.

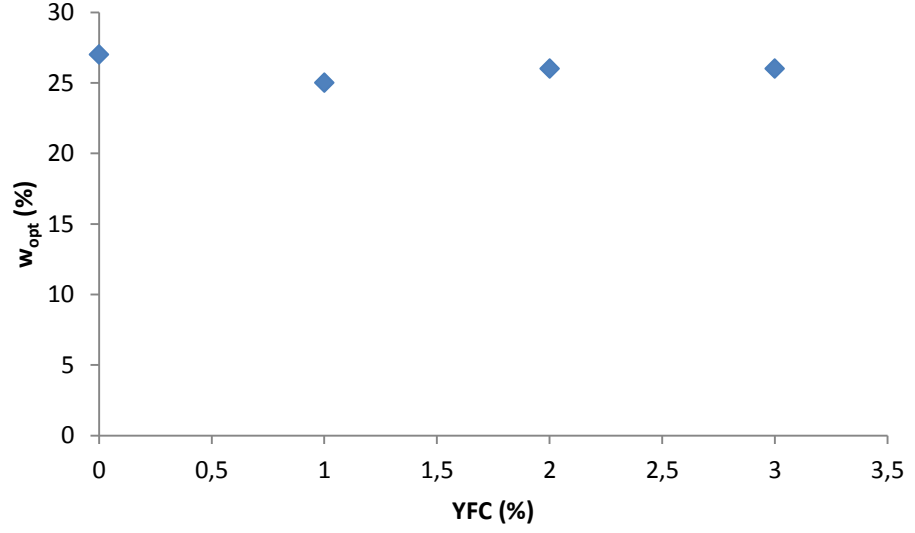


Şekil 6.25 : Serbest basınç özellikleri üzerinde kireç etkisi.

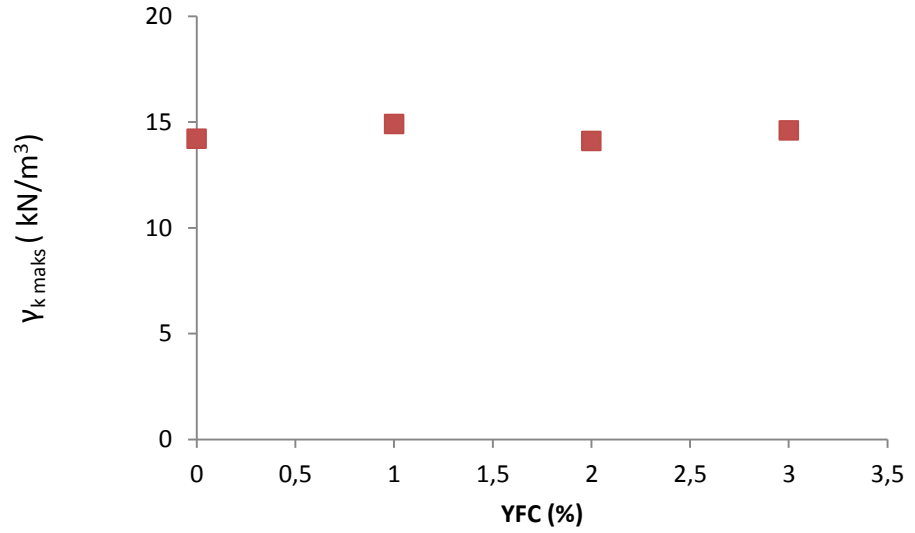


Şekil 6.26 : Elastisite modülünün kireç miktarı ile değişimi.

YFC katkısının hali hazırda kireç katkılı zemin örneği üzerinde gerek optimum su muhtevası (w_{opt}) gerek maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) üzerinde önemli bir etki yaratmadığı Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’ de görülmektedir.

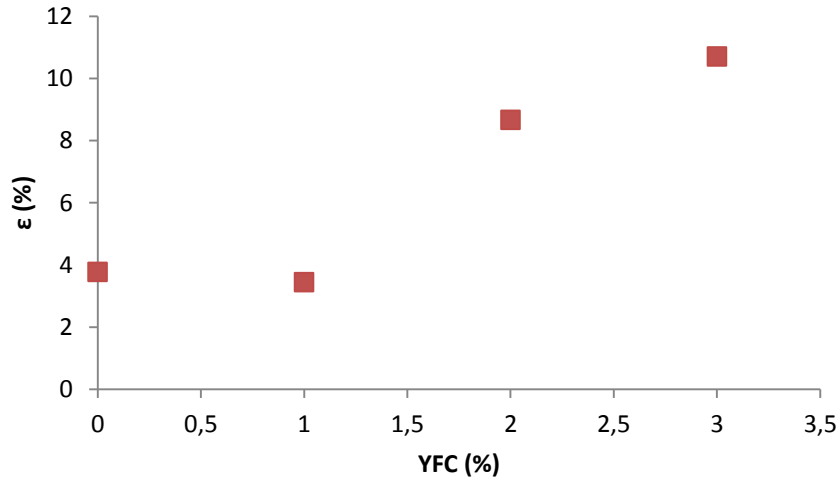


Şekil 6.27 : Optimum su muhtevası değişiminde YFC etkisi.

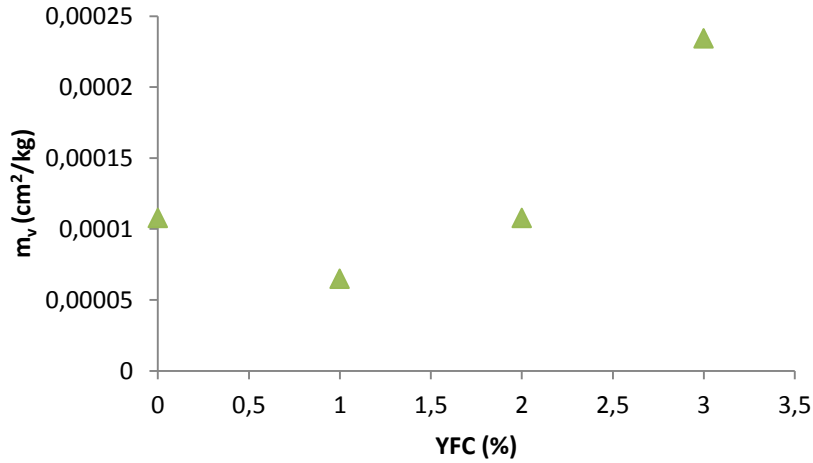


Şekil 6.28 : Maksimum kuru birim hacim ağırlık değişiminde YFC etkisi.

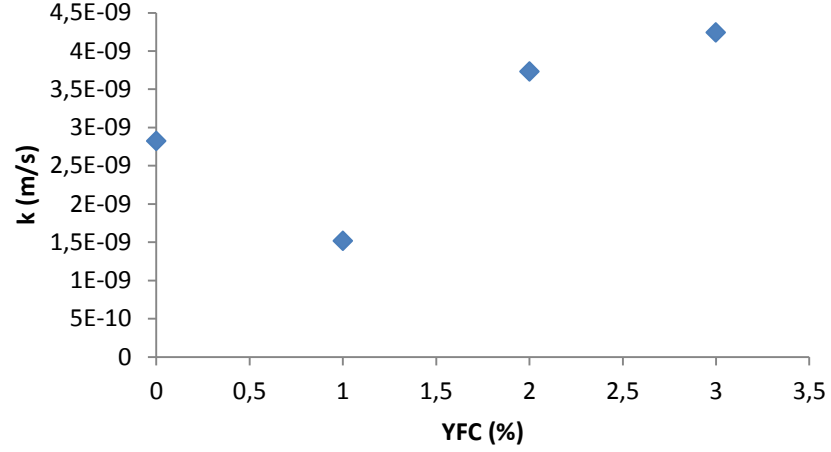
Şekil 6.31’ de görülen geçirimsizlik katsayıları incelendiğinde % 1 oranında yüksek fırın cürufu katkısının tüm karışımlar arasında en düşük geçirimsizlik katsayısına ulaştığı görülmektedir. Bunun üzerinde % 2 ve % 3 değerinde yüksek fırın cürufu katkısı, % 1 YFC katkısına göre geçirimsizliği artırmakla birlikte her halükarda kum ve bentonit karışımlarına nazaran daha düşük geçirimsizlik katsayıları ile sonuçlanmıştır. Şekil 6.29 ve 6.30’da YFC katkısının birim deformasyon (kısılma) ve hacimsel sıkışmayı azalttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.29 : Birim deformasyonun YFC miktarı ile değişimi.

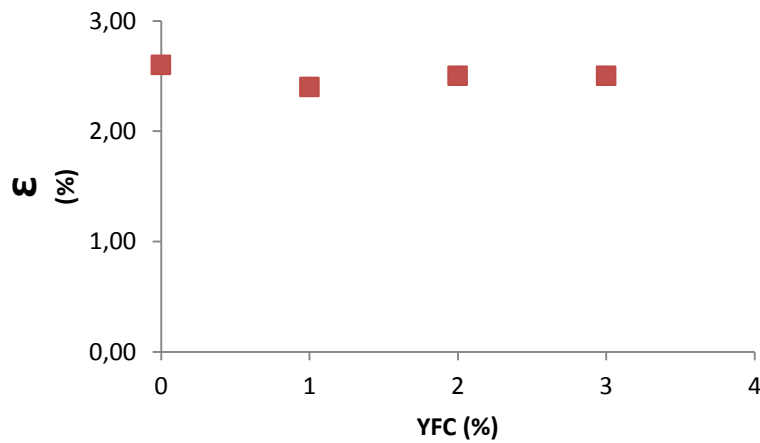


Şekil 6.30 : Hacimsel sıkışma katsayısının YFC ile değişimi.

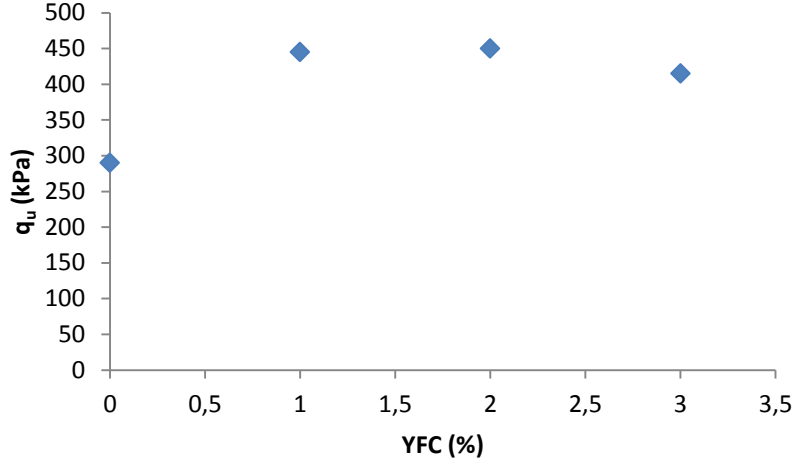


Şekil 6.31 : Geçirimlilik üzerinde YFC etkisi.

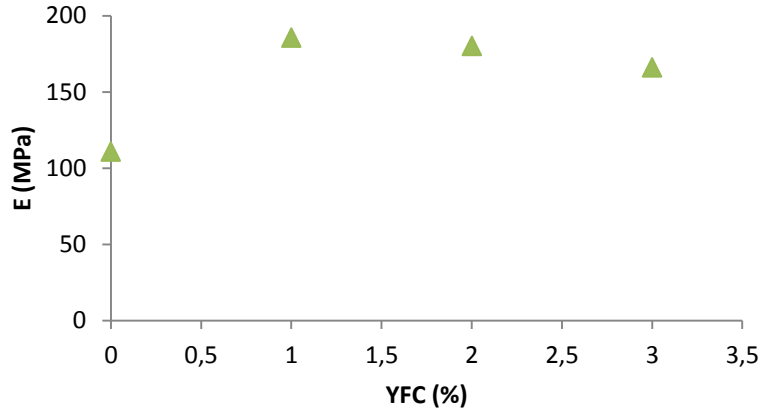
Yüksek fırın cürufu katkısının kum, bentonit ve kireç içeren karışımlar üzerinde serbest basınç dayanımını artırdığı Şekil 6.33’ de görülmektedir. En yüksek elastisite modülü ve serbest basınç dayanımını Şekil 6.33 ve 6.34’te görüldüğü üzere BEFS1 göstermiştir. YFC katkısının birim deformasyon üzerinde önemli bir etkisi olmadığı Şekil 6.32’de görülmektedir. Yalnızca kireç katkılı malzeme ile kıyaslandığında basınç dayanımını önemli ölçüde artıran YFC miktarındaki artışın serbest basınç dayanımı ve buna bağlı diğer parametreler üzerinde önemli etkileri görülmemiştir. %1, % 2 ve % 3 YFC katkılı karışımların serbest basınç dayanımları birbirlerine yakın sonuçlar vermişlerdir. Birim kısalma değerleri açısından önemli farklılıklar ortaya çıkmadığı Şekil 6.32’de görülmektedir.



Şekil 6.32 : Birim deformasyon üzerinde YFC etkisi.



Şekil 6.33 : Serbest basınç dayanımı üzerinde YFC etkisi.



Şekil 6.34 : Elastisite modülü üzerinde YFC etkisi.

Sonuçlar değerlendirildiğinde kireç ve yüksek fırın cürufu katkılarının kum ve bentonit karışımlarına ilave edildikleri takdirde geçirimsizlik değerlerini azalttıkları ve basınç dayanımını artırdıkları sonucuna varılmaktadır. Elde edilen geçirimsizlik değerleri, düzenli depolama tesislerinde aranan maksimum değer olan 10^{-8} m/s değerinin altındadır. Katkıların kum ve bentonit karışımları üzerinde düzenli depolama tesislerinde kullanımını olumsuz yönde etkileyecek herhangi bir etkisi görülmemiş, aksine aranan özellikleri iyileştirdiği ve buna bağlı olarak bu amaçta kullanımlarının uygun olabileceği kanaatine varılmıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Atık yönetimi, günümüzde önem kazanmış bir kavram olarak ele alınmaktadır. Doğa ile insan etkileşimini uygun çerçeveler dahilinde tutmak amacı ile atık yönetimi bilinci toplumca benimsenmelidir. Gerekli çevre bilinci olduğu takdirde basit önlemler alınarak kirlilik ve benzer sorunları önlemek veya en azından azaltmak mümkün olmaktadır.

Atıkların çeşitli yöntemlerle bertarafı mümkündür. Farklı atık türleri için farklı bertaraf yöntemleri tercih edilebilmektedir. Ekonomik açıdan fayda sağlanabilmesi ve çevresel zararın minimuma indirgenmesi için uygun bertaraf yönteminin uygun malzeme üzerinde ve şartlarda uygulanması gerekmektedir. Ancak bir çok yöntem atıkları tamamen ortadan kaldırmak yerine çeşitli prosesler sonucunda yeniden kullanım imkanı yaratmakta veya atıkların yalnızca belirli bir bölümünü yok ederken sürecin bir sonucu olarak yeni atıkların meydana gelmesine neden olmaktadır. Atıkların tamamının kalıcı olarak bertarafını mümkün kılan tek yöntem, atıkların kontrollü bir şekilde önceden hazırlanan bir sahaya serilerek üzerinin yeniden kullanım imkanı bulacak şekilde yine kontrollü olarak örtülmesini gerekli kılan düzenli depolama yöntemidir.

Bu doğrultuda yüksek nüfus yoğunluğuna sahip bölgelerde çöplerin gelişigüzel boş bir alana atıldığı vahşi çöp depolama yöntemi yerine düzenli depolama yönteminin tercih edilmesi gerekmektedir. Ancak düzenli depolama yönteminin de belirlenen kurallar çerçevesinde inşa edilmesi önem arz etmektedir. Özellikle atıklardan sızan çöp suyunun zemine ve dolayısı ile yer altı suyuna karışmasının mutlak olarak engellenmesi sağlanmalıdır. Bu amaçla depo tabanında geçirimsiz tabaka oluşturulur.

Ağırlıklı olarak kil içerikli malzemelerin kullanıldığı geçirimsiz tabakalarda son yıllarda kum-bentonit karışımlarının kullanımı yaygın hale gelmiştir. Geçirimsiz tabakada yer alan malzemelerin geçirimsizliği azaltmak amacı ile çeşitli katkı malzemeleri kullanılabilmektedir.

Kireç ile zemin iyileştirme bir çok alanda olduğu gibi düzenli depolama tesislerinde geçirimsizliği azaltmak amacı ile de uygulanmaya başlamıştır. Belirli bir miktarın üzerinde kireç katkısının zeminlerde geçirimsizliği azalttığı bir çok çalışmada ortaya konmuştur.

Çalışmada katkı olarak ayrıca bir tür endüstriyel atık olarak tanımlanan yüksek fırın cürufunun kullanımı araştırılmıştır. Bu sayede geçirimsiz tabakanın özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra endüstriyel atıkların kullanım olanağı kazanması ve neticede atık yönetimine katkı sağlanması planlanmıştır.

Malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi ile başlanan çalışmaların devamında farklı katkı malzemeleri içeren karışımlar kademeli olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan değişik oranlardaki Kum+bentonit (BES), kum+bentonite+kireç (BESL) ve kum+bentonit+kireç+YFC (BEFS) karışımları üzerinde kompaksiyon, konsolidasyon ve serbest basınç deneyleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmalar sonucunda kullanılan katkıların, zeminlerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları üzerinde önemli etkileri olmadığı anlaşılmıştır. Kireç katkısının optimum su muhtevasını artırdığı ancak maksimum kuru birim hacim ağırlık üzerinde önemli ölçüde etkili olmadığı, YFC katkısının da benzer şekilde hali hazırda kireç katkılı zemin örneği üzerinde kompaksiyon karakteristiklerini önemli ölçüde değiştirmede olduğu anlaşılmıştır.

Kum ve bentonit karışımlarında çalışılan aralıkta (% 40 ile % 60) bentonit içeriğinin artmasının kum ve bentonit karışımlarının geçirimsizliğini azalttığı ortaya konmuştur. Kireç ilavesinin aynı şekilde geçirimsizlik değerinde azalmaya neden olduğu anlaşılmıştır. Yüksek fırın cürufu ise % 1 oranında ilave edildiğinde geçirimsizliği önemli ölçüde azaltmış ancak miktarı arttıkça geçirimsizlikte artış gözlenmiştir. Yine de yüksek fırın cürufu katkılı malzemenin geçirimsizlik değerleri, katkısız kum ve bentonit karışımlarına nazaran daha düşük sonuçlar vermiştir.

Basınç dayanımının artan bentonit miktarı ile azalması beklenirken en yüksek basınç dayanımını % 60 bentonit içeren BES40 sağlamıştır. Kireç katkısı kum ve bentonit karışımlarının dayanımını artırmış, en yüksek değerler ise yüksek fırın cürufu katkılı malzemelerde elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufunun basınç dayanımı üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu görülmüştür. Birim deformasyonların ise kireç ve yüksek

fırın cürufu katkısı ile azaldığı ancak katkı miktarının artışı ile önemli farklılıklara neden olmadığı anlaşılmıştır.

Çalışmalar sonucunda kireç ve kireç+yüksek fırın cürufu katkılarının farklı oranlarda farklı sonuçlar vermesinin yanı sıra genel anlamda kum ve bentonit karışımlarının özelliklerini, düzenli depolama sahalarında kullanılabilirlikleri açısından olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Elde edilen geçirimsizlik değerleri, Türkiye’de düzenli depolama tesislerinde gerekli maksimum değer olan 1×10^{-8} m/s değerlerinden daha düşük olacak şekilde sonuçlanmıştır. Bu durumda katkı malzemelerinin uygulanabilirliği teyit edilmiş olmaktadır.

Zaman ve imkanların kısıtlılığı dolayısı ile çalışmalar genişletilebilir durumdadır. Değişik oranda malzeme içeren karışımların sayıları artırılarak etkilerin daha net olarak araştırılması mümkündür. Çalışmayı geliştirmek amacı ile daha fazla sayıda karışım hazırlanarak optimum malzeme miktarları daha doğru şekilde belirlenebilir. Fiziksel kısıtlamalar dolayısı ile yeterince tekrarlanamayan serbest basınç deneyleri birden fazla defa yapılarak daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca laboratuvar şartlarının doğal koşulları tam olarak temsil edemediği bilinen bir gerçektir. Bu nedenle yapılan çalışmaları daha güvenilir kılmak adına deney sayılarının artırılması sonuçları daha güvenilir kılacaktır.

İnsan gücü ile gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarında çalışmaları gerçekleştiren kişinin yönteminin deney sonuçları üzerinde etkisi büyüktür. Bu nedenle aynı konuda farklı çalışmalar sonuçları destekleyecek veya insan gücüne bağlı olarak meydana gelmiş olabilecek beklenmeyen sonuçların açıklanmasını sağlayacaktır.

Çalışmada laboratuvar şartlarında mevcut kum numunesi kullanılmıştır. Rastgele elde edilen numuneler yerine mevcut bir projeye ait numuneler ile çalışmalar yapılabilir. Yerinde uygulanmayı mümkün kılacak farklı tipte doğal zeminlerin bentonit ile karıştırılarak düzenli depolama tesislerinde uygulanabilirliğinin araştırılması ekonomik ve çevresel açıdan büyük fayda sağlayacaktır.

Atık yönetimi açısından endüstriyel atık olarak meydana gelen diğer malzemelere de kullanım alanı kazandıracak çalışmalar yapılabilir. Çalışmada ticari kireç kullanılmıştır. Endüstriyel atık olarak ortaya çıkan kireç benzer çalışmalarda

kullanılarak zemin özelliklerini ticari kirece göre ne şekilde etkilediği araştırılabilir ve böylece mevcut atıklara kullanım alanı kazandırılması mümkün olabilir.

Çalışmada geçirimlilik katsayıları konsolidasyon deneyi ile belirlenmiştir. Gerek sonuçların karşılaştırılması gerek daha güvenilir neticeler almak amacı ile geçirimlilik katsayısının permeametre kullanılarak belirlenebilir.

Saha koşullarını daha iyi şekilde temsil etmek açısından geçirimlilik tespitinde su yerine kimyasal içerikli sıvılar kullanılarak özellikle çöp suyuna benzer kimyasal çözeltilere maruz bırakıldığında geçirimlilikte meydana gelen değişimlerin incelenmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdelmadjid, L. ve Muzahim, A.M.** (2008). Effect of hydrated lime on the engineering behaviour and the microstructure of highly expansive clay. *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, 3590 – 3598.
- Akcanca, F.** (2009). *Katı atık depoları için geçirimsiz şilte oluşturulmasında kum-bentonit-kireç karışımının kullanılabilirliğinin araştırılması*, (doktora tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Alawaji, H. A.** (1999). Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids, *Applied Clay Science*, 15, 3-4, 411-430.
- Al-Rawi, N.M. ve Awad, A.A.A.** (1981). Permeability of lime stabilized soils. Proc. American Society of Civil Engineers, *Journal Transportation Engineering Division*, 107 (TEI), 25–35.
- Al-Tabbaa, A. ve Arivinthan, T.** (1998). Natural clay-shredded tire mixtures as landfill barrier materials. *Waste Management*, 18, 9-16.
- ASTM D1557**, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort,” American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D-698**, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort,” American Society for Testing and Materials, USA.
- Benson, C. H., Zhai, H. and Wang, X.** (1992). Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 2, 366-387.
- Bozbey, İ. S. ve Güler, E.** (2002). Deponi sahalarda kullanılan kil geçirimsiz kaplamalarının kimyasal ve mekanik yöntemlerle iyileştirilmesi, TÜBİTAK İNTAG, Proje No. 718;197I013, 1-136.
- Chapuis, R.P.** (1990). Sand–bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 47–57.
- Cho, W. J., Lee, J. O. ve Chun, K. S.** (1999). The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite, *Applied Clay Science*, 14, 47-58.
- Daniel, D.E.** (1993). Early days of enviromental geotechnology, *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, Edited by Daniel, D.E., Chapman&Hall Publ., London, UK. 3-14.
- Daniel, D.E. ve Koerner, R. M.** (2007). Waste Containment Facilities, *Second Edition Guidance for Construction Quality Assurance + Construction Quality Control of Liner + Cover Systems*. ASCE Press.

- Demir, S. Ve Kılıç, M.** (2010). Şişen zeminlerin tanımlanması ve zemin iyileştirme yöntemleri, *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27 (1), 95-104.
- Dunn, R. J. ve Mitchell, J. K.** (1984). Fluid conductivity testing of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.11. 1648-1665.
- Fleming, L. N. ve Inyang, H. I.** (1995). Permeability of clay-modified fly ash under thermal gradients, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 7, 3, 178-182.
- Galvao, T. C. B., Elsharief, A. and Simoes, G. F.** (2006). Effects of lime on permeability and compressibility of two tropical residual soils. *ASCE*, 130:8 (881).
- Gleason, M. H., Daniel, D. E., Eykholt, G. R.** (2007). Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(5), 438-445.
- Haug, M.D., Wong, L.C.** (1992). Impact of molding water content on hydraulic conductivity of compacted sand-bentonite. *Canadian Geotechnical Journal* 29(2), 253 – 262.
- Hekimoğlu, S.** (1996). *Kil zeminlerin şişme davranışlarının incelenmesi*, (yüksek lisans tezi), Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Holopainen, P.** (1984). Crushed aggregate-bentonite mixtures as backfill material for repositories of low and intermediate level radioactive wastes, *Engineering Geology*, 21, 3-4, 239-245.
- Kaya, A., Durukan, S., Ören A. H., Yukselen Y.** (2006). Bentonit–zeolit karışımlarının mühendislik özelliklerinin belirlenmesi, *IMO Teknik Dergi*, 3879-3892.
- Kayabalı, K.,** (1997). Engineering aspects of a novel landfill liner material: bentonite amended natural zeolite, *Engineering Geology*, 46, 105-114.
- Kenney, T.C., Van Veen, W.A., Swallow, M.A., and Sungalia , M.A.** (1992). Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 364-374.
- Khattab, S.A.A., Al-Juari, K.A.K. and Al-Kiki, I.M.** (2006). Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime. *Al-Rafidain Engineering*, 16, 102-116.
- Komine, H.** (2004). Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites. *Engineering Geology*, 71, 265–279.
- Kumar, B., R., P. , Walia, S. and Bajaj, A.** (2007). Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 19(3), 242-248.
- Lakshmikantha, H. ve Sivapullaiah, P. V.** (2006). Relative performance of lime stabilized amended clay liners in different pore fluids, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 5, 1425-1448.
- Luczak-Wilamowska, B.** (2002). Neogene clays from poland as mineral sealing barriers for landfills: experimental study, *Applied Clay Science*, 21, 33-43.

- Mitchell, J. K., Hooper, D. R. ve Campanella, R. G.** (1965). Permeability of compacted clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 91, 4, 41-65.
- Nhan, C. T., Graydon, J. W. ve Kirk, D. W.** (1996). Utilizing coal fly ash as a landfill barrier material, *Waste Management*, 16, 7, 587-595.
- Palmer, B.G., Edil, T.B. ve Benson, C.H.** (2000). Liners for waste containment constructed with class F and C fly ashes, *Journal of Hazardous Materials*, 76, 193-216.
- Prashanth, J.P., Sivapullaiah, P.V., ve Sridharan, A.** (2001). Pozzolanic fly ash as a hydraulic barrier in land fills, *Engineering Geology*, 60, 245-252.
- Smith, D.C. ve Fey, M.V.** (1996). Chemical manipulation of soil for sealing landfills, *Applied Geochemistry*, 11, 1-2, 325-329.
- Resmi Gazete, (1991).** *Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği*, Başbakanlık Basımevi 20814.
- Tashiro, S., Fujiwara, A. and Senoo, M.** (1998). Study on the permeability of engineered barriers for the enhancement of a radioactive waste repository system, *Nuclear Technology*, 121, 14-23
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı** (2010). Düzenli Depolama ve Tıbbi Atık Bertaraf Tesisleri İşletme ve Kontrol Kılavuzu.
- Tsai, T. ve Vesilind, P. A.** (1998). A new landfill liner to reduce ground water contamination from heavy metals, *Journal of Environmental Engineering*, 24 (11), 1061-1065.
- Tuncan, A., Tuncan, M., Koyuncu, H., ve Guney, Y.** (2003). Use of natural zeolites as a landfill liner. *Waste Manegement and Research*, 21, 54-61.
- U.S. Environmental Protection Agency,** (1992). Criteria for solid waste disposal facilities.
- Velosa, C. L. ve Colmenares, J. E.** (2006). Analysis of the volume change behavior of expansive compacted soils, *Unsaturated Soils*, 189, 916-927.
- Yarbaşı, N., Kalkan, E. ve Akbulut, S.** (2006). Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. *Cold Regions Science and Technology*, 48, 44-54
- Yıldız, M.** (1998). *Katı Atık Depolarında Taban Malzemesinin Hidrolik ve Mukavemet Özelliklerinin İyileştirilmesi*, (doktora tezi), Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Url-1** < <http://eski.yerelnet.org.tr> > alındığı tarih: 20.04.2012
- Url-2** < <http://www.capco.co.uk> > alındığı tarih: 20.04.2012
- Url-3** < <http://www.cevkainsaat.com> > alındığı tarih: 20.04.2012
- Url-4** < <http://www.mozturk.net> > alındığı tarih: 20.04.2012
- Url-5** < <http://www.thomassci.com> > alındığı tarih: 20.04.2012

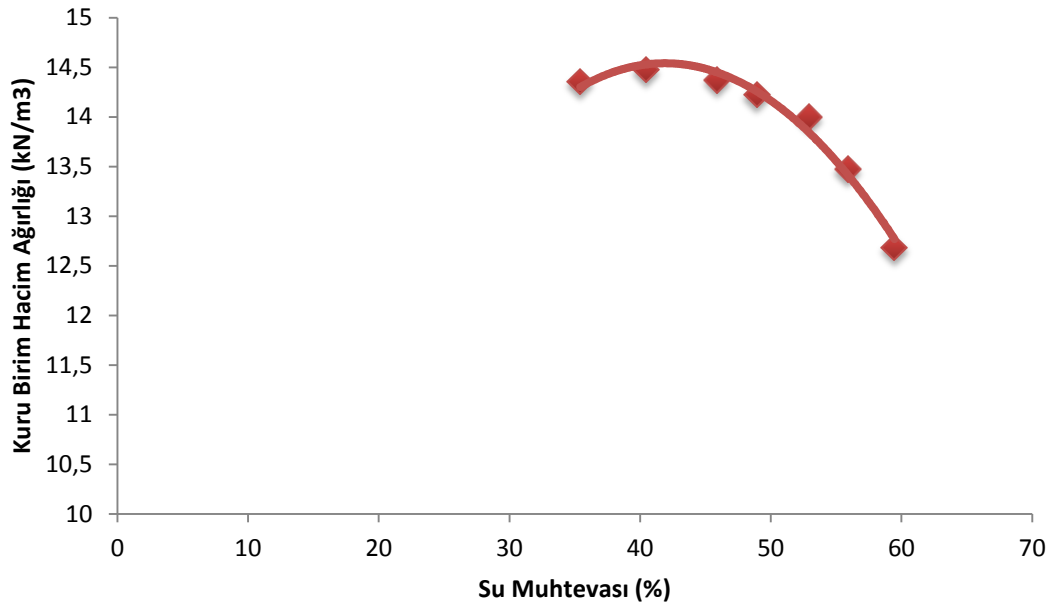
EKLER

EK A : Kompaksiyon Sonuçları

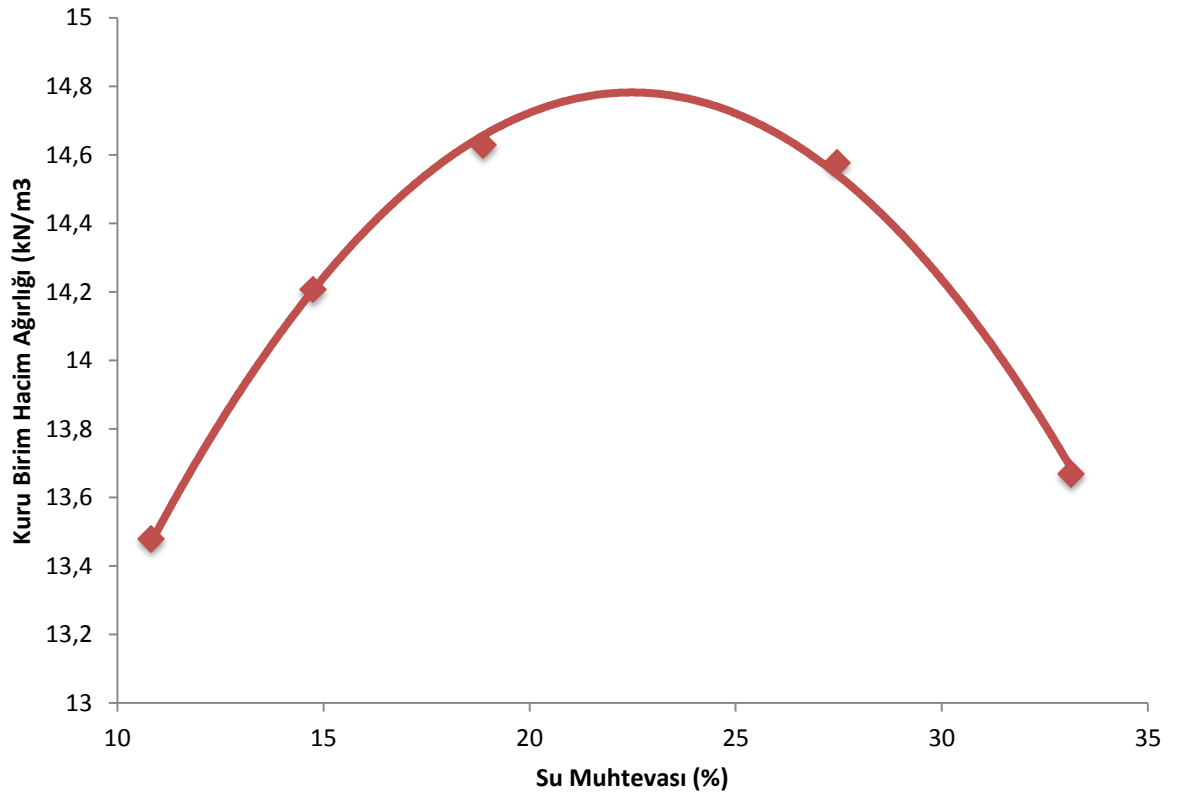
EK B : Konsolidasyon Sonuçları

EK C : Serbest Basınç Sonuçları

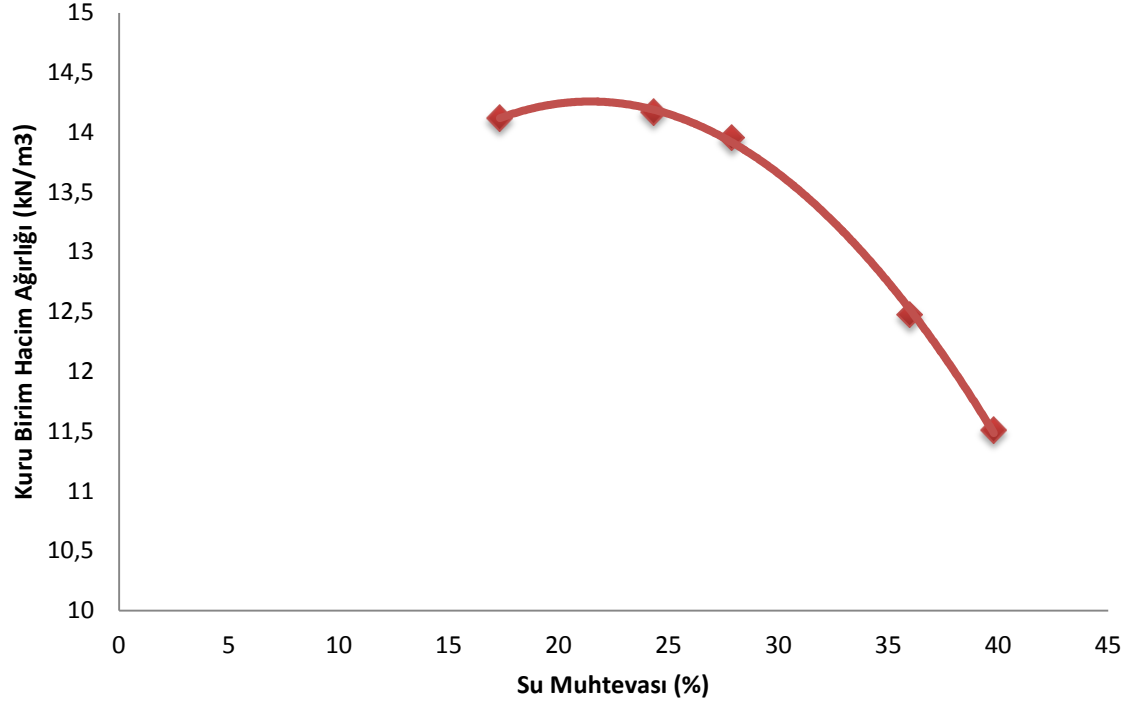
EK A



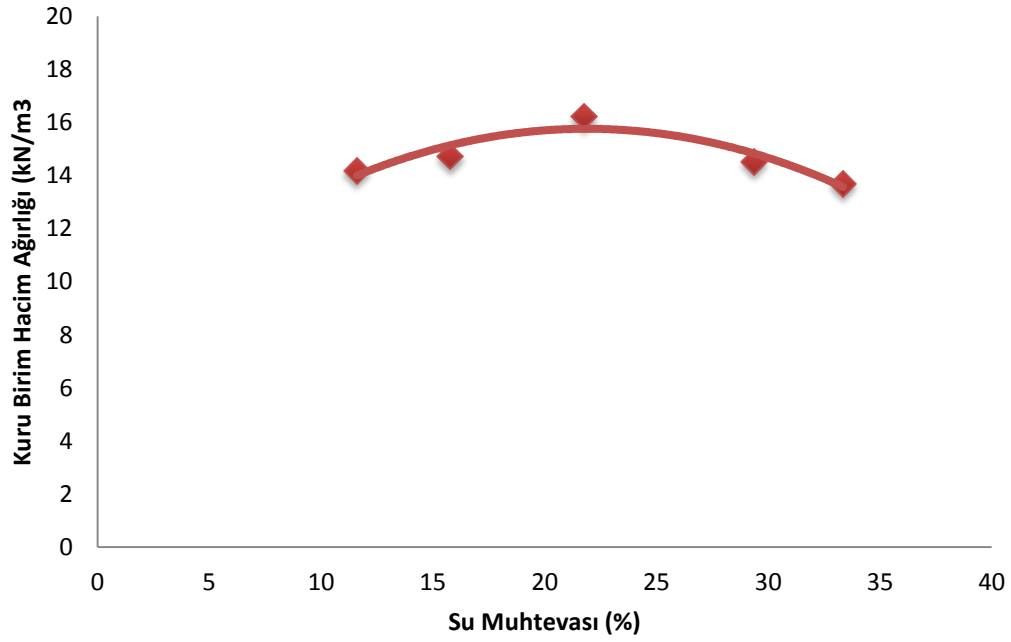
Şekil A.1 : Bentonit kompaksiyon deneyi sonuçları



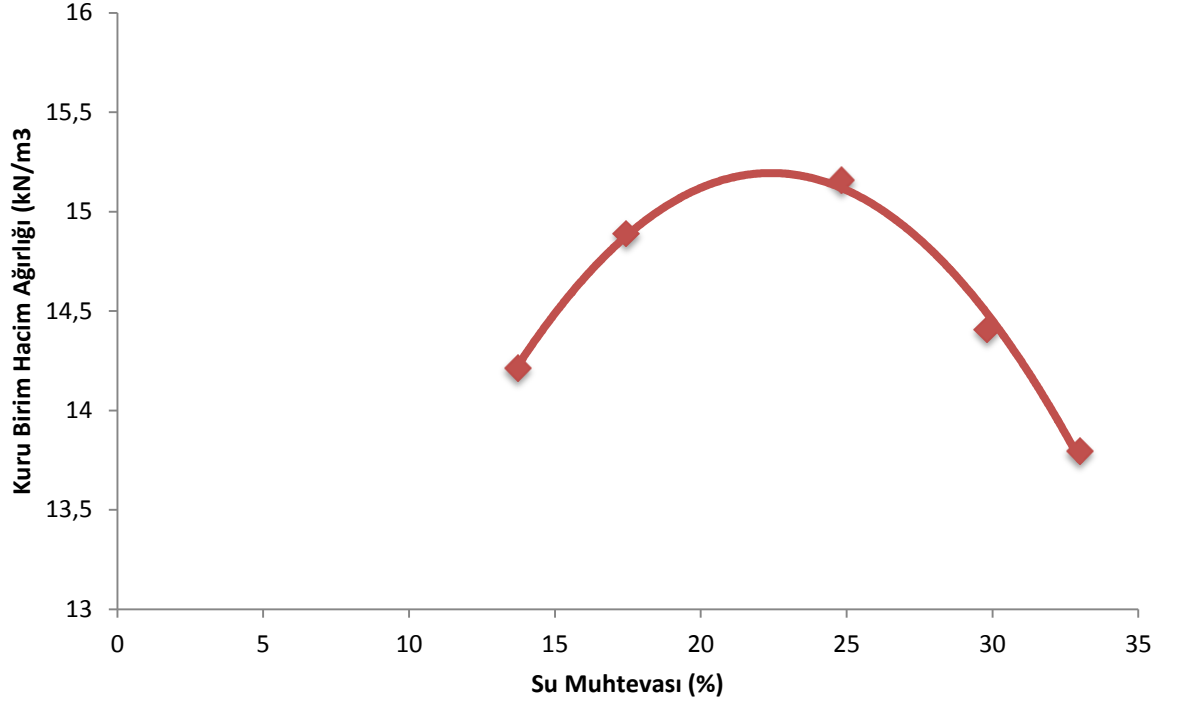
Şekil A.2 : BES40 kompaksiyon deneyi sonuçları



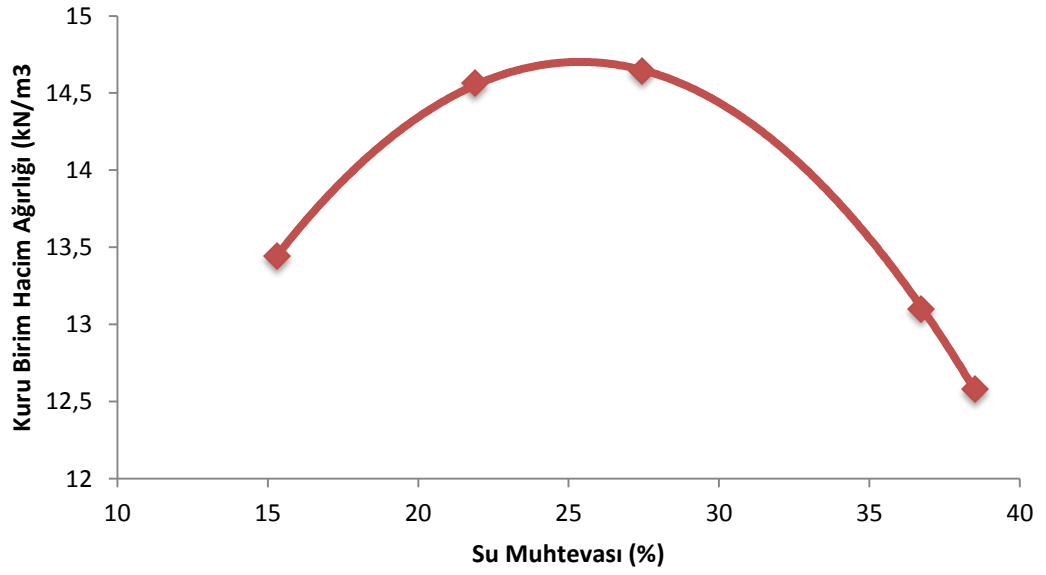
Şekil A.3 : BES50 kompaksiyon deneyi sonuçları



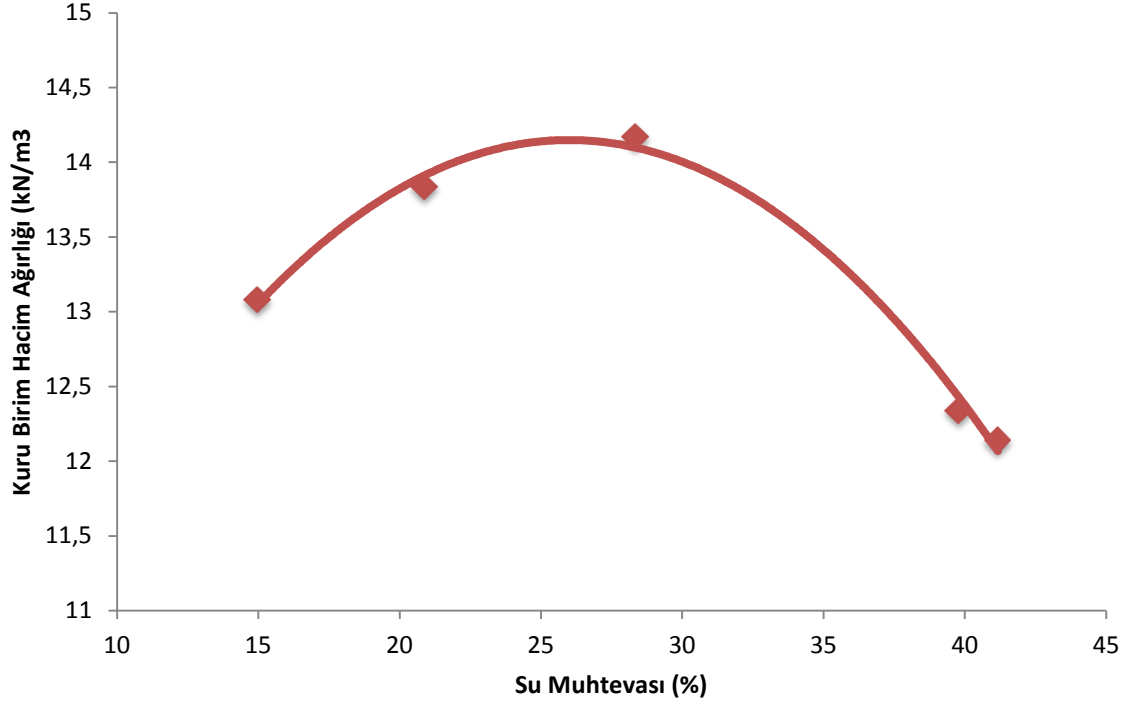
Şekil A.4 : BES50 kompaksiyon deneyi sonuçları



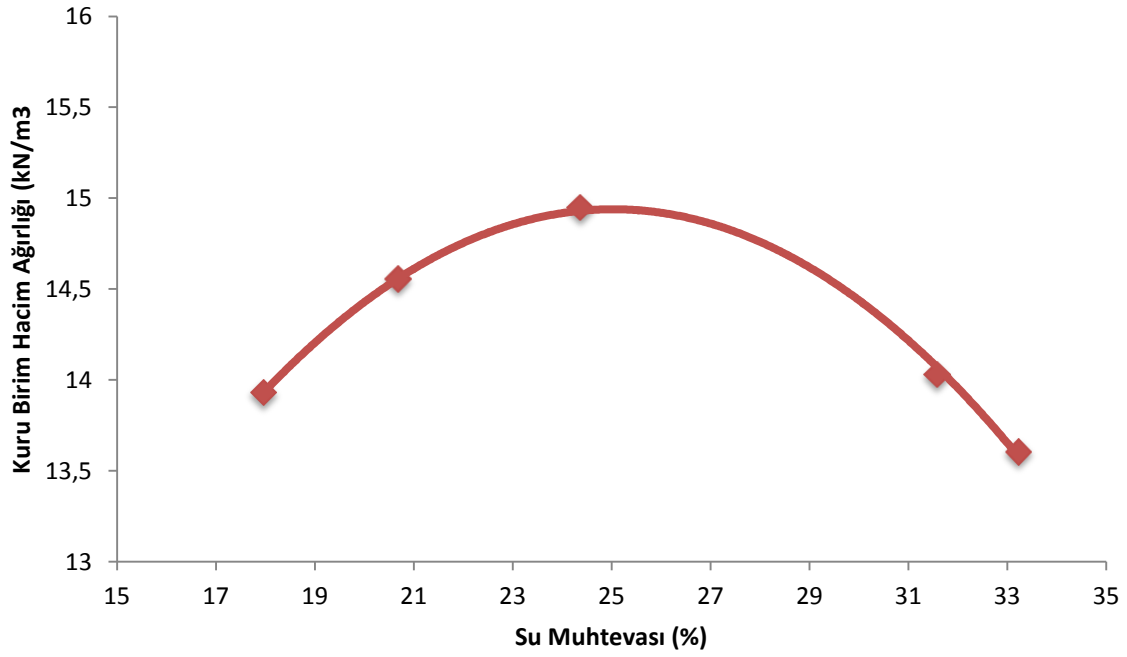
Şekil A.5 : BESL2 kompaksiyon deneyi sonuçları



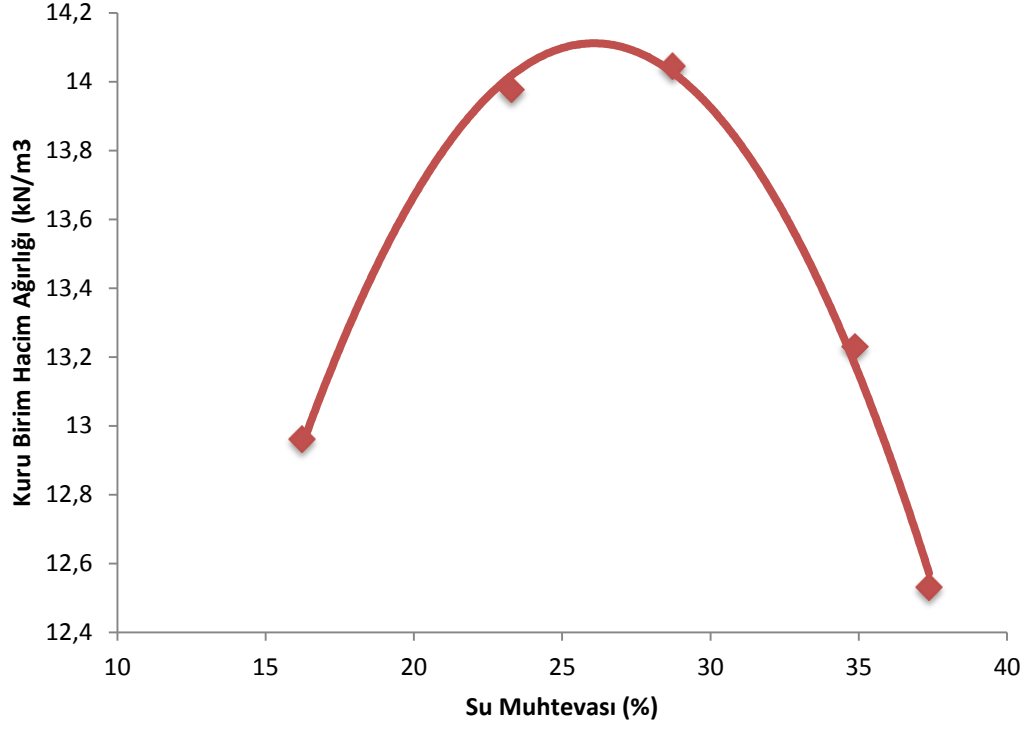
Şekil A.6 : BESL4 kompaksiyon deneyi sonuçları



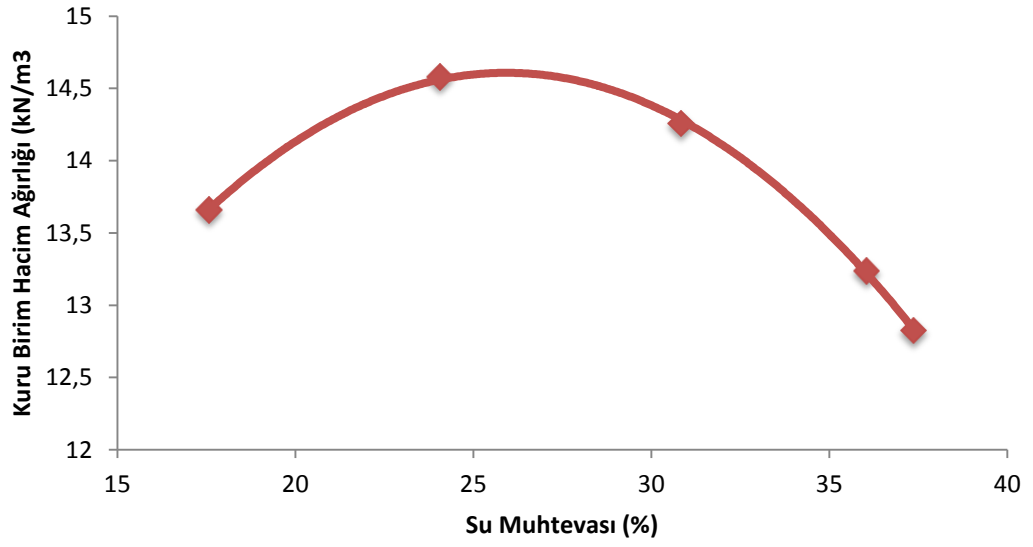
Şekil A.7 : BESL6 kompaksiyon deneyi sonuçları



Şekil A.8 : BEFS1 kompaksiyon deneyi sonuçları

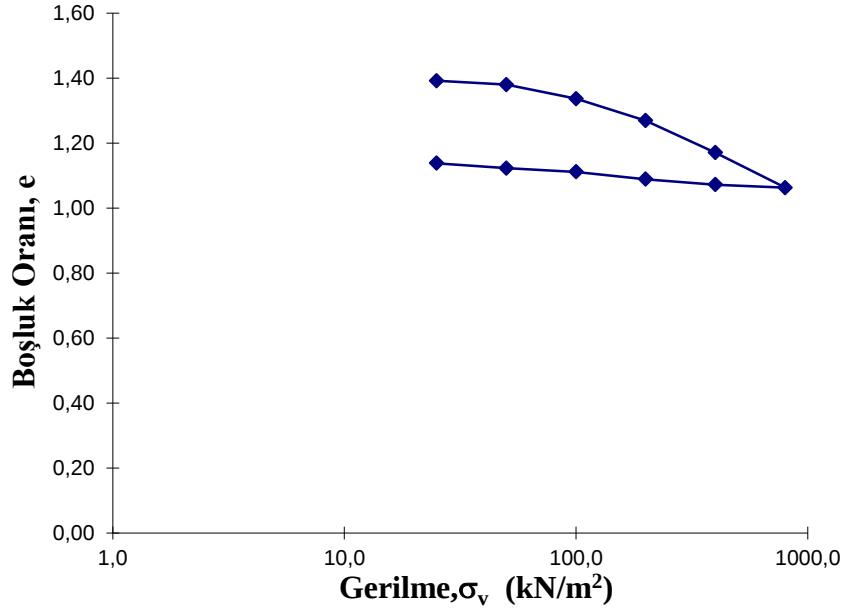


Şekil A.9 : BEFS2 kompaksiyon deneyi sonuçları

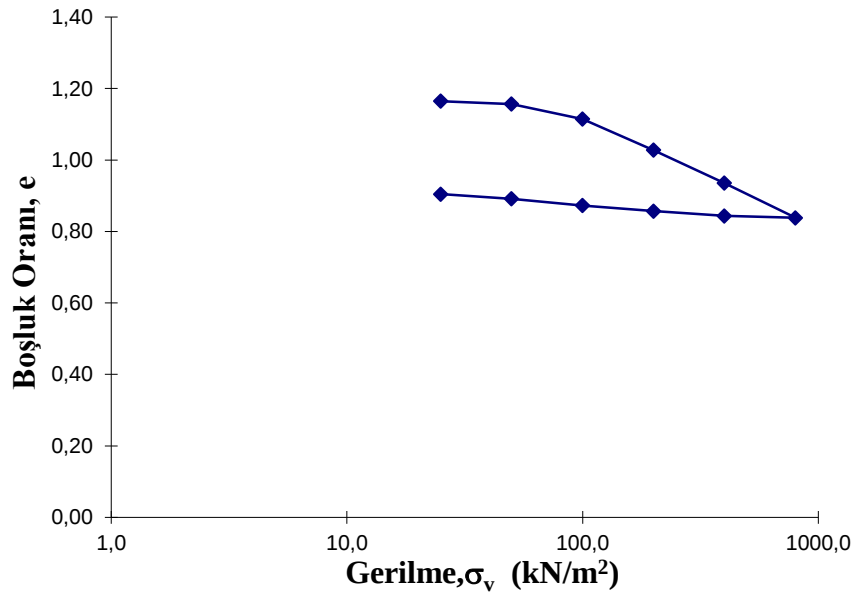


Şekil A.10 : BFS3 kompaksiyon deneyi sonuçları

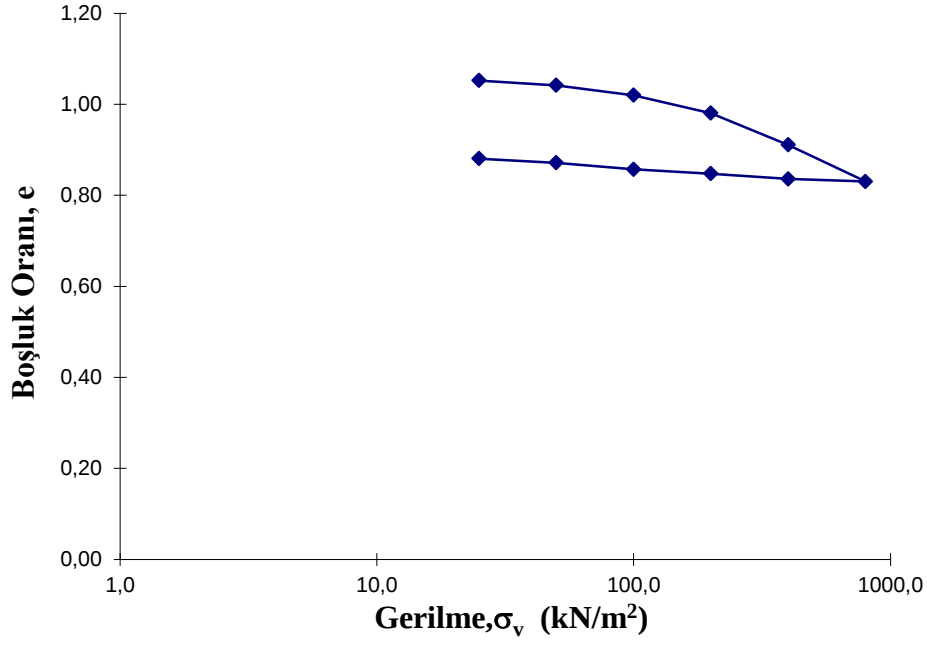
EK B



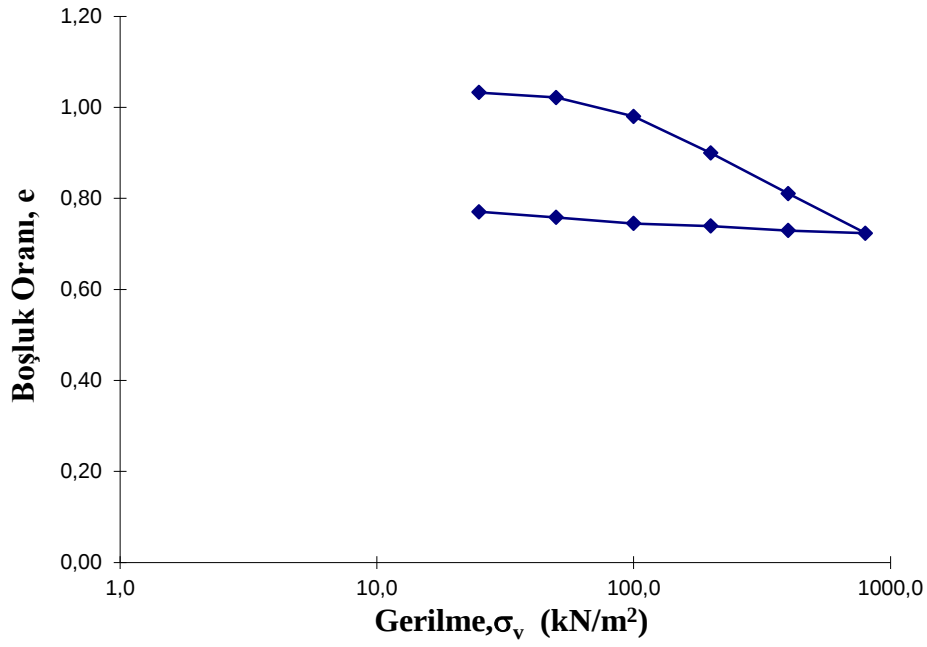
Şekil B.1 : Bentonit konsolidasyon sonuçları



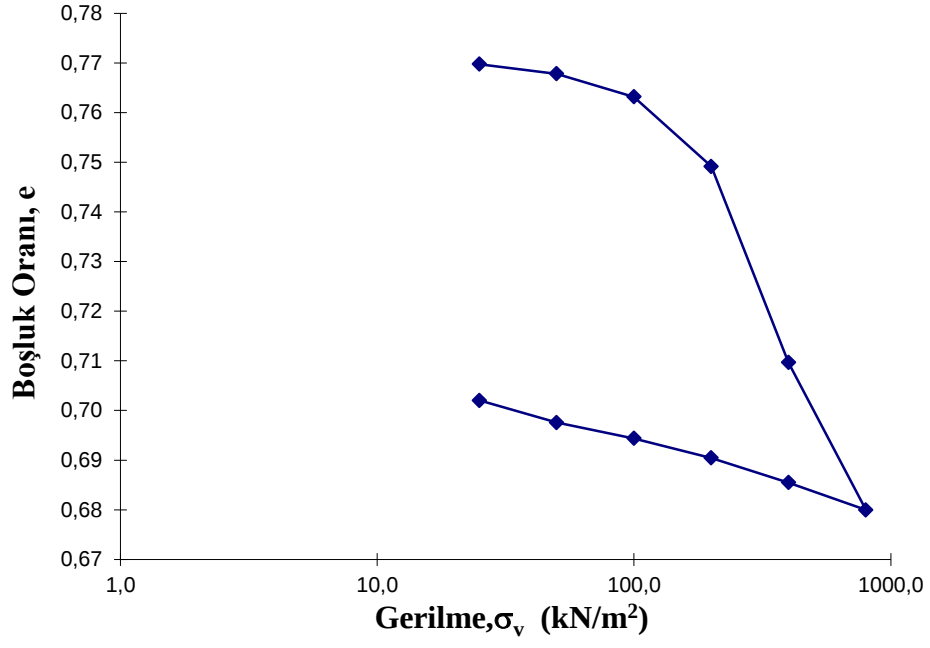
Şekil B.2 : BES40 konsolidasyon sonuçları



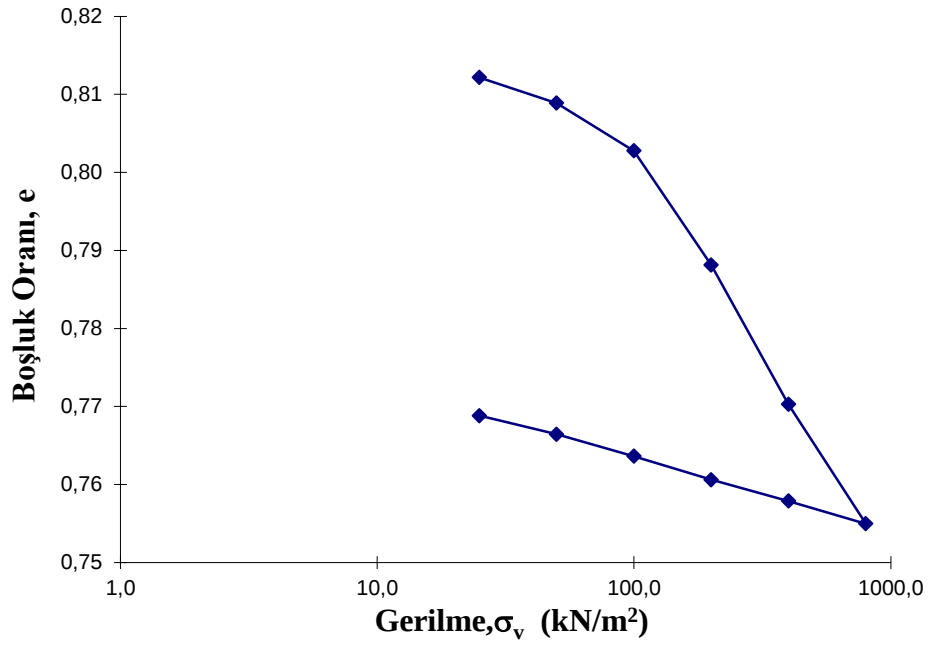
Şekil B.3 : BES50 konsolidasyon sonuçları



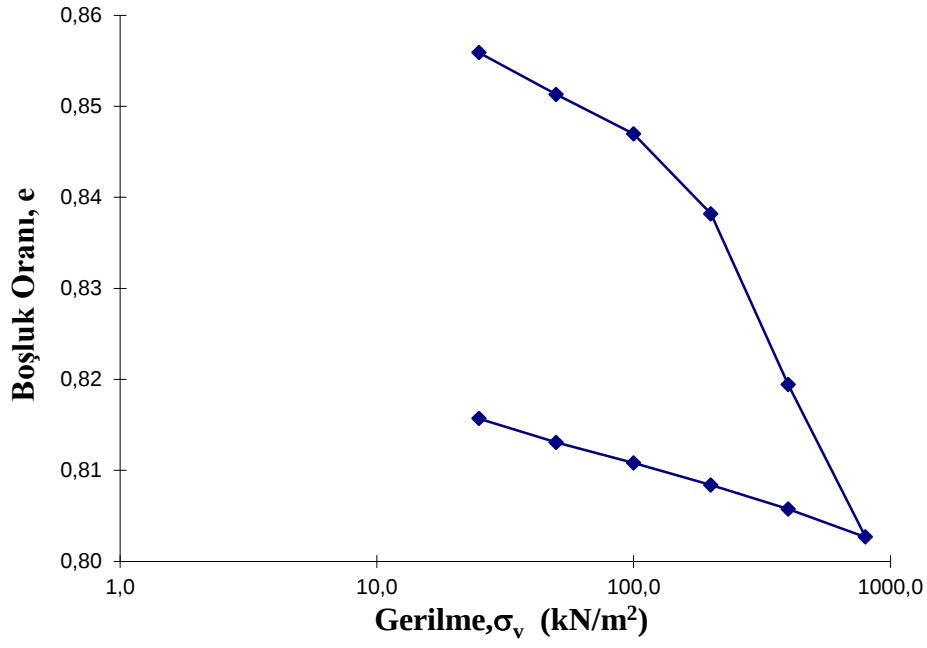
Şekil B.4 : BES60 konsolidasyon sonuçları



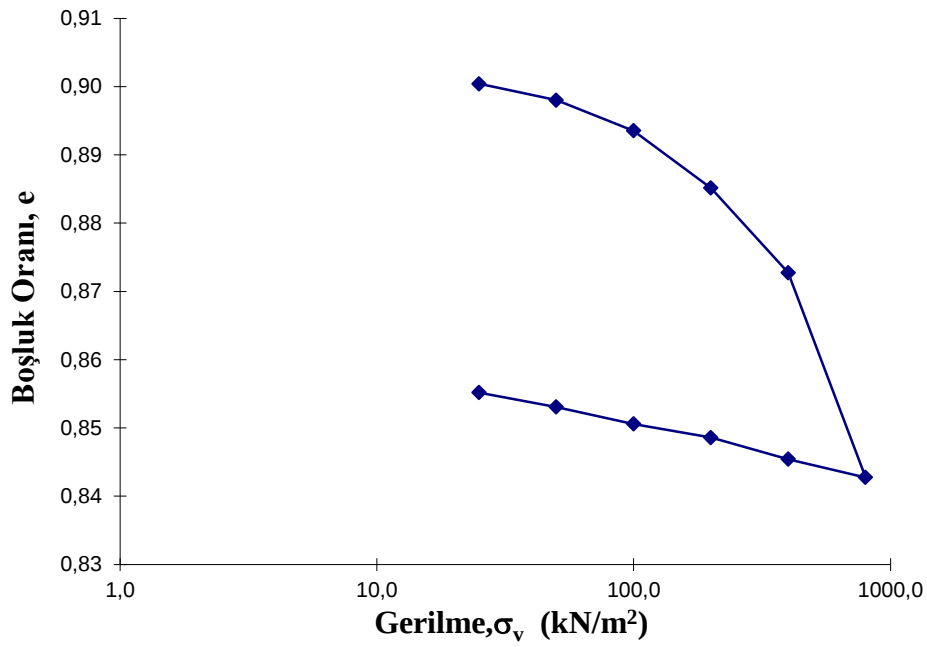
Şekil B.5 : BESL2 konsolidasyon sonuçları



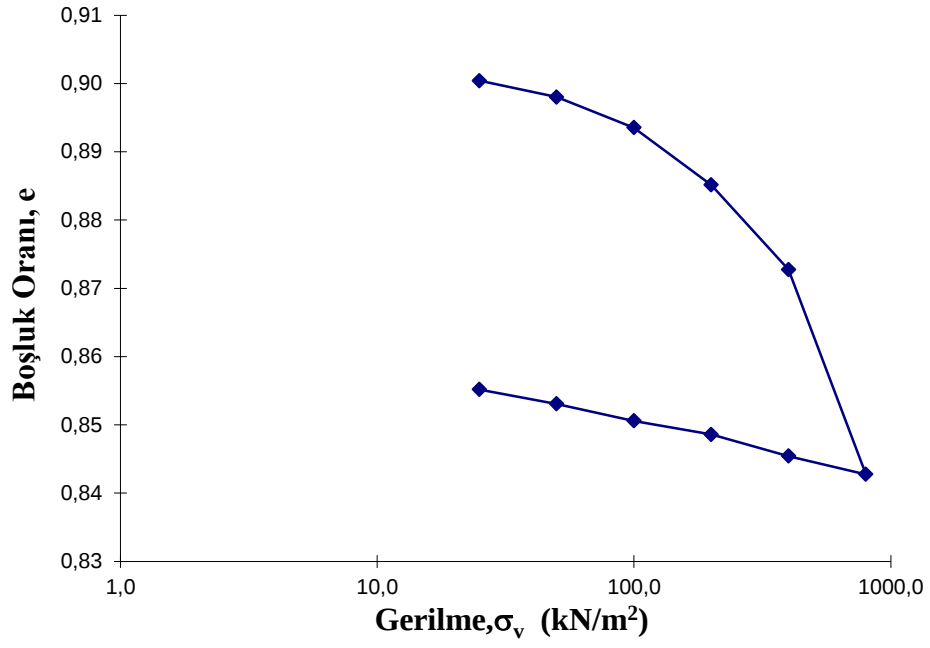
Şekil B.6 : BESL4 konsolidasyon sonuçları



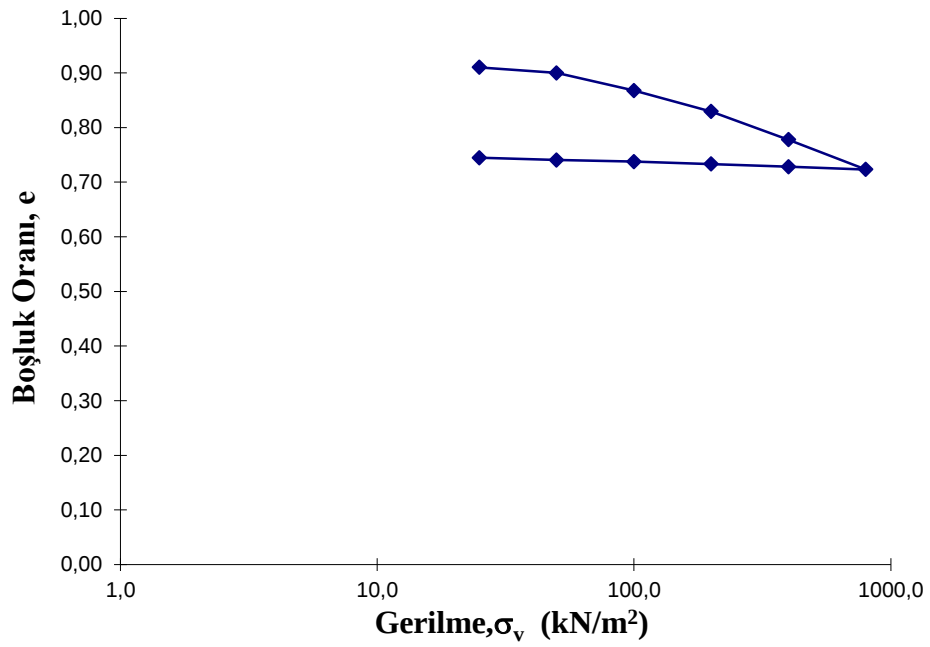
Şekil B.7 : BESL6 konsolidasyon sonuçları



Şekil B.8 : BEFS1 konsolidasyon sonuçları

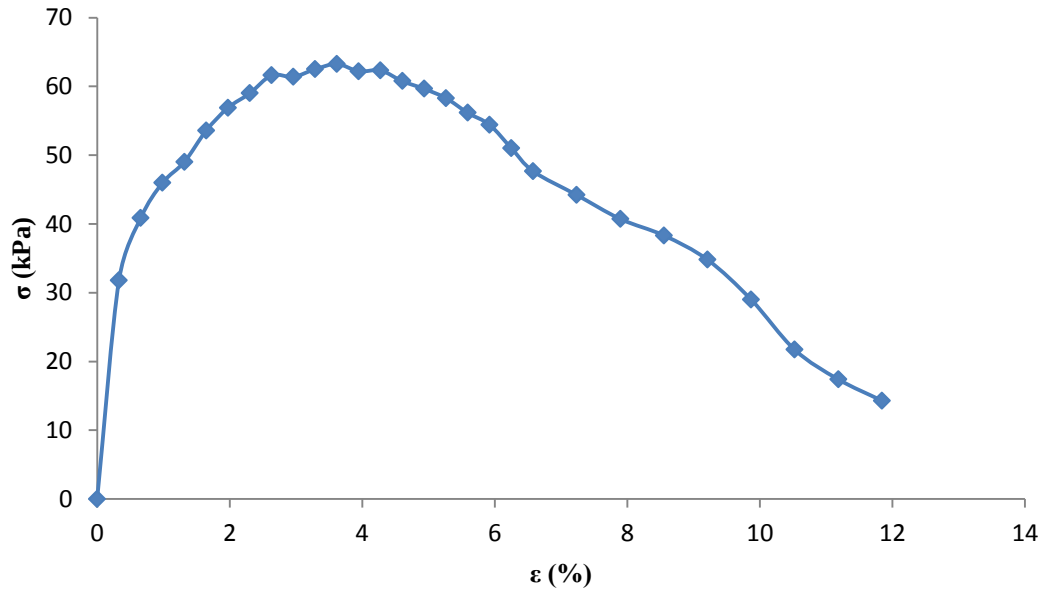


Şekil B.9 : BEFS2 konsolidasyon sonuçları

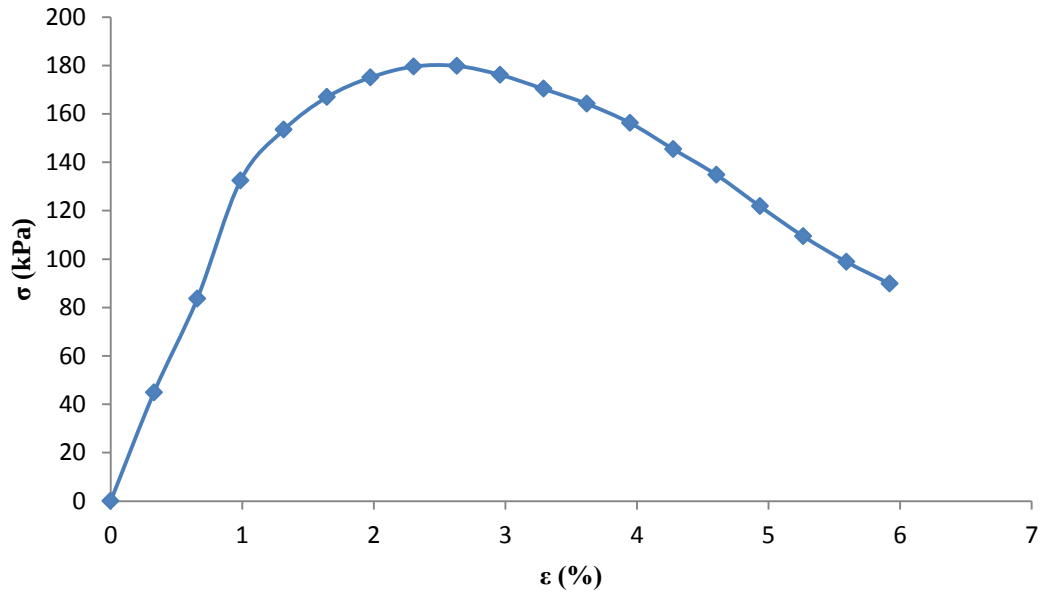


Şekil B.10 : BEFS3 konsolidasyon sonuçları

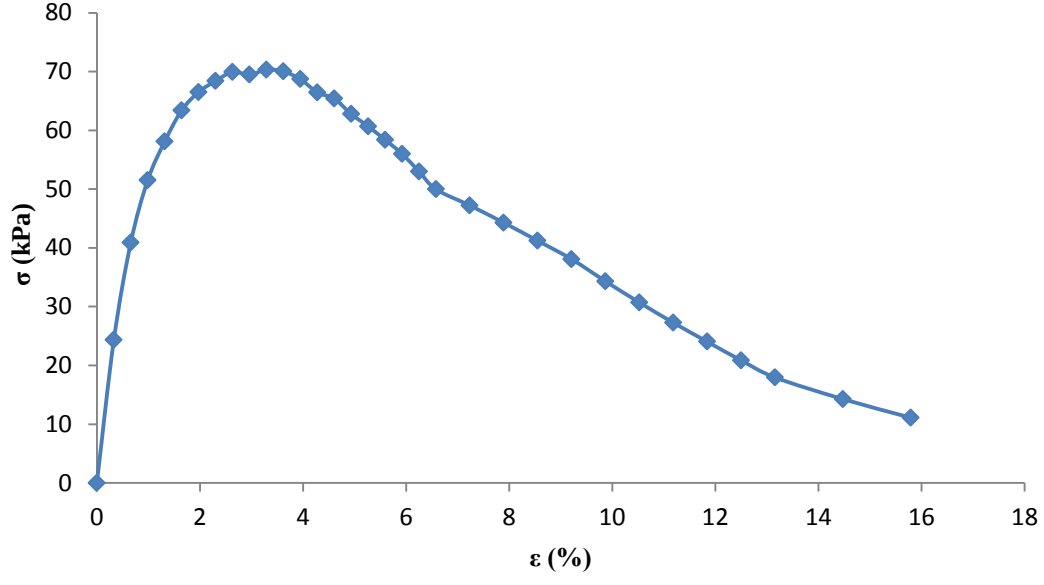
EK C



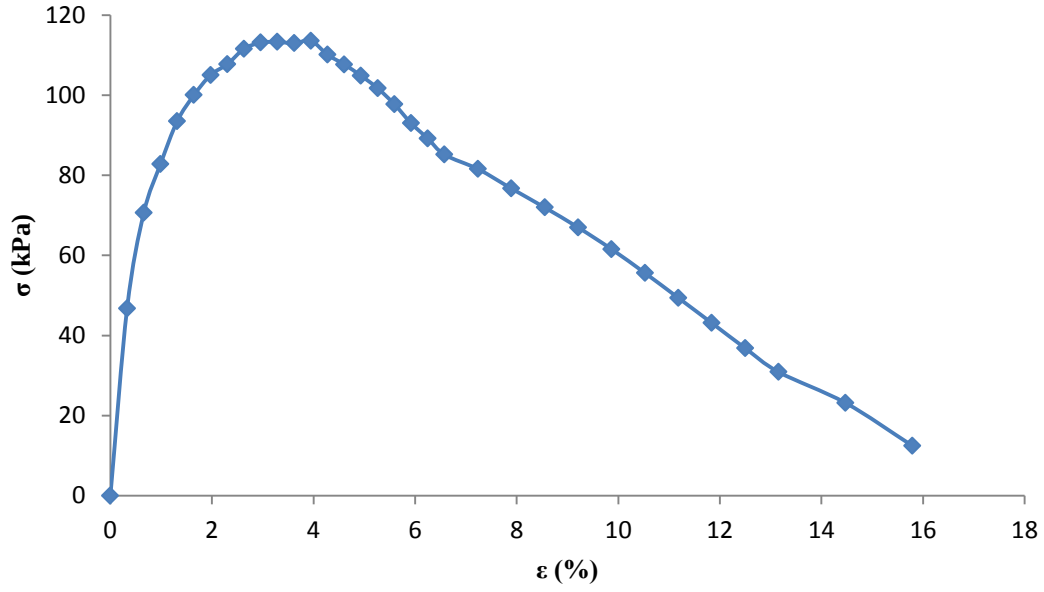
Şekil C.1 : Bentonit serbest basınç sonuçları



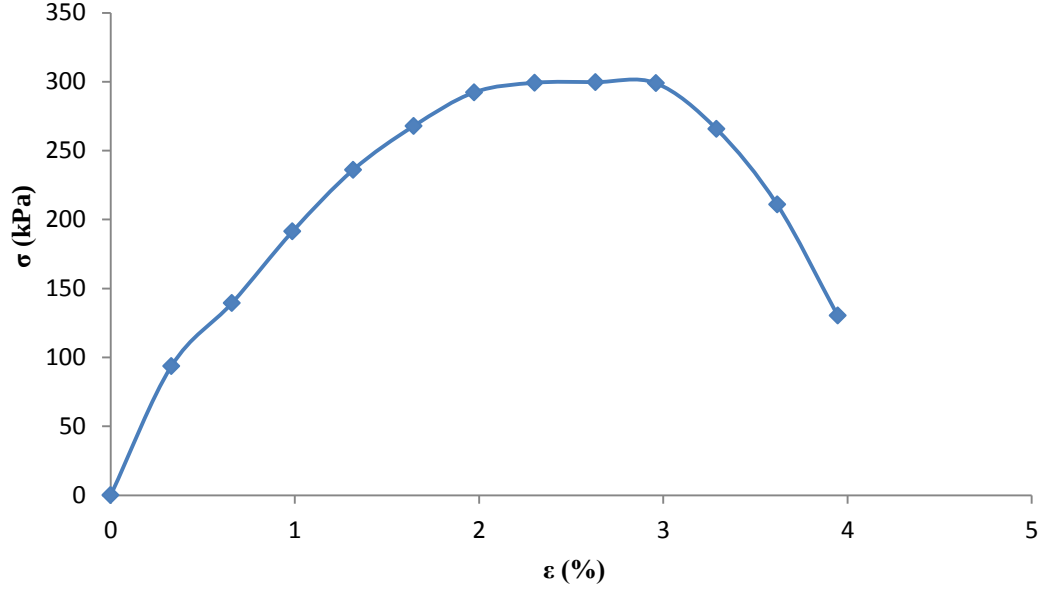
Şekil C.2 : BES40 serbest basınç sonuçları



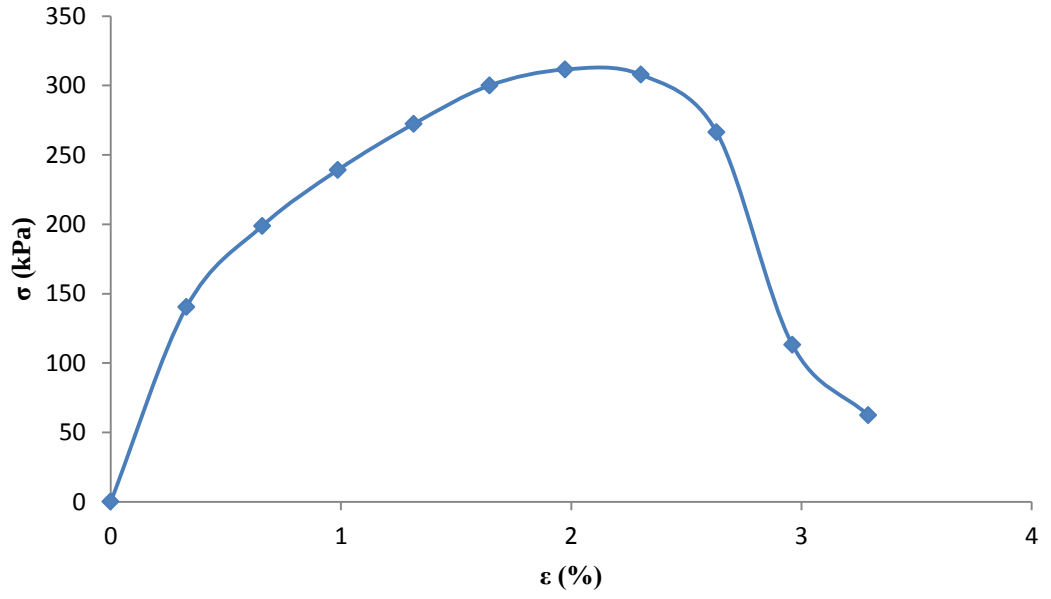
Şekil C.3 : BES50 serbest basınç sonuçları



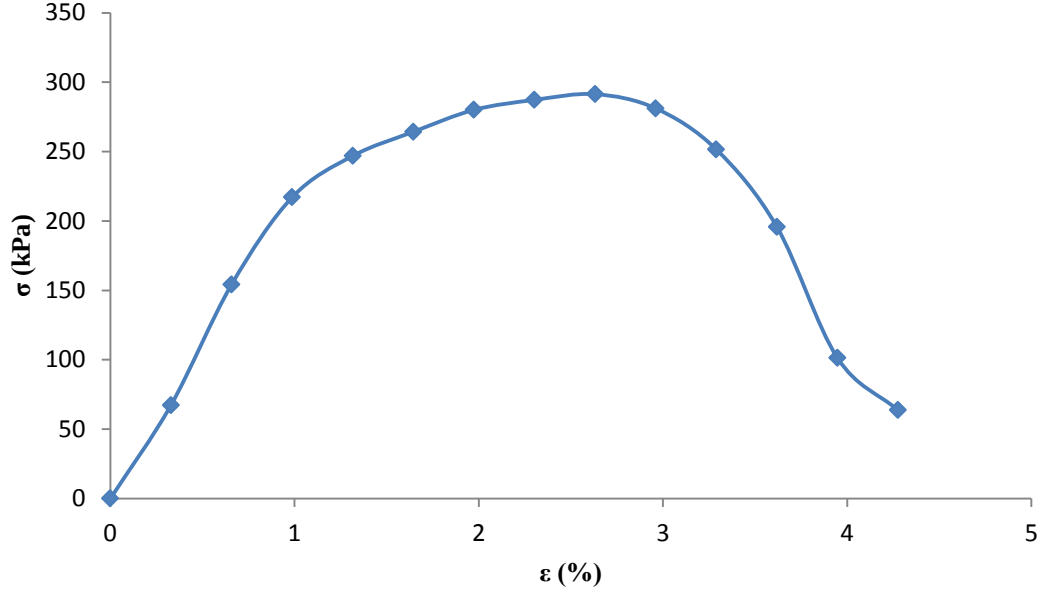
Şekil C.4 : BES60 serbest basınç sonuçları



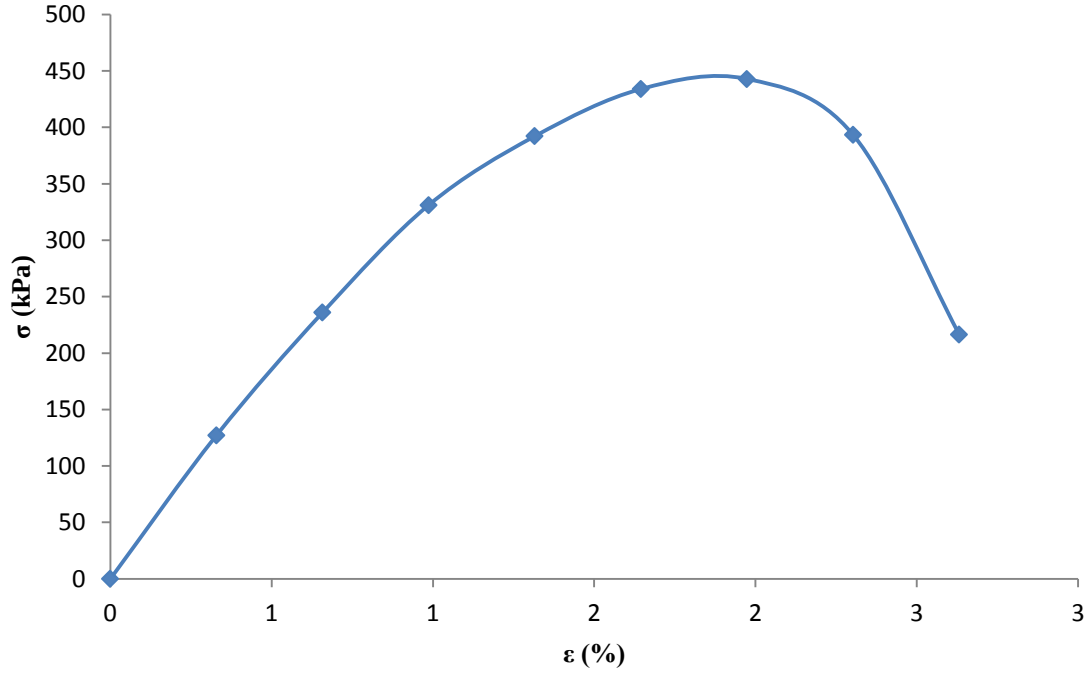
Şekil C.5 : BESL2 serbest basınç sonuçları



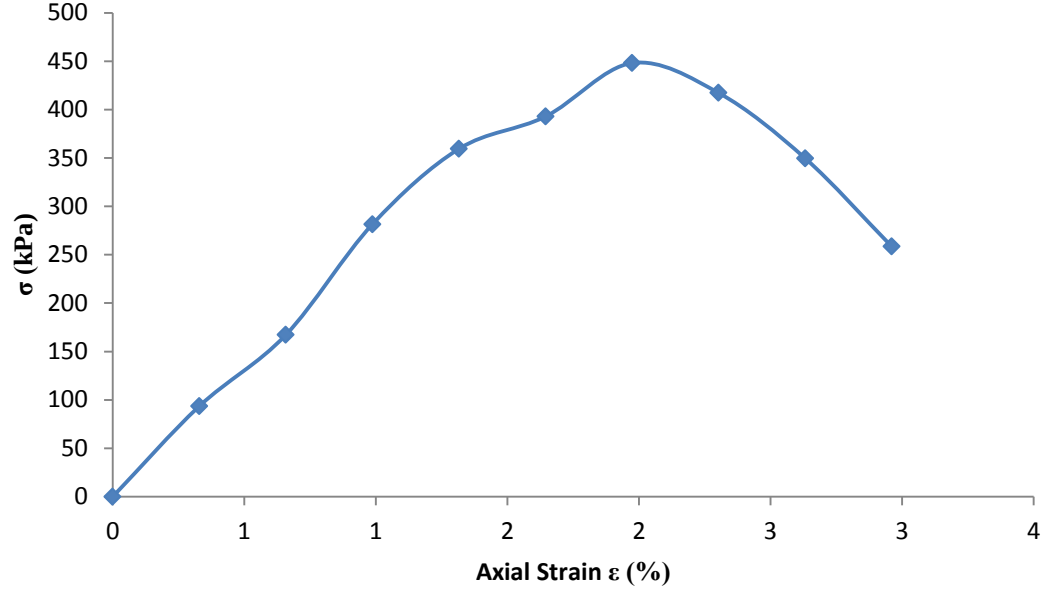
Şekil C.6 : BESL4 serbest basınç sonuçları



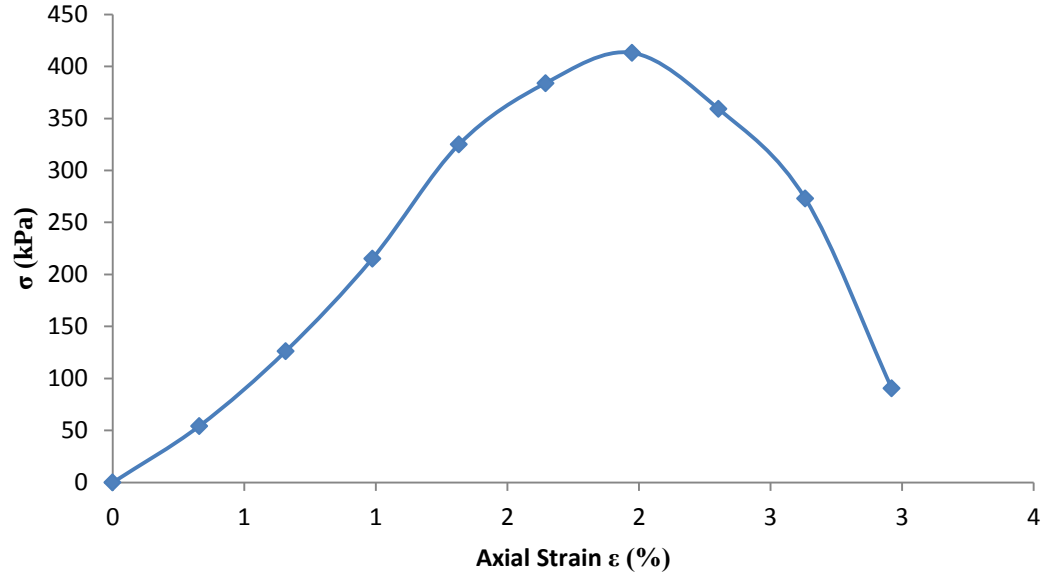
Şekil C.7 : BESL6 serbest basınç sonuçları



Şekil C.8 : BEFS1 serbest basınç sonuçları



Şekil C.9 : BEFS2 serbest basınç sonuçları



Şekil C.10 : BEFS3 serbest basınç sonuçları

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ayşe Neva İncesu

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1987

Adres: Kadıköy / İstanbul

E-Posta: neva.incesu@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği