

UÇUCU KÜL İLE ZEMİN STABİLİZASYONU

TEKNİK
DOKÜMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Murat ÇAKIR

Enstitü No: 501970301011

98397

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Ekim 1999

Tezin Sunulduğu Tarih : 3 Kasım 1999

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Oğuz TAN

Diğer Juri Üyeleri : Prof. Dr. Ergün TOĞROL

Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU

KASIM 1999

4.3.1 Deney Numunelerinin Gruplanması	43
4.3.2 Optimum Su Muhtevalarının Belirlenmesi	44
4.3.2.1 Kil + %10 Uçucu Kül Numunesi İçin Standart Proktor Deneyi	44
4.3.2.2 Kil + %20 Uçucu Kül Numunesi İçin Standart Proktor Deneyi	46
4.3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi Numunelerinin Hazırlanması	48
4.3.4 Numunelerin Saklanması	48
4.4 Üç eksenli Basınç Deneyi	49
4.4.1 Konsolidasyonsuz – Drenajsız Deney Yöntemi	49
5. DENEYSEL SONUÇLAR	51
5.1 Standart Proktor Deneyleri	51
5.2 Üç Eksenli Basınç Deneyleri	53
6. YORUM VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	62
EKLER	64
ÖZGEÇMİŞ	74

KISALTMALAR

ASTM : American Standarts of Testing Materials (A.B.D. Test standartları)

CBR : California Bearing Ratio

LOI :Lost on İgnition (Kızdırma Kaybı)

TS :Türk Standartları

UK :Uçucu Kül

UU : Undrained-Unconsolidated (Drenajsız-Konsolidasyonsuz)

US EPA :United States Eviroment Protection Agency (A.B.D. Çevre koruma
Örgütü)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Uçucu kül ve taban külünün kimyasal kompozisyonları.....	4
Tablo 2.2 : ASTM C618 ve TS 639 sınırları.....	5
Tablo 2.3 : Bazı Türkiye uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları.....	6
Tablo 2.4 : Bazı Türkiye uçucu küllerinin fiziksel özellikleri.....	6
Tablo 3.1 : Kumlu zeminin uçucu kül ile ıslahı	7
Tablo 3.2 : Arıtma çamuru ve uçucu kül karışımları.....	15
Tablo 3.3 : Üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	18
Tablo 3.4 : Uçucu kül ilaveli Hawaii killерinin dayanımları.....	22
Tablo 3.5 : Arıtma çamuru ve uçucu kül karışımlarına ait permeabilite katsayıları.....	35
Tablo 3.6 : Tayvan kili,uçucu kül ve cüruf karışımlarına ait permeabilite katsayıları.....	37
Tablo 4.1 : Deney numuneleri.....	44
Tablo 4.2 : Numunelerin su muhtevalarında meydana gelen değişim.....	49
Tablo 5.1 : Numunelerin kompaksiyon özellikleri.....	51
Tablo 5.2 : Üç eksenli basınç deneyi numuneleri.....	53
Tablo 5.3 : Üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	54
Tablo 5.4 : Kohezyon ve kayma direnci açısı parametrelerinin değişimi.....	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1 : Maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının farklı uçucu kül oranları ile değişimi	8
Şekil 3.2 : Optimum su muhtevalarının farklı uçucu kül oranları ile değişimi	8
Şekil 3.3 : Çeşitli uçucu küllere ait sıkışma değerleri.....	9
Şekil 3.4 : Bir uçucu kül dolgusu tasarım örneği.....	10
Şekil 3.5 : Kemberburgaz kiline ait kompaksiyon karakteristikleri.....	10
Şekil 3.6 : Gecikmenin maksimum kuru birim hacim ağırlığa etkisi.....	11
Şekil 3.7 : Gecikmenin optimum su muhtevasına etkisi.....	12
Şekil 3.8 : Volkanik zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının uçucu kül ilavesi ile değişimi.....	12
Şekil 3.9 : Volkanik zeminlerin optimum su muhtevalarının uçucu kül ilavesi ile değişimi.....	13
Şekil 3.10 : a) % 5 enzim ilave edilmiş uçucu kül b) uçucu kül.....	14
Şekil 3.11 : Arıtma çamuruna ait kompaksiyon eğrisi.....	15
Şekil 3.12 : Arıtma çamuru-uçucu kül karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri	16
Şekil 3.13 : Kompaksiyon eğrileri.....	17
Şekil 3.14 : % 16 uçucu kül ilavesi ile CBR değerlerinin değişimi.....	18
Şekil 3.15 : Farklı oranlarda uçucu kül ilavesi ile 7 günlük mukavemet değerlerinin değişimi.....	19
Şekil 3.16 : Gecikme ile uçucu külün mukavemete etkisinde gözlenen değişim	20
Şekil 3.17 : Farklı oranlarda uçucu kül katkısının zamana bağlı olarak dayanıma etkisi (% 5 çimento+% 5 bentonit).....	21

Şekil 3.18 : Farklı oranlarda uçucu kül katkısının zamana bağlı olarak dayanıma etkisi (% 5 çimento+% 5 bentonit).....	21
Şekil 3.19 : Volkanik kökenli zeminlerinin CBR değerlerinin değişimi.....	23
Şekil 3.20 : Volkanik kökenli zeminlerinin serbest basınç dayanımlarını kür süresine bağlı olarak değişimi.....	23
Şekil 3.21 : II. Cadde zemin numunesine ait serbest basınç deneyi sonuçları....	24
Şekil 3.22 : Premont zemin numunesine ait serbest basınç deneyi sonuçları.....	25
Şekil 3.23 : Premont zemininin mikrografisi.....	26
Şekil 3.24 : % 20 uçucu kül ilave edilmiş Premont zemininin mikrografisi.....	26
Şekil 3.25 : Kaolin kilinin farklı enzim oranlarındaki 1 günlük serbest basınç dayanımı.....	27
Şekil 3.26 : Kaolin kili+% 5 uçucu kül karışımının farklı enzim oranlarındaki 1 günlük serbest basınç dayanımı.....	28
Şekil 3.27 : Uçucu kül ve diğer malzemelerin mukavemette meydana getirdikleri zamana bağlı artış.....	28
Şekil 3.28 : Arıtma çamuru – Uçucu kül karışımlarına ait eksenel yük-boy değişimi eğrileri.....	29
Şekil 3.29 : Tayvan kili-uçucu kül karışımlarına ait serbest basınç deneyi sonuçları.....	30
Şekil 3.30 : Taiwan kili-uçucu kül karışımlarına ait kohezyon.....	31
Şekil 3.31 : Tayvan kili-uçucu kül karışımlarına ait kayma direnci açısı.....	31
Şekil 3.32 : Zeminin şişme potansiyelinde sağlanan azalma.....	32
Şekil 3.33 : Volkanik kökenli Hawaii zeminlerinin şişme potansiyellerinin değişimi.....	33
Şekil 3.34 : F ve C tipi uçucu küllerin permeabilite katsayıları.....	34
Şekil 3.35 : Permeabilite deneyi sonuçları	35
Şekil 3.36 : Arıtma çamuru ve uçucu kül karışımlarına ait permeabilite katsayıları.....	36

Şekil 3.37 : Tayvan kili,uçucu kül ve cüruf karışımlarına ait permeabilite katsayıları.....	36
Şekil 4.1 : Zemin numunesine ait granülometri eğrisi.....	40
Şekil 4.2 : Zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi.....	42
Şekil 4.3 : Uçucu kül numunesinin granülometri eğrisi.....	43
Şekil 4.4 : Kil + %10 uçucu kül için kompaksiyon eğrisi.....	45
Şekil 4.5 : Kil + %20 uçucu kül için kompaksiyon eğrisi.....	47
Şekil 5.1 : Numunelerin kompaksiyon karakteristiklerinin değişimi.....	52
Şekil 5.2 : Numunelerin kompaksiyon eğrileri.....	52
Şekil 5.3 : Üç eksenli basınç deneyine ait sonuçlar.....	56
Şekil 5.4 : 200 kPa hücre basıncında elde edilen maksimum deviatör gerilmeler.....	55
Şekil 5.5 : Kayma direnci açısından gözlenen değişimler.....	58
Şekil 5.6 : Deformasyon modüllerinin değişimi.....	58
Şekil A.1 : 0.0 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	65
Şekil B.1 : 10.1 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	66
Şekil C.1 : 10.7 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	67
Şekil D.1 : 10.33 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	68
Şekil E.1 : 10.195 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları...	69
Şekil F.1 : 20.1 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	70
Şekil G.1 : 20.7 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	71
Şekil H.1 : 20.33 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları.....	72
Şekil I.1 : 20.195 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları...	73

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Numune Kesit Alanı
c_u	: Drenajsız deneyden elde edilen kohezyon
C_u	: Üniformaluk katsayısı
C_c	: Derecelenme katsayısı
C_t	: Sıcaklık Düzeltmesi
C_m	: Menisküs Düzeltmesi
C_a	: Ayrıştırıcı Madde Düzeltmesi
D_{10}	: Granülometri eğrisinde %10'a karşılık gelen efektif dane çapı
D_{30}	: Granülometri eğrisinde %30'a karşılık gelen efektif dane çapı
D_{60}	: Granülometri eğrisinde %60'a karşılık gelen efektif dane çapı
e	: Boşluk Oranı
E_d	: Deformasyon Modülü
I_p	: Plastisite İndisi
k	: Permeabilite katsayısı
q_u	: Serbest basınç dayanımı
S	: Doygunluk derecesi
w	: Su Muhtevası
w_{opt}	: Optimum Su Muhtevası
w_L	: Likit Limit
w_p	: Plastik Limit
ϵ	: Düşey deformasyon
ϵ_f	: Kırılmanın meydana geldiği deformasyon

γ_s	: Dane Birim Hacim Ağırlığı
γ_k	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
$\gamma_{k,maks}$	: Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
ϕ_u	: Drenajsız deneyden elde edilen kayma mukavemeti açısı
$\Delta\sigma$	: Deviatör gerilme
$\Delta\sigma_{maks}$	: Maksimum deviatör gerilme



UÇUCU KÜL İLE ZEMİN STABİLİZASYONU

ÖZET

Ülkemiz su kaynakları, büyük oranda elektrik enerjisi üretilebilecek bir potansiyele sahip olmasına karşın, hidroelektrik santrallerin yapımının ve devreye alınmasının uzun sürmesi ve maliyetinin çok yüksek olması sebebiyle son dönemlerde gerekli kömür ve linyit rezervlerine sahip olunması ve maliyeti ve devreye alınma süresi daha az olan termik santrallerin yapımı hızlanmıştır.

Elektrik enerjisi üretiminde hammadde olarak pulverize (öğütülmüş) kömür kullanılan termik santrallerde üretilen elektrik enerjisi yanında yüksek miktarda yan ürünlerde elde edilmektedir. Baca gazları ile yükselen ve elektrostatik filtreler yardımıyla tutulan, elde edilen atıkların % 80'ini oluşturan uçucu küllerin atılması, taşınması ve depolanması çok büyük güçlükler yaratmakla birlikte önemli oranda çevre kirliliği yaratmaktadır. Yıllık 15 milyon ton olan uçucu kül üretimi, ülkenin yıllık 25 milyon ton olan çimento üretimi ile kıyaslandığında sorunun boyutu ortaya çıkmaktadır.

Atık olarak elde edilen uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiğinde önemli bir miktarının inşaat endüstrisinde kullanılabilirliği, hatta inşaat endüstrisinde malzeme kullanımını teknik yönden daha iyiye götürebildiği ve ayrıca ekonomi sağladığı ortaya çıkmaktadır.

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışmasında uçucu küllerin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmak üzere iki farklı oranda hazırlanan zemin ve uçucu kül karışımları üzerinde Standart Proktor ve Üç Eksenli Basınç Deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uçucu külün zeminin mukavemetinde meydana getirdiği değişimin kür süresine bağlı olarak değişimini belirlemek üzere 1 günlük, 7 günlük, 33 günlük ve 195 günlük deney numuneleri de kullanılmıştır.

Standart proktor deneyleri neticesinde, zemine uçucu kül ilavesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığı, optimum su muhtevasının ise arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kompaksiyon eğrisinin yassılaştığı da gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyleri sonucunda ise, zemine uçucu kül ilavesi neticesinde maksimum deviatör gerilme değerlerinde % 100 artış sağlanmıştır. Drenajsız şarlardaki kohezyon değerleri yaklaşık % 20 oranında artarken, kayma

direnci açısında, bir günlük kür süresi sonunda 10°'lik bir artış meydana gelmiş ve artış zamana bağı olarak devam etmiştir.

Sonuçlar, dayanımda meydana gelen artışın zamana bağı olarak devam ettiğini göstermektedir. Öyle ki, mukavemet 1 günlük kür süresinde dahi % 50 artarken, artışın büyük bir bölümü 33 günlük kür süresinde tamamlanmakta fakat artış, artım hızını azaltarak, zamana bağı olarak devam etmektedir. % 10 ve % 20 uçucu kül ilavesinin incelendiği bu çalışmada, artan uçucu kül / zemin oranının mukavemette büyük bir değişim meydana getirmediği gözlenmiştir.

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışması neticesinde, uçucu külün zemin stabilizasyonu çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Gelişmekte olan ülkemizde atık olarak nitelendirilen ve büyük depolama masrafları yanında çevre kirliliğine yol açan bu malzemenin, Geoteknik Mühendisliği uygulamalarında kullanımı büyük ekonomik faydalar sağlayacak, ayrıca kamuya ve çevreye verilen zararın azaltılması imkanını doğuracaktır.



SOIL STABILIZATION WITH FLY ASH

SUMMARY

Although water resources of the country have enough potential for producing large amounts of electrical power, because of the high cost and the long time needed for construction and engagement the hydraulic plants, having enough coal and lignite reserves, the country tends to construct thermic plants which have less cost and need less time for construction and engagement.

In thermic plants that use pulverized coal as fuel, besides the electrical power, large amounts of by-products are produced. The ashes which can move upwards with the chimney gases and captured by the electrostatical filters are named as fly ashes and are about 80 % of the total by-products. These fly ashes cause not only stocking problems but also environmental pollution. When the 15 million tons per year fly ash production is compared with the 25 million tons per year cement production of the country, the size of the problem faced can be more easily understood.

By the experimental studies made, it is seen that physical and chemical properties of fly ashes make fly ash utilization possible in civil engineering studies. And fly ash utilization can increase technical properties of the materials used and lead more economical solutions.

In this experimental study, the aim is to investigate if it's possible to use fly ash as a stabilization agent. For this purpose, Standart Proctor and Tri-Axial Compression tests are conducted on two different soil-fly ash admixtures (% 10 and % 20) and also on soil for comparison. In addition, tests are conducted in four different curing times (1 day, 7 days, 33 days and 195 days) to investigate if the strength increment occurred in the soil-fly ash admixtures are time dependent or not.

A decrease in maximum dry density and an increase in optimum moisture content has been reported for soils stabilized with fly ash in Standart Proctor analysis. Also it is seen that compaction curves flatten in soil-fly ash admixtures.

Approximately 100 % increment in maximum deviator stress is reported after tri-axial compression tests. Increments on the strength parameters are also reported.

Cohesion in undrained conditions increase app. 20 % and the inner friction angles jumps up 10 degrees even after 1 day curing and continues its rise by time.

Results show that the strength increment in soil-fly ash admixtures are time dependent. So much so that, although after 1 day curing strength increases nearly 50 % and completes most of its rise after 33 days curing, the strength increment continues its rise even after 195 days of curing. After the tests conducted on 10 % and 20 % fly ash admixtures, it is also been reported that the strength increment on the 20 % soil-fly ash admixture is not higher enough than the strength increment reported on 10% admixture as expected.

After the experimental studies, it's seen that it is possible to use fly ash as a stabilization agent. The utilization of this by-product, which causes great stocking expenses and environmental problems, in geotechnical field will lead many economical benefits and decrease the damage given to the environment



1. GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkeler kategorisinde yer alan ülkemiz, gerek toplumsal, gerekse endüstriyel alanda giderek artan elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamakta zorlanmaktadır. Ülkemiz su kaynaklarının büyük oranda elektrik enerjisi üretebilecek bir potansiyele sahip olmasına karşın, hidroelektrik santrallerin yapımının ve devreye alınmasının uzun bir zaman alması ve maliyetinin çok yüksek olması sebebiyle, son dönemlerde gerekli kömür ve linyit rezervlerine sahip olunması ve maliyeti ile devreye alınma süresi daha az olan termik santrallerin yapımını hızlandırmıştır.

Elektrik enerjisi üretiminde hammadde olarak pulverize (öğütülmüş) kömür kullanan termik santrallerde, üretilen elektrik enerjisi yanında, yüksek miktarlarda yan ürünlerde elde edilmektedir. Atık olarak ortaya çıkan taban külü ve cürufun yanında, baca gazları ile birlikte yükselen ve filtreler yardımıyla tutulan, atıkların yaklaşık % 75-80'ini oluşturan çok ince küller ise uçucu kül (fly ash) olarak isimlendirilmektedir. Cüruf ve uçucu küllertın atılması, taşınması ve depolanması çok büyük güçlükler yaratmakla birlikte önemli oranda çevre kirliliğine de sebep olmaktadır.

Ülkemiz termik santrallerinden üretimin yan ürünü olarak ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 15 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. Ülkenin çimento üretiminin yıllık 25 milyon ton olduğu göz önüne alındığında, uçucu külün depolanması, saklanması ve atılmasının çevreye ve kamuya verdiği zararların boyutu ortaya çıkmaktadır.

Atık olarak elde edilen uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiğinde önemli bir miktarının inşaat endüstrisinde kullanılabilirliği, hatta inşaat endüstrisinde malzeme kullanımını teknik yönden daha iyiye götürebildiği ve ayrıca ekonomi sağladığı ortaya çıkmıştır. Özellikle yapı malzemesi sektöründe, çimento üretiminde, hazır beton üretiminde ve hafif yapı malzemesi alanlarında kullanım olanaklarını gün geçtikçe arttıran uçucu kül, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ışığında geoteknik uygulamalarında da son derece uygun ve ekonomik çözümler sunabilen bir malzeme olduğunu da kanıtlamaya devam etmektedir.

Uçucu küller çeşitli dünya ülkelerinde sanayide, teknikte ve inşaat endüstrisinde kullanım alanı bulmuş durumdadır. Ülkemiz inşaat endüstrisinde de uçucu kül kullanımının geliştirilmesi kolay, ucuz temini ve kimyasal özellikleri nedeni ile daha ekonomik çözümler ve çevreye verilen zararın azaltılması imkanını sağlayacaktır. Uçucu külün Türkiye’de yıllık kullanımı ise üretimin % 1’inden daha az bir seviyededir.



2. UÇUCU KÜL

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek amacıyla yakıt olarak kullanılan pulverize (öğütülmüş) kömür, yanma neticesinde atık olarak farklı tiplerde küller ve cüruf ortaya çıkarmaktadır. Ortaya çıkan bu atık malzemelerden en önemlisi, yanma neticesinde ortaya çıkan gazlarla birlikte yükselen, çok ince kül parçacıklarıdır. Bu ince kül parçacıkları, çevreye verilen zararı azaltmak maksadıyla, elektrostatik filtreler ve siklonlarda yakalanmakta, atmosfere çıkışları engellenmektedir. Uçucu küllerin yanısıra, taban külü olarak adlandırılan, gazlarla birlikte yükselemeyen ve yanarak kazan tabanında biriken küllerle birlikte bir miktar cüruf da oluşabilmektedir. Ortaya çıkan atık malzemenin yaklaşık %75-80'ini uçucu küller oluşturmaktadır.

2.1 Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerini kömür cinsi, yanma sistemi, filtre sistemi gibi birçok faktör etkilemektedir. Kömür kaynağı, genel olarak, hem ortaya çıkacak olan uçucu kül miktarına etki etmekte hem de kömürün kimyasal kompozisyonu içerisinde yer alan inorganik maddeler ile oluşacak külün kimyasal kompozisyonunu tayin etmektedir.

Uçucu küller genel olarak gri renkli olmalarına karşın, içlerinde yanmamış karbon miktarının fazla olması durumunda, daha koyu renkli olabilmektedirler. Tipik olarak küresel şekilde olan uçucu kül parçacıklarının çapları 1-150 μm arasında değişim göstermekle beraber %75'den fazlasının çapı 45 μm 'den daha küçüktür. Bu küresel parçacıkların içleri dolu veya boş olabilmektedir. İçleri boş olan kül parçacıkları toplam külün ağırlık olarak yaklaşık % 5'ini, hacim olarak ise yaklaşık % 20'sini oluşturmaktadır. Uçucu küllerin yoğunlukları 19.5 – 27.0 kN/m^3 mertebesinde. Uçucu küller, doğal zeminlerle karşılaştırıldığında daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip, silt boyutunda oldukça üniform malzemelerdir.

Uçucu külün kimyasal kompozisyonu incelendiğinde, % 85 veya daha fazla miktarının SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ve MgO bileşenlerinden oluştuğu görülmektedir. Kullanılan kömüre bağlı olarak bazı tiplerinde yüksek miktarda CaO

Tablo 2.1 : Uçucu kül ve taban külünün kimyasal kompozisyonları

<i>Kimyasal Kompozisyon</i>	<i>Uçucu Kül (%)</i>	<i>Taban Külü (%)</i>
Aluminyumoksit (Al_2O_3)	20 – 40	21 – 60
Demirdioksit (Fe_2O_3)	4 – 24	5 – 37
Kalsiyum (CaO)	2 – 27	0 – 22
Magnezyumdioksit (MgO)	1 – 6	0 – 4
Silisdioksit (SiO_2)	34 – 58	21 – 60
Sülfat (SO_3)	0.5 – 4	-

bulunabilmektedir. Tablo 2.1’de uçucu kül ve taban küllerinin kimyasal kompozisyonları genel olarak verilmiştir.

2.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında genel olarak ASTM sınıflandırmasından faydalanılmaktadır. ASTM C618’e göre uçucu küller F ve C olarak iki genel sınıfa ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürlerden, C sınıfı uçucu küller linyitli kömürlerden elde edilmektedir. Ayrıca içerisinde % 10’dan daha fazla CaO bulunduran küller “yüksek kireçli uçucu kül” olarak tanımlanmaktadır. C sınıfı uçucu küller kendi kendine çimentolaşma özelliğine sahiptirler. F sınıfı uçucu küller ise bu özelliğe sahip olmamakla beraber, kireç ile karıştırılmaları durumunda bu tarz puzzolanik özellik kazanabilmektedirler.

Türk Standartları Enstitüsü tarafından uçucu küllerle ilgili olarak hazırlanmış iki standart da mevcuttur. Bunlardan TS 639 uçucu küllerin tanımı, sınıflandırılması, özellikleri, deney yöntemleri ve kalite kontrollerini tayin ederken, TS 640 ise uçucu küllü çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ile deney yöntemleriyle ilgilidir. Türkiye’de çok miktarda bulunan yüksek kireçli uçucu küller ile ilgili TS 639’da herhangi bir hüküm bulunmamaktadır. Tablo 2.2’de ASTM C618 ve TS 639 sınırları gösterilmiştir.

Tablo 2.2 : ASTM C618 ve TS 639 sınırları (Tokyay,1993)

<i>Özellik</i>	<i>ASTM C618</i>		<i>TS 639</i>
	<i>F</i>	<i>C</i>	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	en az % 70	en az % 50	en az % 70
MgO	en çok % 5	en çok % 5	en çok % 5
SO ₃	en çok % 5	en çok % 5	en çok % 5
Na ₂ O + K ₂ O	en çok % 1.5	en çok % 1.5	
Kızdırma Kaybı	en çok % 12	en çok % 6	en çok % 10

2.3 Uçucu Küllerin Mühendislik Özellikleri

Uçucu küllerin mühendislik özellikleri genelde oldukça dar bir aralıkta değişir. Optimum su muhtevası, silt ve siltli killere nazaran daha geniş bir aralıktadır. Çatalağzı ve Soma – B uçucu külleri için farklı (standart proktor, modifiye proktor ve titreşimli tokmak) sıkıştırma yöntemleri yakın sonuçlar vermiştir ve muhtemelen genelleme mümkündür. Düşük kalsiyumlu veya F tipi kuru veya suya doymuş uçucu küller kohezyonsuz zeminler gibi davranır ($c' = 0$) ve tipik ϕ' değerlerinin sıklığa bağlı olarak 30 – 35 ° arasında değişmesi beklenir. Uçucu küller suya doymuş olmadığı zaman, suyun yüzeyel geriliminden dolayı görünen kohezyon oluşur ve serbest basınç deneyi uygulanabilir. Yüksek kalsiyumlu veya C tipi ıslak küllerde kendi kendine, zamana bağlı sertleşme olduğu için kohezyon ve serbest basınç dayanımında önemli artışlar gözlenir. Uçucu küllerin oldukça düşük geçirgenliği ve sıkışabilirliği vardır. Kısıtlı bilgiler arazide sıkışabilirliğin daha da düşük olduğunu göstermektedir. Oturmalar kile nazaran çok daha hızlı oluşur.

2.4 Türkiye Uçucu Külleri

Türkiye’de kurulu bulunan termik santrallerden elde edilen uçucu küller genel olarak C sınıfı uçucu küllerdir. Ayrıca birçoğu da yüksek kireçli uçucu kül sınıfında, yani $\text{CaO} > \% 10$, yer almaktadır. Tablo 2.3’ de bazı Türkiye uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları verilmiştir. Bu tablodan da anlaşılacağı üzere Afşin-Elbistan uçucu

külü ASTM C618 ve TS 639 sınırlarını sağlayamazken, Seyitömer, Soma-B ve Yatağan uçucu külleri yüksek kireçli uçucu kül özelliklerini sağlamaktadır.

Tokyay (1993) tarafından hazırlanan ve bazı Türkiye uçucu küllerinin fiziksel özelliklerini gösteren bir çizelge Tablo 2.4 de gösterilmiştir.

Tablo 2.3 : Bazı Türkiye uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları (Tokyay, 1993)

<i>Oksit (%)</i>	<i>Afşin - Elbistan</i>	<i>Çatalağzı</i>	<i>Seyitömer</i>	<i>Soma - B</i>	<i>Tunçbilek</i>	<i>Yatağan</i>
SiO ₂	27.4	56.8	40.6	39.8	56.4	51.2
Al ₂ O ₃	12.8	24.1	9.1	22.3	23.0	22.9
Fe ₂ O ₃	5.5	6.8	7.7	4.4	10.1	7.8
Si+Al+Fe	39.7	87.7	57.4	66.5	89.5	81.9
CaO	47	1.4	19.9	25.4	2.1	13.0
MgO	2.5	2.4	8.1	1.9	3.3	2.8
SO ₃	6.2	2.9	10.6	4.8	0.4	0.3
Alkali	0.3	3.0	1.4	0.4	0.9	2.9
TiO ₂	0.7	1.1	-	0.6	-	0.9
LOI	2.4	0.6	1.4	0.4	1.1	0.4

Tablo 2.4 : Bazı Türkiye uçucu küllerinin fiziksel özellikleri (Tokyay, 1993)

<i>Özellik</i>		<i>Afşin - Elbistan</i>	<i>Çatalağzı</i>	<i>Seyitömer</i>	<i>Soma B</i>	<i>Tunçbilek</i>	<i>Yatağan</i>
İncelik	200 µm elek	3.0	2.7	1.0	3.0	4.5	1.9
(%) kalan	90 µm elek	14.9	11.5	3.0	19.0	13.5	12.8
Özgül ağırlık	(kN/m ³)	26.3	19.7	24.6	24.2	19.9	21.5
PAI	Kireçle (Kg/cm ²)	49.7	45.1	43.8	52.5	34.0	36.0
	P.C.ile (%kontrol)	86.4	77.2	79.8	94.5	72.5	67.3
Su İhtiyacı	(% kontrol)	111.8	102.7	112.4	110.0	104.2	106.5

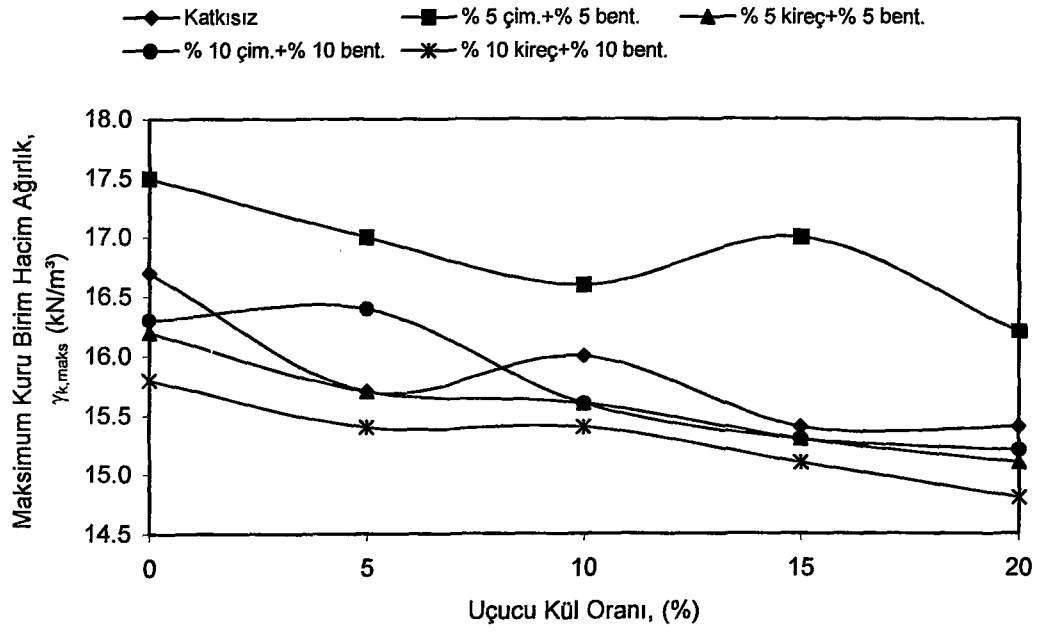
3. YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

3.1 Uçucu Külün Sıkışma Özelliklerine Etkisi

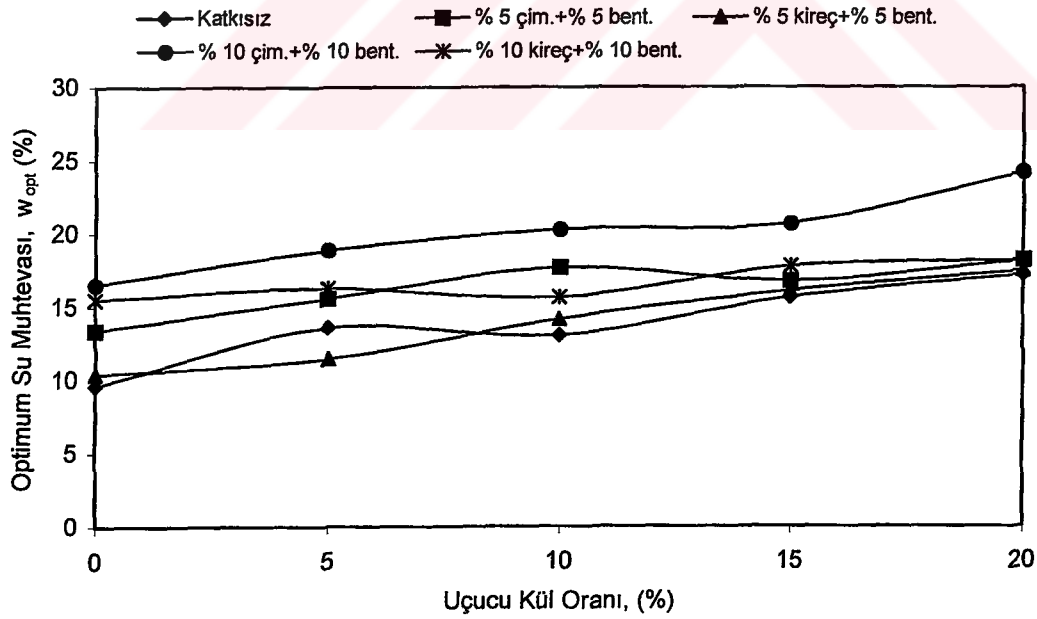
Özbayoğlu (1993), kumlu zemin örneklerinin, belirli oranlarda bentonit katkısı yanında, % 5, 10, 15 ve % 20 oranında uygulanan uçucu kül ve % 5 ve % 10 çimento katkısıyla ıslahını araştırmıştır. Tablo 3.1 de elde ettiği deney sonuçlarının bir kısmına yer verilmiştir. Deneysel çalışma neticesinde, uçucu kül katkı oranının, sıkışma parametrelerini fazlaca etkilememekle beraber, artan uçucu kül katkı oranları ile birlikte, maksimum kuru yoğunluğun biraz azalması ve buna karşın optimum su muhtevası değerinde belirgin artışların olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Araştırmacı maksimum yoğunluk değerlerinde gözlenen azalmanın, uçucu külleri oluşturan içi boş küresel daneciklerden kaynaklandığını savunmaktadır.

Tablo 3.1 : Kumlu Zeminin Uçucu Kül ile Islahı (Özbayoğlu, 1993)

		Zemin örneği	Örn. +% 5 uçucu kül	Örn. +% 10 uçucu kül	Örn. +% 15 uçucu kül	Örn. +% 20 uçucu kül
Katkısız	$\gamma_{k,maks}$, kN/m ³	16.7	15.7	16.0	15.4	15.4
	ω_{opt} , %	9.6	13.6	13.1	15.7	17.2
% 5 çimento	$\gamma_{k,maks}$, kN/m ³	17.5	17.0	16.6	17.0	16.2
% 5 bentonit	ω_{opt} , %	13.4	15.6	17.7	16.8	18.2
% 5 kireç	$\gamma_{k,maks}$, kN/m ³	16.2	15.7	15.6	15.3	15.1
% 5 bentonit	ω_{opt} , %	10.4	11.5	14.2	16.1	17.5
% 10 çimento	$\gamma_{k,maks}$, kN/m ³	16.3	16.4	15.6	15.3	15.2
% 10 bentonit	ω_{opt} , %	16.5	18.9	20.3	20.7	24.2
% 10 kireç	$\gamma_{k,maks}$, kN/m ³	15.8	15.4	15.4	15.1	14.8
% 10 bentonit	ω_{opt} , %	15.5	16.3	15.7	17.8	18.2



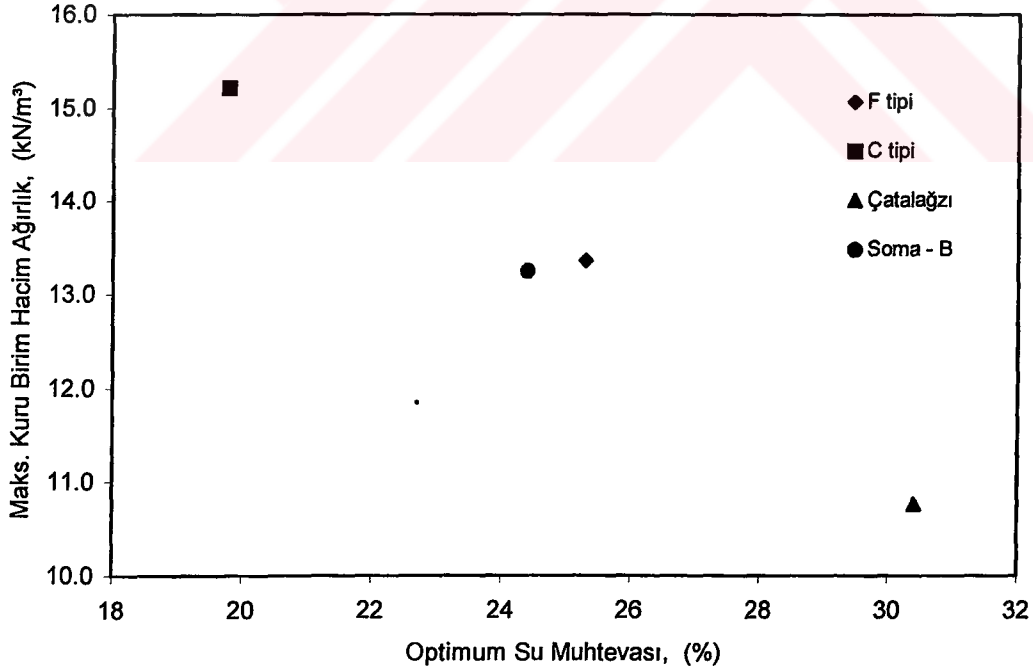
Şekil 3.1 : Maksimum kuru birim hacim ağırlığının farklı uçucu kül oranları ile değişimi (Özbayoğlu,1993)



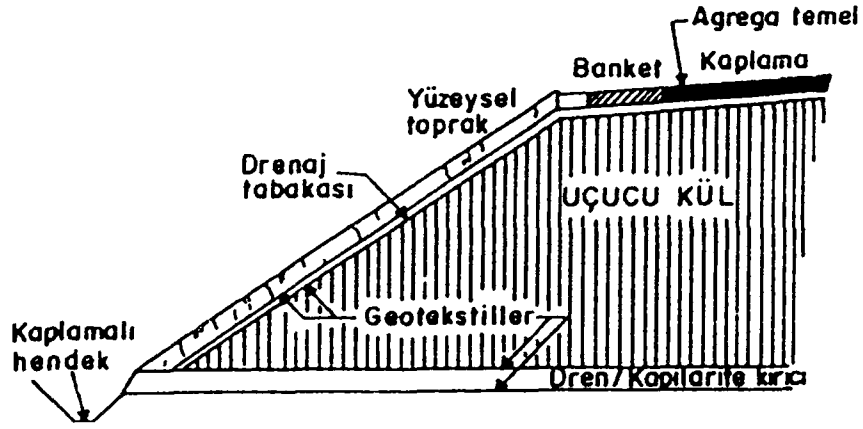
Şekil 3.2 : Optimum su muhtevasının farklı uçucu kül oranları ile değişimi (Özbayoğlu,1993)

Wasti (1993), yaptığı deneyler neticesinde F tipi, C tipi ve Türkiye’den Çatalağzı ve Soma – B uçucu küllerinin, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinin, Şekil 3.3 de görüldüğü gibi olduğunu belirlemiştir. Araştırmacı, uçucu küllerin bu özelliklerinden dolayı yapay dolguların teşkilinde kullanılabileceğini ifade etmektedir. Uçucu kül, hafif olması nedeniyle, özellikle zayıf taban zemini durumunda, kullanışlı bir çözüm olabilmektedir. Çalışmada uçucu kül dolgusuna ait bir tasarım çalışmasına da yer verilmiştir (Şekil 3.4). Uçucu külün büyük miktarlarda kullanımına imkan veren bu tarz çalışmalar, termik santrallerde yaşanan depolama ve saklama sorunlarının çözümüne önemli bir katkı sağlayabilecektir.

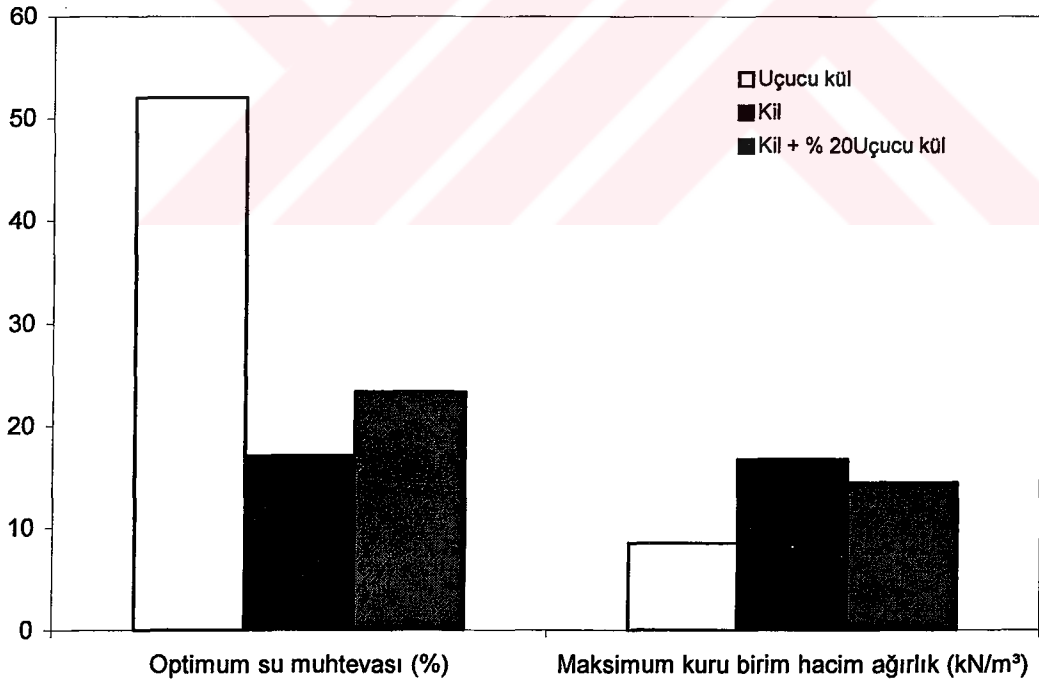
Özbay (1996), araştırmasında İstanbul Kemerburgaz kilinin, % 20 Seyitömer uçucu külü ilavesi ile değişen kompaksiyon özelliklerini incelemiştir. Araştırma neticesinde, kil ve uçucu kül karışımının kompaksiyon eğrisinin, kil ve uçucu kül numunelerine ait kompaksiyon eğrilerinin arasında yer aldığı ve beklendiği üzere karışımın optimum su muhtevasının, kil numunesinin optimum su muhtevasından büyük olduğu ve karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığında kil numunesine göre bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.(Şekil 3.5)



Şekil 3.3 : Çeşitli uçucu küllere ait kompaksiyon karakteristikleri (Wasti,1993)



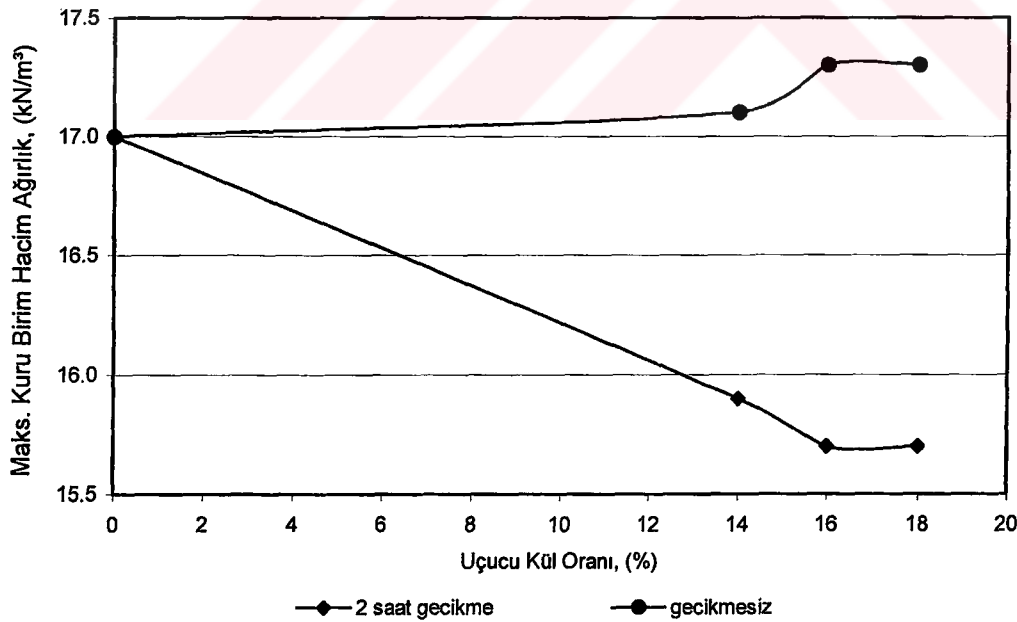
Şekil 3.4 : Bir uçucu kül dolgusu tasarım örneği (Wasti, 1993)



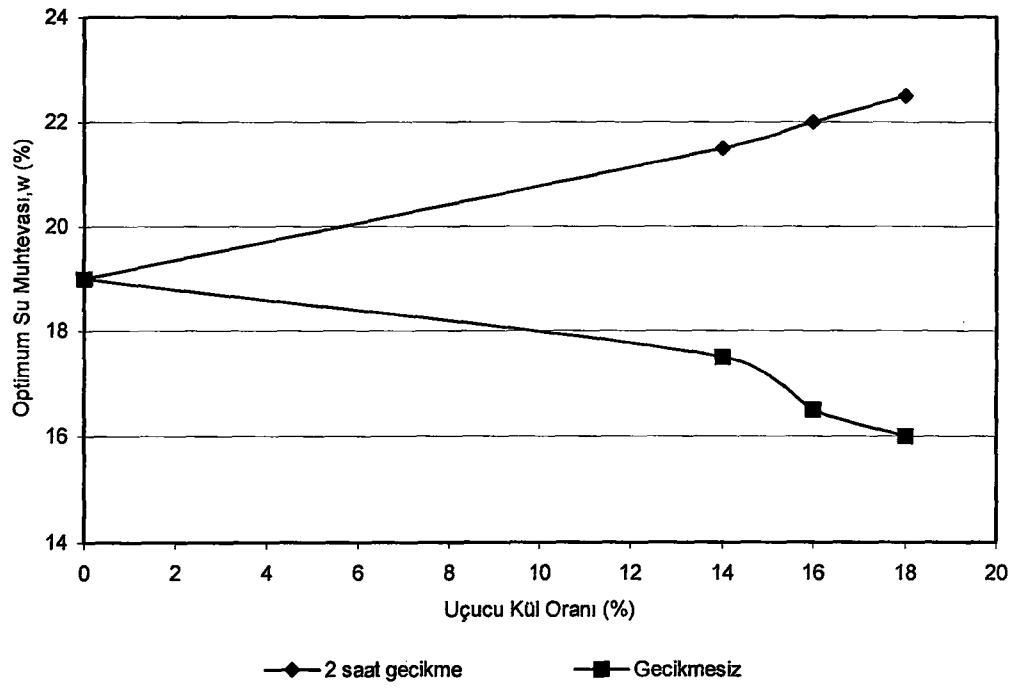
Şekil 3.5 : Kemerburgaz kiline ait kompaksiyon karakteristikleri (Özbay, 1996)

Ferguson (1993), Topeka Heartland Park yarış pistinin iyileştirilmesi projesinde 6 farklı zemin cinsi üzerinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarda, değişik sonuçlar elde etmiştir. Örneğin 3.numaralı ayrışmış killi şist zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de görüldüğü üzere 2 saat gecikme ile gerçekleştirilen Standart Proktor deneyi sonucunda, maksimum birim hacim ağırlıkta azalma ve optimum su muhtevasında artış gözlemlenirken, gecikme olmadan gerçekleştirilen deneylerde ise maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde az da olsa bir artışla beraber, optimum su muhtevası değerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

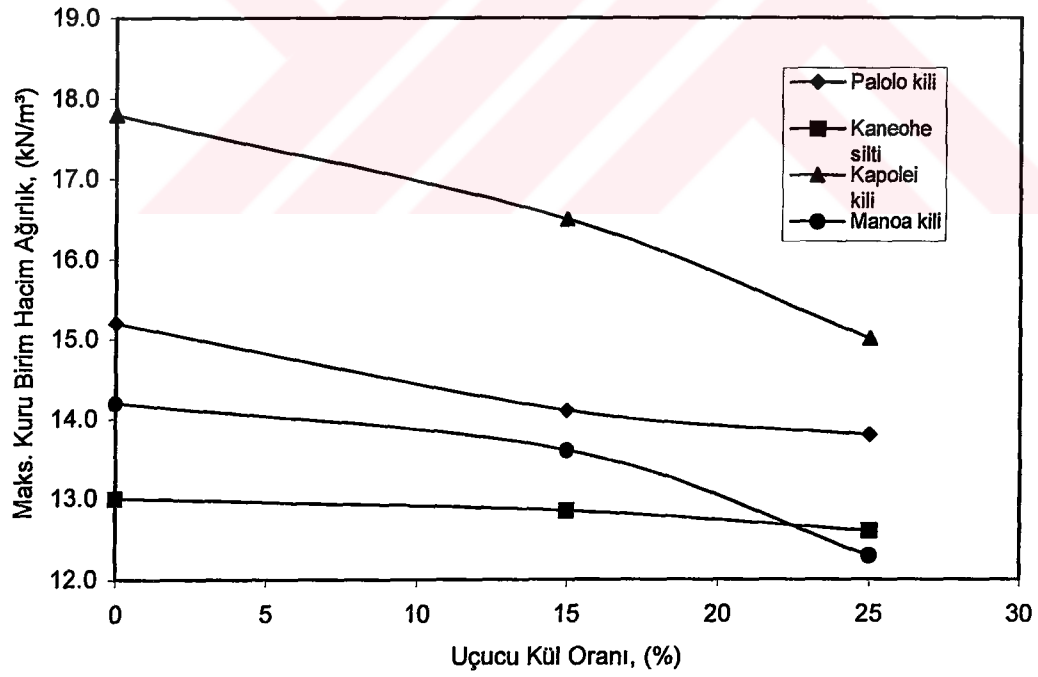
Nicholson ve Kashyap (1993), volkanik kayaların ayrışması ile oluşmuş ve yüksek plastisiteli, kompaksiyonu zor olan tropik Hawaii killi zeminlerinin uçucu kül ile stabilizasyonunu incelemişlerdir. Deneyler neticesinde % 15 ve % 25 oranlarındaki uçucu kül ilavesinin, 6 farklı zemin tipinde de maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalttığı ve de optimum su muhtevasını arttırdığını tespit etmişlerdir (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9). Araştırmacılar, uçucu kül ilavesinin optimum su muhtevası değerini arttırmasını, doğal su muhtevaları genellikle optimum su muhtevası değerinden yüksek olan tropikal zeminlerin ıslahında önemli bir avantaj teşkil ettiğini de belirtmektedirler.



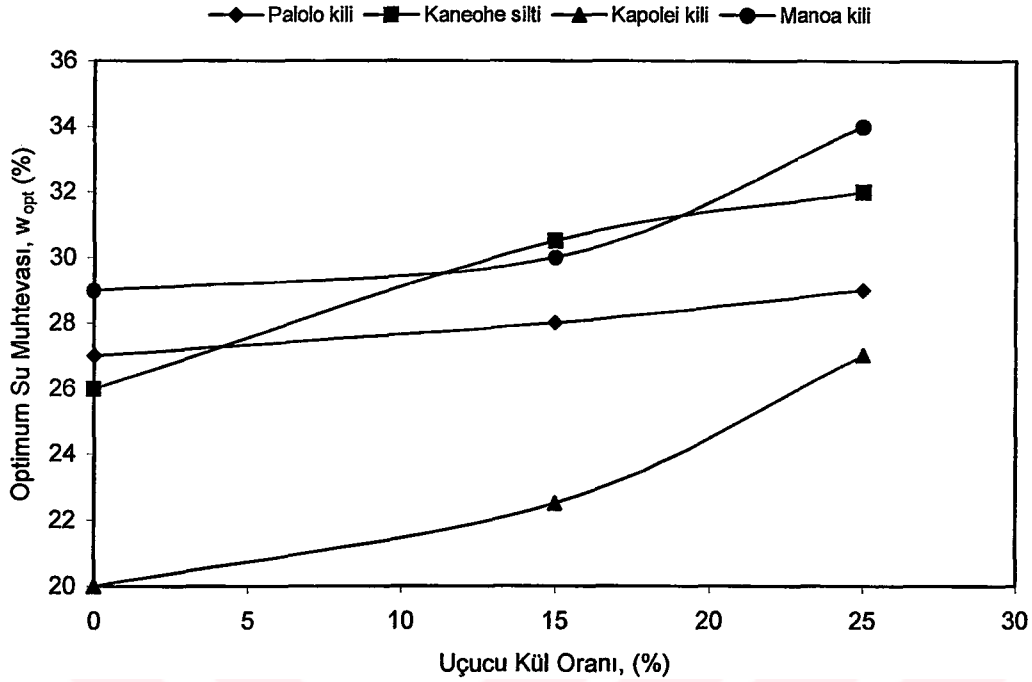
Şekil 3.6 : Gecikmenin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine etkisi
(Ferguson,1993)



Şekil 3.7 : Gecikmenin optimum su muhtevasına etkisi (Ferguson, 1993)



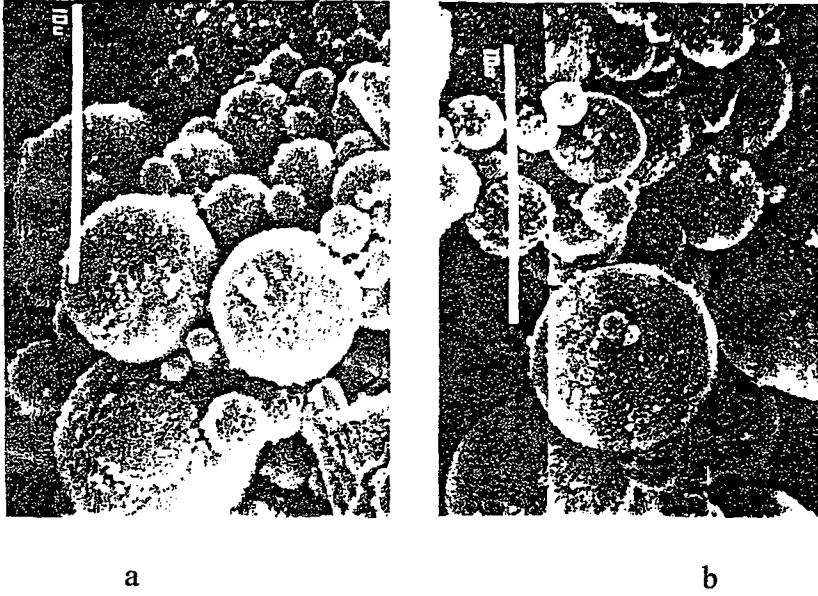
Şekil 3.8 : Volkanik zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının uçucu kül ilavesi ile değişimi (Nicholson ve Kashyap, 1993)



Şekil 3.9 : Volkanik zeminlerin optimum su muhtevelarının uçucu kül ilavesi ile değişimi (Nicholson ve Kashyap,1993)

Keshawarz ve Dutta (1993), şişme potansiyeli yüksek olan Teksas zeminlerinin, % 20 F sınıfı uçucu kül, % 6 kireç ve % 10 portland çimentosu ile stabilizasyonlarını karşılaştırmak üzere yaptıkları araştırmalar neticesinde, diğer araştırmacılar gibi, uçucu külün kompaksiyona olumlu etkisinin olduğunu saptamışlardır. Araştırmacılar, sıkışma değerlerinde gözlemlenen bu gelişmenin, uçucu külün zeminin plastisite indisini ve zemin içerisindeki kil boyutundaki dane oranını düşürmesi neticesinde oluştuğunu düşünmektedirler.

Khan ve Sarker (1993) uçucu kül ile zemin stabilizasyonu çalışmalarında enzim kullanımının etkilerini kaolin kili üzerinde incelemişlerdir. Araştırmada kullanılan enzim, organik kökenli, toksit olmayan ve çevreye zararsız olup, biyolojik yöntemlerle elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül kullanılması sebebiyle, puzzolanik aktivite yaratmak maksadıyla, zemine ayrıca bir miktar kireç ilavesi de yapılmıştır. Araştırmacılar deneysel çalışmalar neticesinde, zemin-uçucu kül karışımına enzim ilavesinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde belirgin bir değişime sebep olmadığı sonucuna varmışlardır. Şekil 3.10 da enzim ilave edilmiş bir uçucu külün mikrofasi görülmektedir.



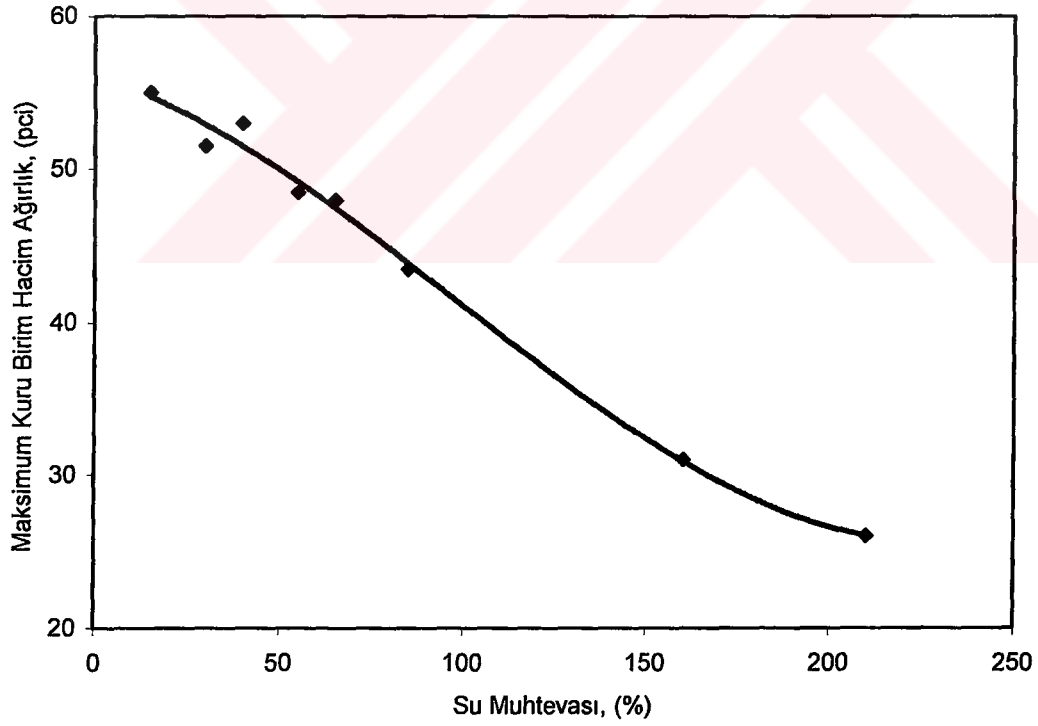
Şekil 3.10 : a) % 5 enzim ilave edilmiş uçucu kül b) uçucu kül
(Nicholson ve Kashyap, 1993)

Maher ve diğerleri (1993), su arıtma tesislerinde büyük oranda ortaya çıkan, yüksek su muhtevası ve ince daneli madde içeriği sebebiyle, atık olarak depolanma durumunda dahi, yüksek kurutma maliyeti yaratan, arıtma çamurunun uçucu kül ilavesi ile iyileştirilmesi amacıyla, bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Arıtma çamuru ve F sınıfı uçucu kül ile Tablo 3.2 de görülen üç farklı karışım hazırlanarak, modifiye proktor yöntemi ile kompaksiyon deneylerine tabi tutulmuştur.

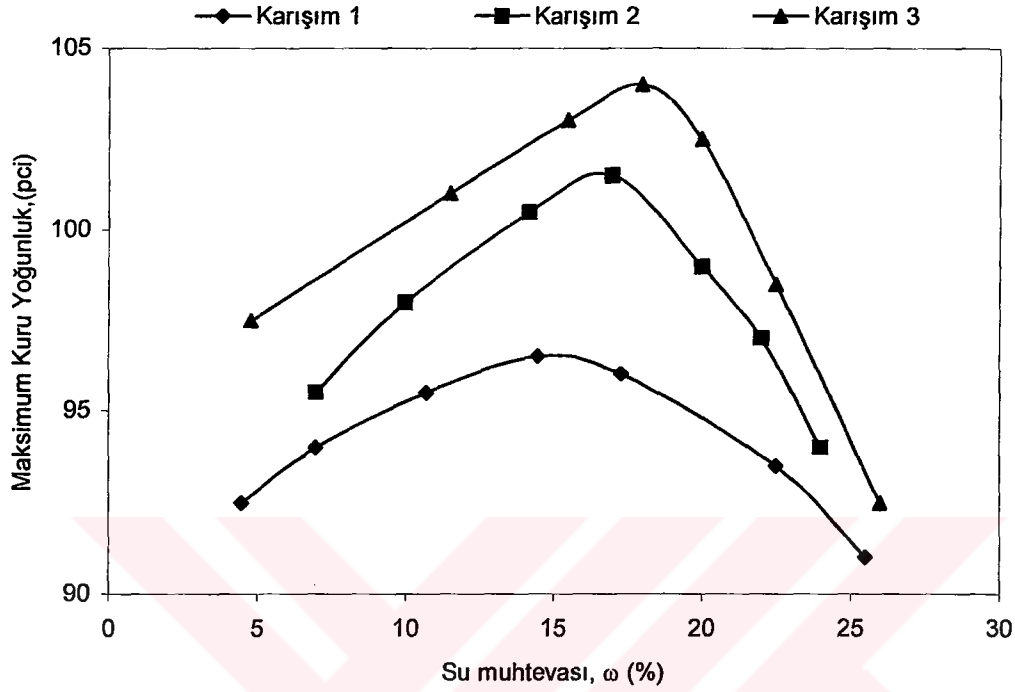
Deneyler neticesinde, Şekil 3.11 de görüldüğü şekilde kompaksiyon eğrisinde tepe noktası bulunmayan arıtma çamurunun, uçucu kül ile karıştırıldığında normal kompaksiyon eğrileri verdiği görülmüştür. Arıtma çamuru-uçucu kül karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri Şekil 3.12 de görülmektedir. Diğer çalışmalardan farklı olarak, arıtma çamuru-uçucu kül karışımlarında, artan uçucu kül oranı ile hem maksimum kuru birim hacim ağırlık hem de optimum su muhtevası değerlerinde azalma meydana geldiği de tespit edilmiştir.

Tablo 3.2 : Arıtma çamuru ve uçucu kül karışımları (Maher ve diğerleri, 1993)

<i>Karışım numarası</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Uçucu kül : Arıtma çamuru oranı	2 : 1	2.5 : 1	3 : 1
Başlangıç su muhtevası (%)	29.2	25.1	21.9
Kireç oranı (%)	1.4	1.2	1.0



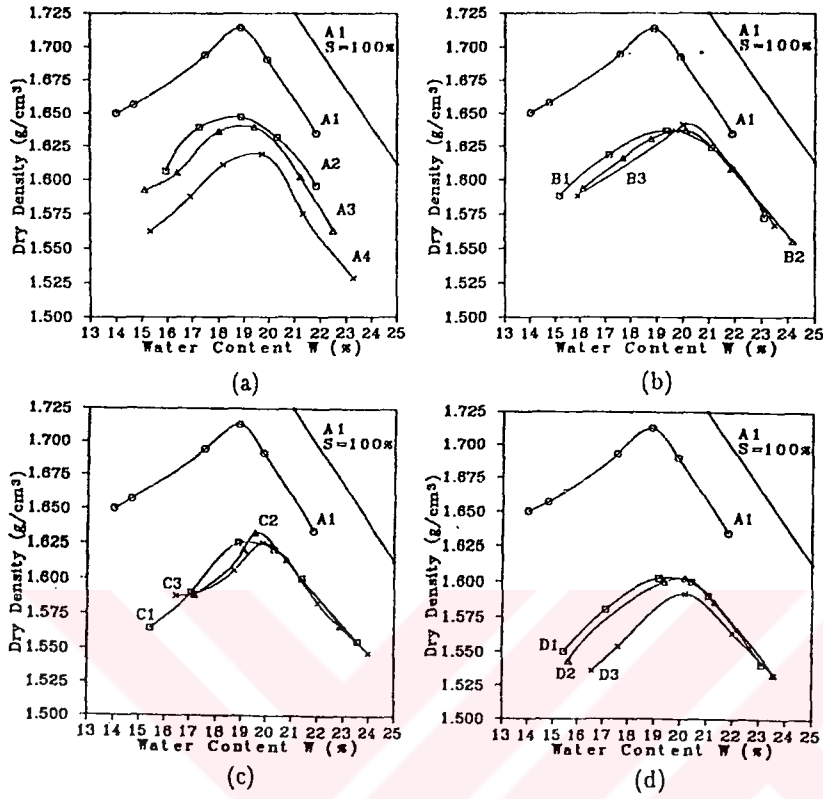
Şekil 3.11 : Arıtma çamuruna ait kompaksiyon eğrisi (Maher ve diğerleri, 1993)



Şekil 3.12 : Arıtma çamuru-uçucu kül karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri
(Maher ve diğerleri, 1993)

Chu ve Kao (1993), düşük plastisiteli Tayvan kili ile farklı oranlarda uçucu kül ve cüruf karıştırarak, kompaksiyon karakteristiklerinde meydana gelen değişimleri deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Farklı oranlardaki karışımlar üzerinde gerçekleştirilen standart proktor deneylerine ait sonuçlar Şekil 3.13 de görülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, kil numunesine uçucu kül ilavesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri azalmakta iken, optimum su muhtevasında meydana gelen artış nispeten daha az olmaktadır. Bu karışıma ayrıca cüruf ilave edildiğinde ise farklı oranlardaki karışımlarda dahi, maksimum kuru birim hacim ağırlığı yaklaşık aynı değeri alırken , optimum su muhtevası artışını sürdürmektedir.



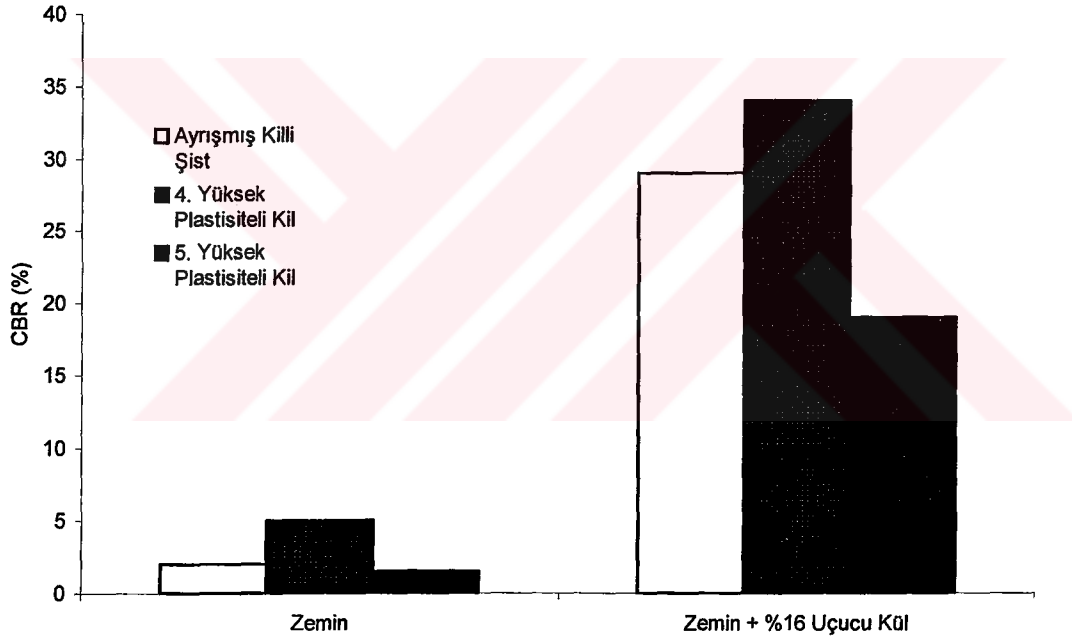
Şekil 3.13 : Kompaksiyon eğrileri (Chu ve Kao, 1993)

3.2 Uçucu Külün Mukavemete Etkisi

Tan ve İyisan (1996), % 20 uçucu kül ilavesinin, Kemerburgaz kilinin mukavemet karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Gerçekleştirdikleri üç eksenli basınç deneyleri, bir günlük kür neticesinde dahi, zeminin kayma direncinde önemli derecede artış meydana geldiğini göstermektedir. Araştırmacılar, kil ve uçucu kül karışımının kayma direnci açısından gözlemledikleri dikkat çekici artışın, büyük bir ihtimalle uçucu külün küresel daneciklerinden kaynaklandığını düşünmektedirler. Ayrıca kırılmanın meydana geldiği deformasyonda da bir azalma meydana geldiği deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Deney sonuçları Tablo 3.3 de görülmektedir.

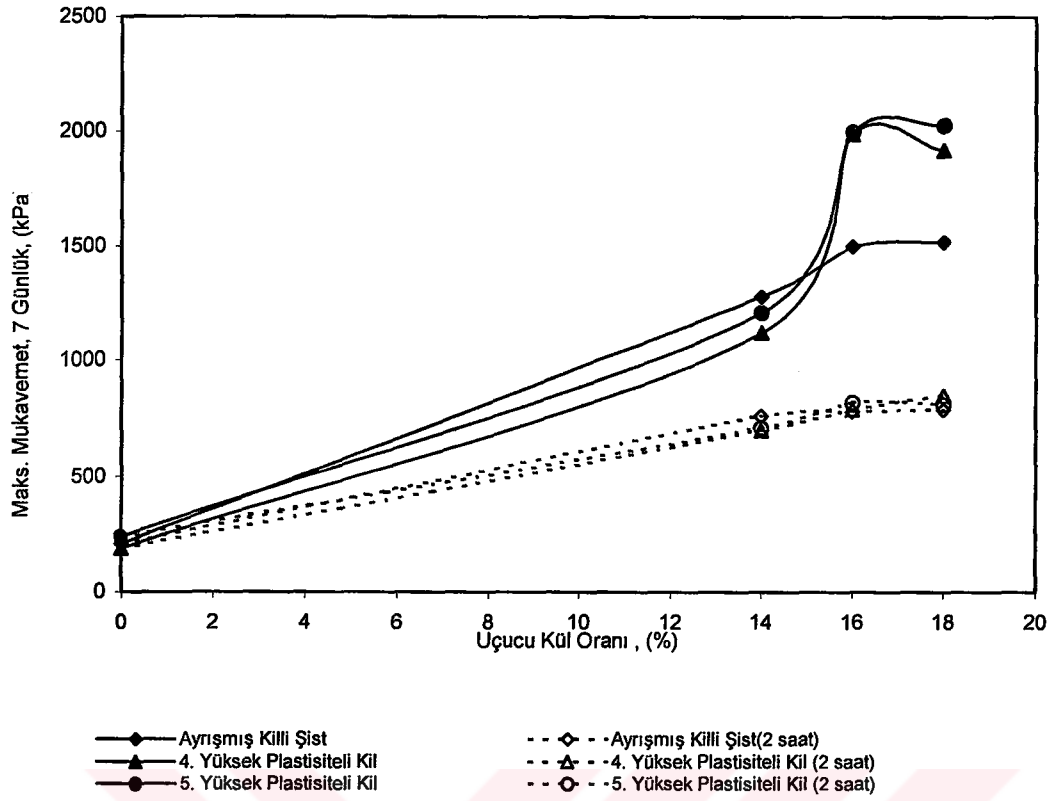
Tablo 3.3 : Üç eksenli basınç deneyi sonuçları (Tan ve İyisan, 1996)

	Kohezyon c_u (kPa)	Kayma Direnci Açısı ϕ_u (°)	Deformasyon modülü E_d (MN/m ²)	Kırıldığı Deformasyon ϵ_f (%)
Kil	160	9	12.5	13
% 20 Kül + % 80 Kil	140	22	12.3	10



Şekil 3.14 : % 16 uçucu kül ilavesi ile CBR değerlerinin değişimi
(Ferguson, 1993)

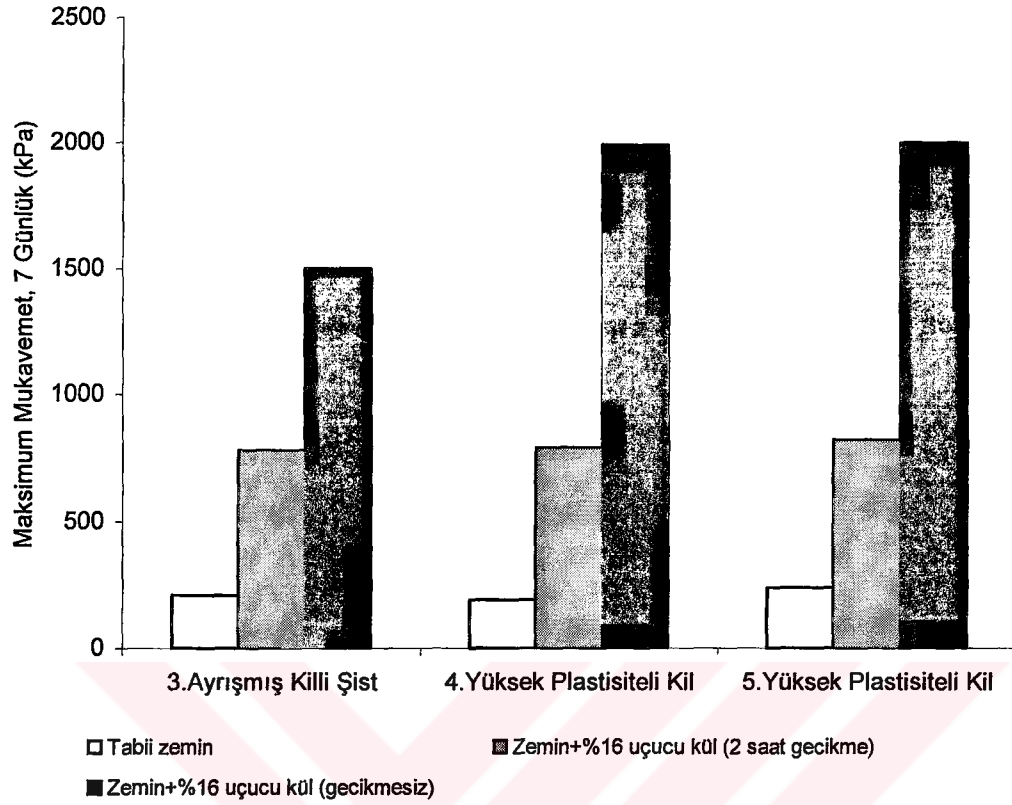
Ferguson (1993), çok amaçlı bir yarış pistinin çok katmanlı ve düşük mukavemetli zemininin, uçucu kül kullanarak stabilizasyonunu sağlamak üzere, bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmasında, iki farklı termik santralden elde edilen, % 28 - 33 oranında kalsiyum oksit ihtiva eden C sınıfı uçucu kül kullanmıştır. Zemine uçucu



Şekil 3.15 : Farklı oranlarda uçucu kül ilavesi ile 7 günlük mukavemet değerlerinin değişimi (Ferguson, 1993)

kül ilavesi ile, altı farklı zemin tipine ait 1.5-5 arasında değişen CBR değerlerinin 19-34 aralığına kadar yükseldiği görülmüştür (Şekil 3.14). Aynı artış Şekil 3.15’de görüldüğü üzere, 7 günlük maksimum mukavemet değerlerinde de sağlanmıştır.

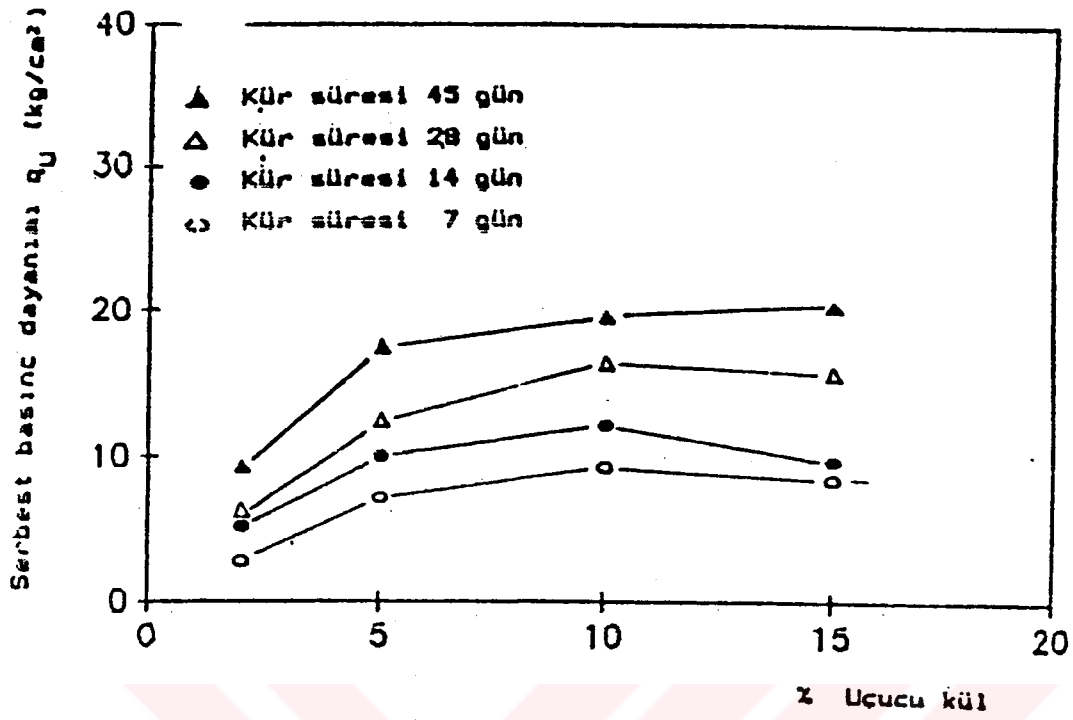
Araştırmacı, uçucu kül ilavesinin zeminde meydana getireceği mukavemet artışından en iyi şekilde faydalanmak için, gecikme olarak tabir edilen, karışımın hazırlanması ve sıkıştırma işleminin uygulanması arasındaki sürenin 0-2 saat arasında olması gerektiğini de belirtmiştir. Şekil 3.16’da da görüldüğü üzere, çeşitli zemin tiplerine % 14-18 oranında uçucu kül ilavesi ile 7 günlük mukavemet değerlerinde, gecikme meydana gelmemesi durumunda 10 kata yakın bir artış sağlanabilmektedir. 2 saatlik bir gecikme olması durumunda ise, 7 günlük maksimum mukavemette sağlanan artış ancak 3 kat civarında olabilmektedir. Araştırmacı yaptığı çalışmalar neticesinde, C sınıfı uçucu külü çok etkili ve ekonomik bir stabilizasyon malzemesi olarak değerlendirmektedir.



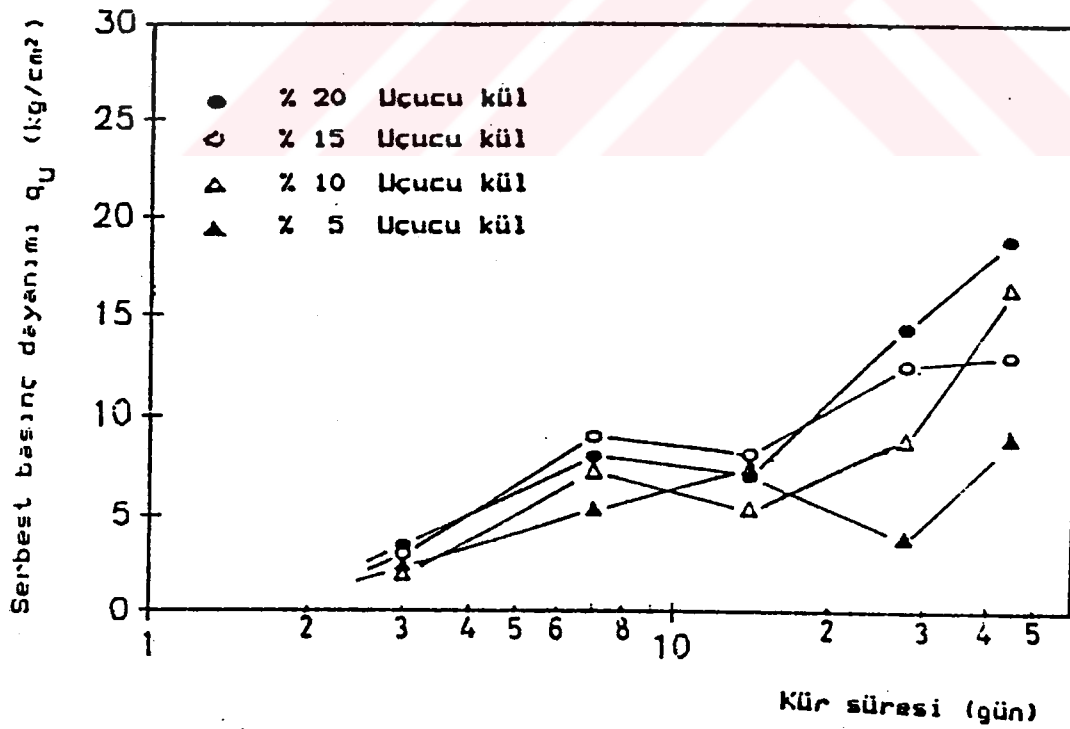
Şekil 3.16 : Uçucu külün mukavemete etkisinde gecikme ile gözlenen değişim (Ferguson, 1993)

Özbayoğlu (1993), kumlu zemin örneklerinin, belirli oranlarda bentonit katkısı yanında, % 5, 10, 15 ve % 20 oranında uygulanan uçucu kül ve % 5 ve % 10 çimento katkısı ile mukavemetlerinde meydana gelen değişimi incelemiştir. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de farklı uçucu kül oranlarının % 5 bentonit katkısı yanında ayrıca % 5 kireç ve % 5 çimento katkısı ile kumlu zemin örneğinin, serbest basınç dayanımında meydana gelen değişimler görülmektedir.

Deneyler neticesinde, zemine uçucu kül ilavesi ile mukavemet değerlerinde belirgin artışlar elde edilebildiğini fakat uçucu kül oranının artışının, belirli bir değerden sonra olumlu bir katkı sağlamadığı neticesine ulaşılmıştır. Araştırmacı, atık madde konumundaki uçucu küllerinin yol dolgularında kullanılmasının ülke ekonomisi için yararlı olacağını belirtmektedir.



Şekil 3.17 : Farklı oranlarda uçucu kül katkısının zamana bağlı olarak dayanıma etkisi (% 5 çimento+% 5 bentonit) (Özbayoğlu, 1993)



Şekil 3.18 : Farklı oranlarda uçucu kül katkısının zamana bağlı olarak dayanıma etkisi (% 5 kireç+% 5 bentonit) (Özbayoğlu, 1993)

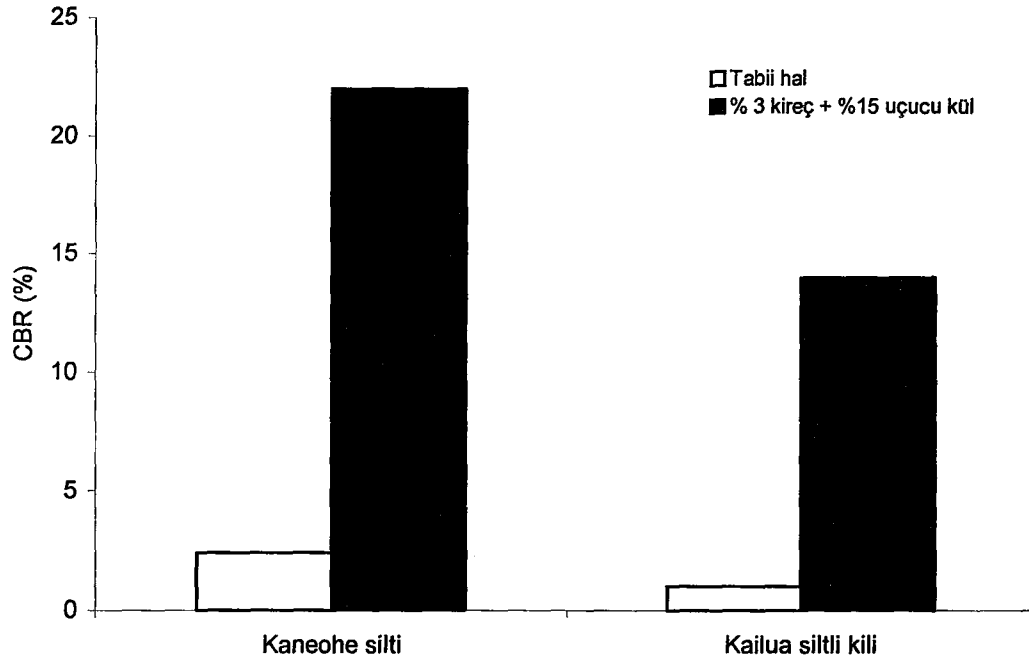
Nicholson ve Kashyap (1993), volkanik kökenli Hawaii zeminlerinin mukavemet değerlerinin uçucu kül ilavesi ile değişimlerini incelemişlerdir. % 3 kireç ve % 15 uçucu kül ilave edilen zeminlerden, Kaneohe siltinin CBR değerinin 2.4'ten 22'ye ve Kailua siltli kilinin 1 olan CBR değerinin de 14'e sıçradığını belirlemişlerdir. (Şekil 3.19).

Araştırmacıların üzerinde çalıştıkları 5 farklı zemin numunesine ait serbest basınç dayanımları ve bunların kür süresine bağlı olarak değişimleri Tablo 3.4'de görülmektedir. Araştırmacılar, uçucu külün mukavemete etkisinin her zemin tipi için farklı karakteristikleri olduğunu belirtmektedirler. Öyle ki, bazı zemin cinslerinde uçucu kül ilavesi ile 1 günlük kür sonunda mukavemet neredeyse yarı yarıya düşmekte fakat ilerleyen kür süresinde ilk mukavemet değerini biraz aşabilmekte iken (Palolo kili gibi), bazı tip zeminlerde (Kapolei siltli kili gibi) tam tersine 1 günlük kür sonunda dahi mukavemet iki katına kadar artabilmektedir (Şekil 3.20).

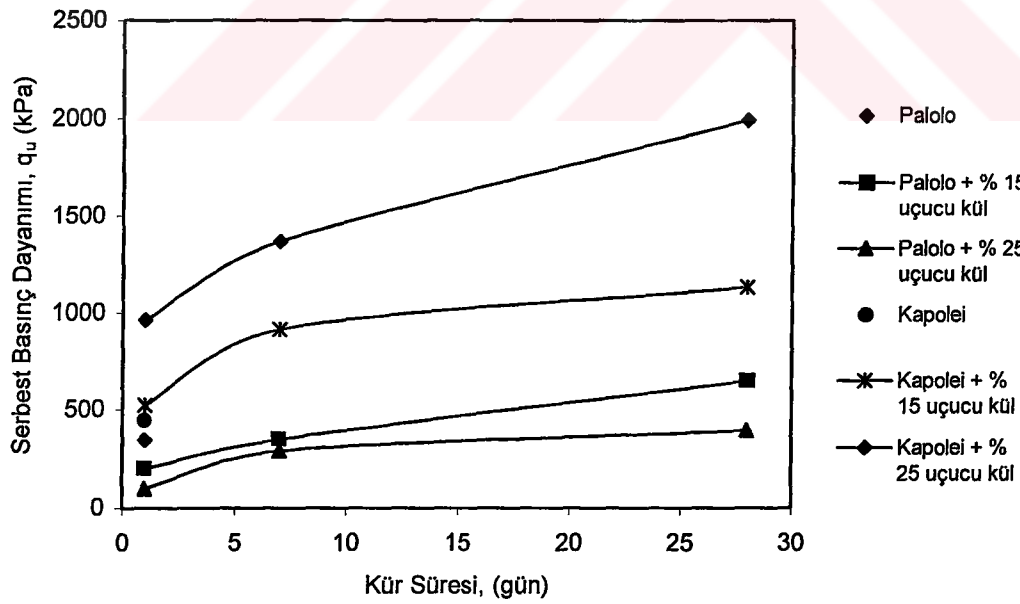
Tablo 3.4 : Uçucu kül ilaveli Hawaii killlerinin serbest basınç dayanımları (q_u) (kPa)
(Nicholson ve Kashyap, 1993)

	Palolo			Kaneohe			Kailua		
% KÜL	0	15	25	0	15	25	0	15	25
1 Gün	347	200	98	517	245	209	433	451	195
7 Gün		349	289		302	249		500	396
28 Gün		651	395		397	299		659	520

	Kapolei			Manoa					
% KÜL	0	15	25	0	15	25			
1 Gün	444	523	962	349	120	102			
7 Gün		914	1368		307	259			
28 Gün		1134	1993		599	350			



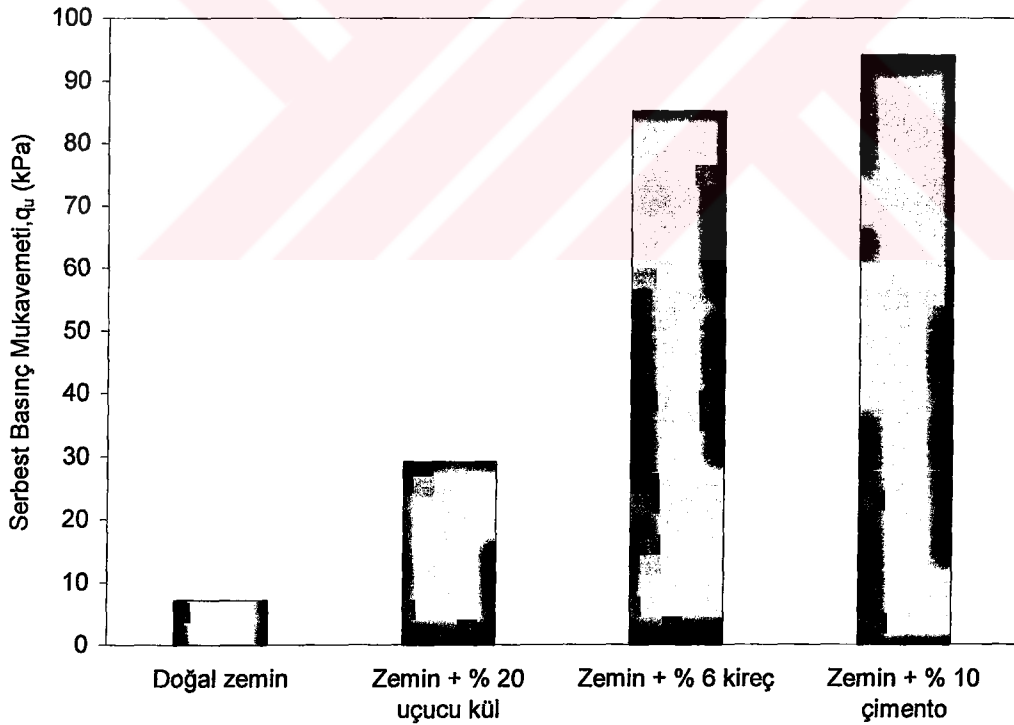
Şekil 3.19 : Volkanik kökenli zeminlerinin CBR değerlerinin değişimi
(Nicholson ve Kashyap, 1993)



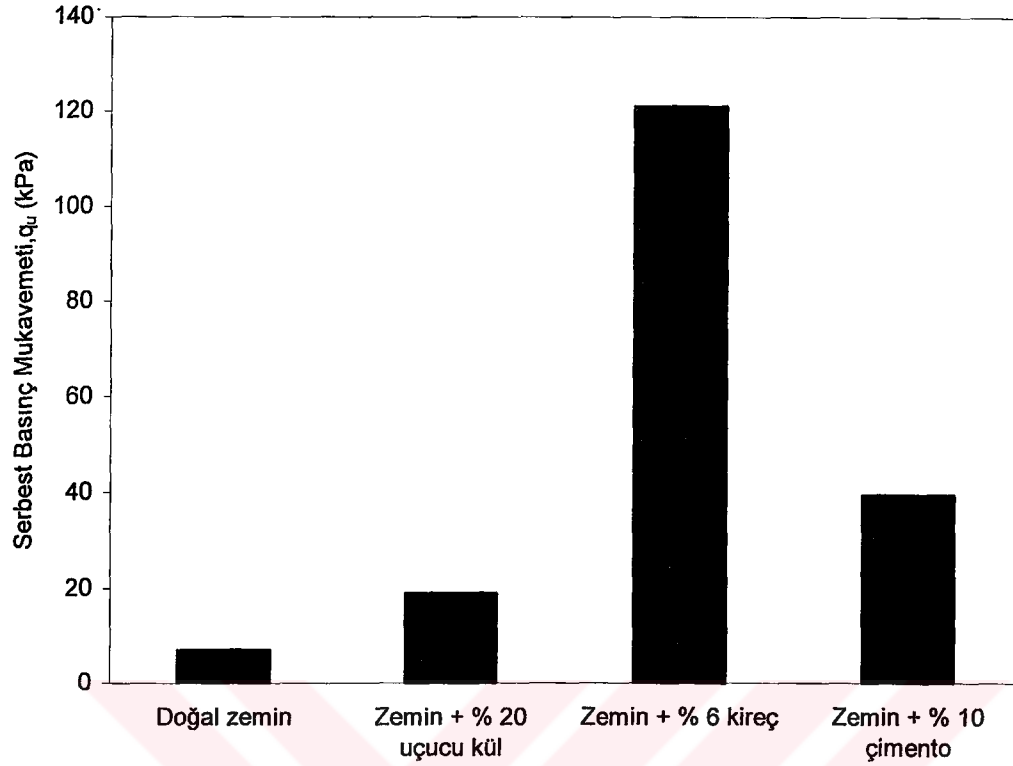
Şekil 3.20 : Volkanik kökenli zeminlerinin serbest basınç dayanımlarını kür süresine bağlı olarak değişimi (Nicholson ve Kashyap, 1993)

Keshawarz ve Dutta (1993), şişme potansiyeli yüksek olan ve alışlagelmiş olarak çimento ve kireç ile ıslah edilen Teksas zeminlerinin, bir alternatif olarak % 20 F sınıfı uçucu kül kullanarak iyileştirilmesini araştırmışlardır. Ayrıca bir karşılaştırmaya olanak sağlamak üzere, aynı zeminler % 6 kireç ve % 10 portland çimentosu ilavesi ile hazırlanan karışımlar da hazırlanmıştır. Araştırmada, Teksas kökenli iki ayrı tip doğal zeminden yararlanılmıştır. Hazırlanan doğal zemin ve karışımlara ait numuneler, 28 günlük kür süresi sonunda mukavemet değerlerinin belirlenmesi amacıyla, serbest basınç deneyi ile kesilmişlerdir. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 de yer alan serbest basınç deneyi sonuçlarından da anlaşıldığı üzere uçucu kül ilavesinin zemin mukavemetinde ortaya çıkarttığı artış, kireç ve çimento ile ıslah edilenlere göre daha düşük bir seviyede kalmaktadır. Fakat uçucu külün ucuz maliyeti göz önüne alındığında önemli bir alternatif olduğu da aşıkardır.

Araştırmacılar diğer stabilizasyon malzemeleri gibi uçucu külün de her zemin tipi için farklı bir etkisi olduğunu, bu sebeple, uçucu kül katkı oranının iyileştirme yapılacak zemin için ıslah işleminden önce deneysel çalışmalar ile belirlenmesi



Şekil 3.21 : II. Cadde zemin numunesine ait serbest basınç deneyi sonuçları
(Keshawarz ve Dutta, 1993)



Şekil 3.22 : Premont zemin numunesine ait serbest basınç deneyi sonuçları
(Keshawarz ve Dutta, 1993)

gerekliliğini de belirtmektedirler. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ayrıca uçucu kül ile stabilize edilen zeminin ve doğal zeminin elektron mikroskopu ile çekilen görüntülerine de yer verilmiştir (Şekil 3.23 ve Şekil 3.24). Uçucu külün zemin mukavemetini arttırmasına sebep olduğu düşünülen ve kısaca CSH (C=Kalsiyum oksit; S=Silikon dioksit; H= Su) olarak isimlendirilen hidrasyon ürünü de Şekil 3.24’de uçucu kül taneciğinin etrafını sarmış olarak yer almaktadır.

Khan ve Sarker (1993), uçucu kül ile zemin stabilizasyonu çalışmalarında, enzim kullanımının mukavemete etkilerini belirlemek üzere, kaolin kili üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada kullanılan enzim, organik kökenli, toksit olmayan ve çevreye zararsız olup biyolojik yöntemlerle elde edilmiştir. Enzimin etkisini belirlemek üzere hem doğal zemine hem de uçucu kül-zemin karışımına % 0-10 arasında değişen oranlarda enzim ilave edilmiş ve serbest basınç deneyi ile numuneler kesilmiştir.

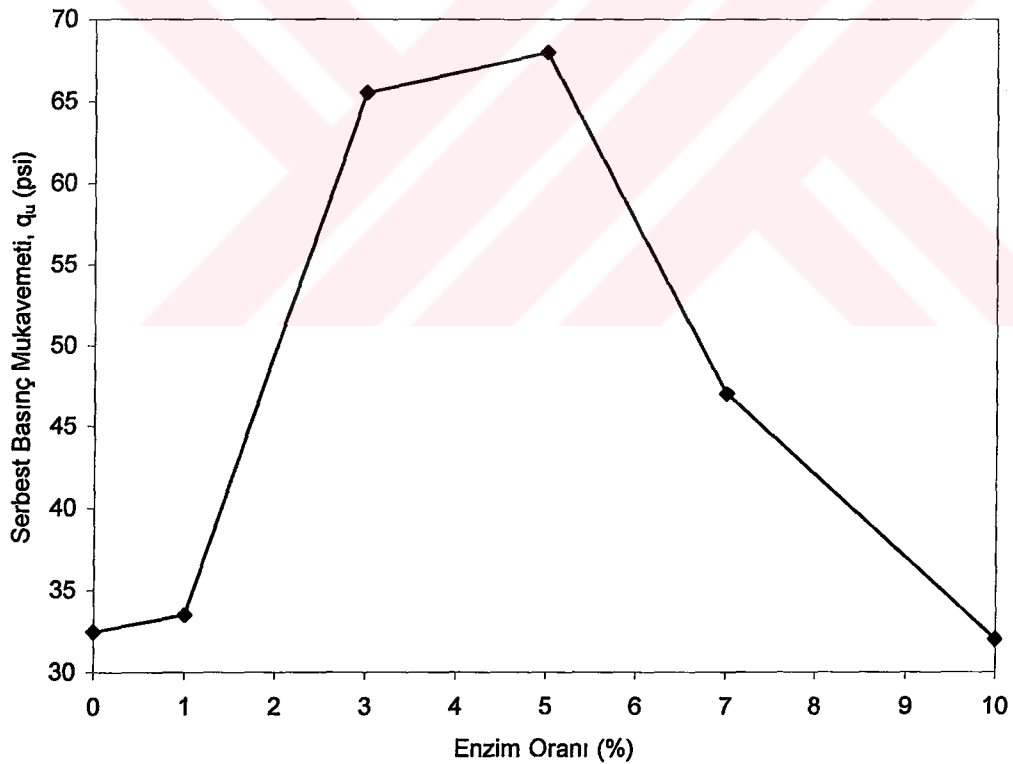


Şekil 3.23 : Premont zemininin mikrofrafisi (Keshawarz ve Dutta, 1993)

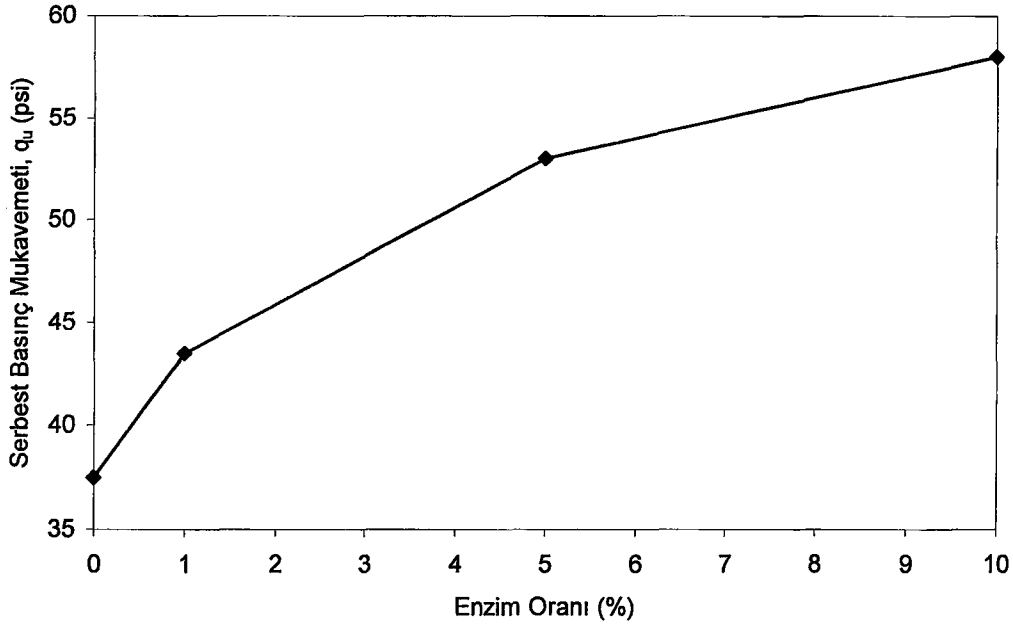


Şekil 3.24 : % 20 uçucu kül ilave edilmiş Premont zemininin mikrofrafisi(Keshawarz ve Dutta, 1993)

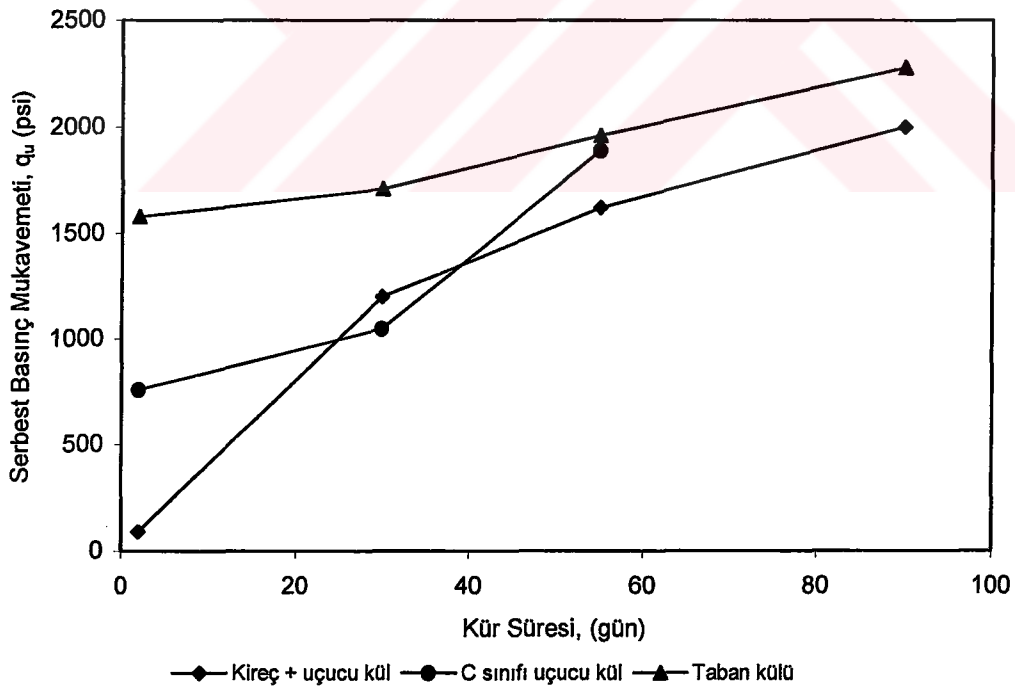
Şekil 3.25 de enzimin kaolin kilinin mukavemetine etkisi görülmektedir. % 5 oranında enzim ilavesi ile zeminin mukavemeti % 110 mertebesinde bir artış göstermekle beraber, artan enzim ilavesi ile zeminin mukavemeti azalmakta ve nihayet % 10 enzim ilavesinde, mukavemet doğal zeminin mukavemet değeri ile aynı değeri almaktadır. Şekil 3.26 da ise enzimin, % 5 uçucu kül-zemin karışımının mukavemetine etkisi görülmektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü üzere enzim ilavesi, karışımın 1 günlük mukavemeti üzerinde de bir artış yaratmakta ve bu artış artan enzim ilavesi ile yükselişine devam etmekte ve % 10 enzim ilavesinde maksimum değerini almaktadır. Araştırmacılar çalışmaları neticesinde, enzim ilavesinin uçucu kül - zemin karışımlarının mukavemetini % 70 oranlarında artırdığını ve enzimin hem düşük oranlarda kullanılması hem de uçucu kül gibi ucuz bir malzeme olması sebebiyle, uçucu kül ile gerçekleştirilen zemin iyileştirilmesi çalışmalarında enzim kullanımının da bir seçenek olarak göz önünde tutulmasını tavsiye etmektedirler.



Şekil 3.25 : Kaolin kilinin farklı enzim oranlarındaki 1 günlük serbest basınç mukavemetleri (Khan ve Sarker, 1993)

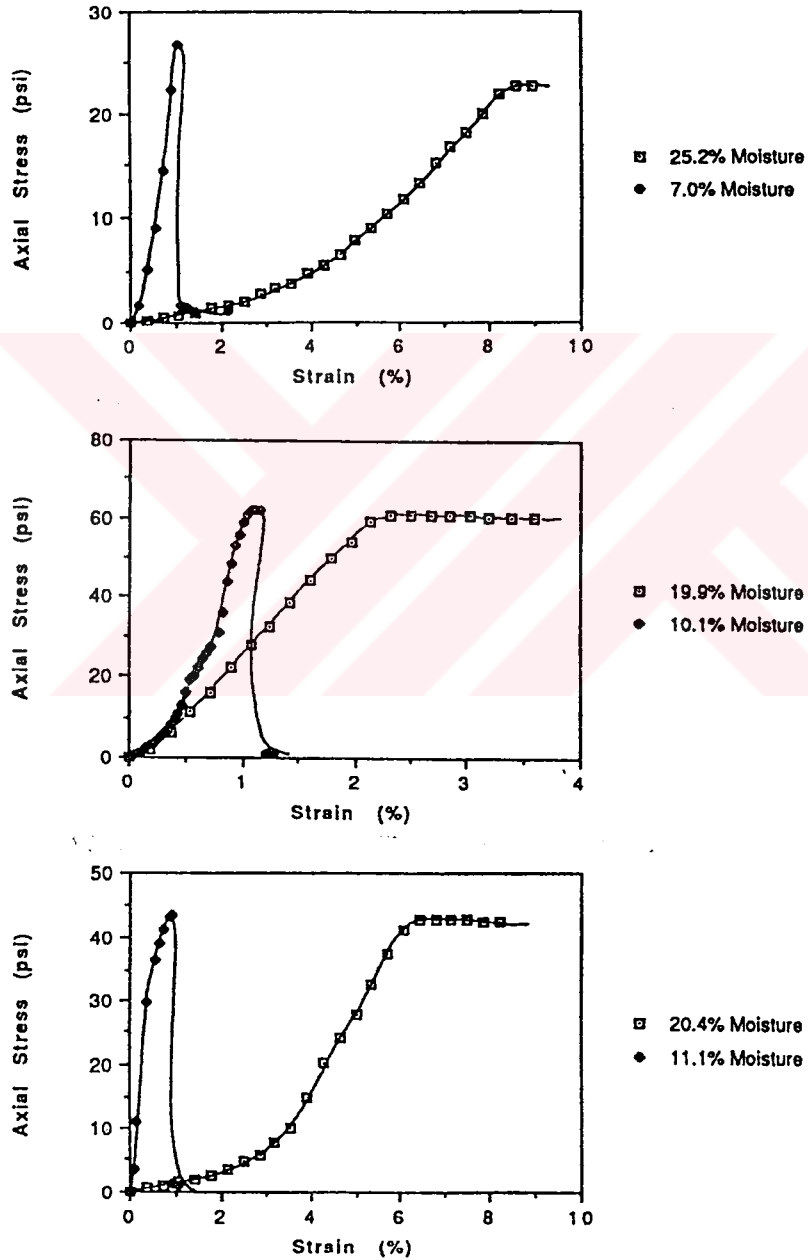


Şekil 3.26 : Kaolin kili+% 5 uçucu kül karışımının farklı enzim oranlarındaki 1 günlük serbest basınç mukavemeti(Khan ve Sarker, 1993)



Şekil 3.27 : Uçucu kül ve diğer malzemelerin mukavemette meydana getirdikleri zamana bağlı artış (Smith, 1993)

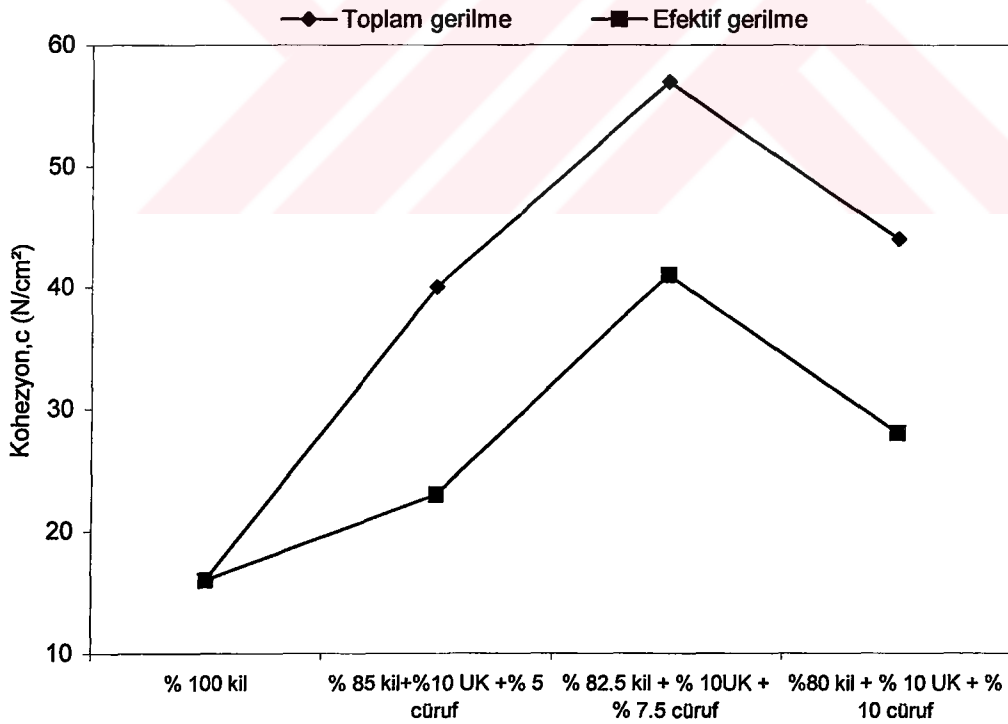
Smith (1993), diğer araştırmacılardan farklı olarak uçucu külün tek başına endüstriyel atıkların stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Netice olarak birçok uygulamada kullanılan, fiyatı yüksek olan ve üretimi kısıtlı olan taban külü, kireç tozu ve çimento tozu karşısında uçucu külün, kolay elde edilebilirliği ve ucuzluğu sebebiyle endüstriyel atık stabilizasyonunda kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 3.27 de uçucu kül ve diğer malzemelerin mukavemette meydana getirdikleri zamana bağlı artış gösterilmektedir.



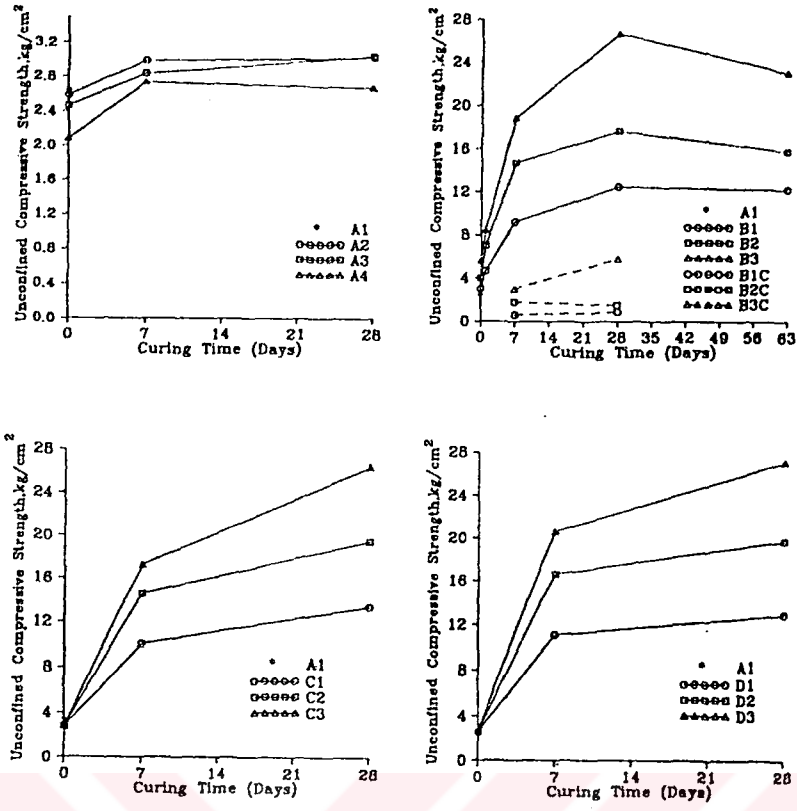
Şekil 3.28 : Arıtma çamuru – Uçucu kül karışımlarına ait eksenel yük-boy değişimi eğrileri (Maher,1993)

Maier ve diğeri (1993), su arıtma tesislerinde büyük oranda ortaya çıkan, su muhtevası ve ince daneli madde içeriği yüksek olan arıtma çamurunun, uçucu kül ilavesi ile iyileştirilmesi amacıyla bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Farklı oranlardaki arıtma çamuru ve F sınıfı uçucu kül karışımlarının dayanımını belirlemek üzere gerçekleştirilen serbest basınç deneylerine ait sonuçlar, Şekil 3.28 de görülmektedir. Görüldüğü üzere optimum su muhtevasının üstündeki ve altındaki su muhtevalarında, karışımların serbest basınç mukavemet değerleri yaklaşık aynı değerleri almakla beraber, optimumun kuru tarafındaki numuneler çok kırılğan bir yapı sergilemektedirler.

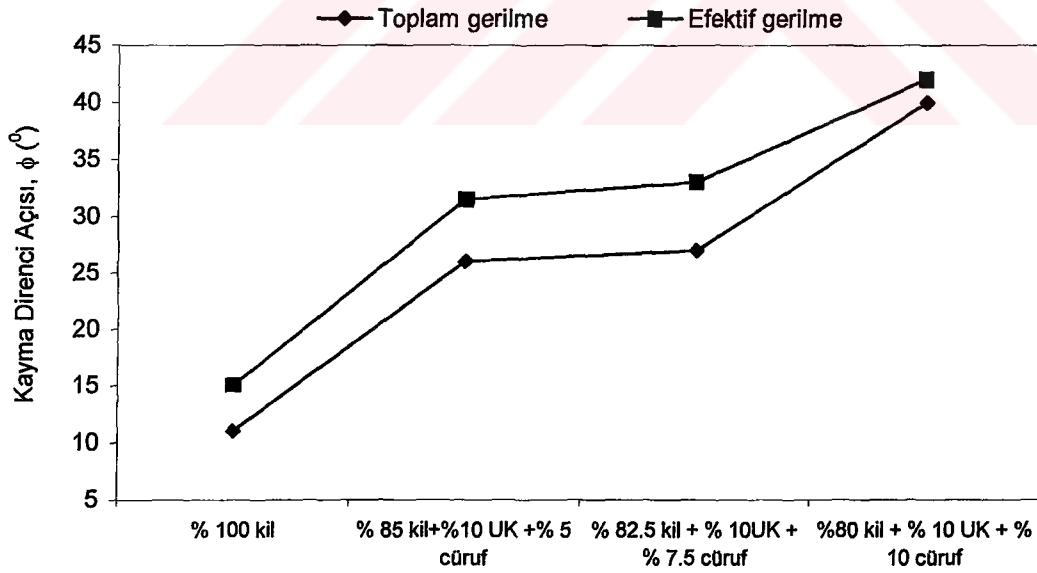
Chu ve Kao (1993), düşük plastisiteli gri Tayvan kilinin, uçucu kül ve cüruf ile iyileştirilmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Uçucu kül olarak F sınıfı uçucu kül kullanılmış ve puzzolanik reaksiyon meydana getirebilmek amacıyla da % 20 civarında kireç ihtiva eden cüruf ilave edilmiştir. Şekil 3.29 da görülen serbest basınç deneyi sonuçlarına göre zemine sadece uçucu kül ilavesi ile mukavemette gözlemlenen artışlar çok kısıtlı olamakta iken karışıma ayrıca cüruf ilavesi ile daha yüksek mukavemet artışları elde edilmiş görünmekle beraber zamana bağlı olarak



Şekil 3.30 : Tayvan kili-üçucu kül karışımlarına ait kohezyon (Chu ve Kao, 1993)



Şekil 3.29 : Tayvan kili-uçucu kül karışımlarına ait serbest basınç deneyi sonuçları (Chu ve Kao,1993)

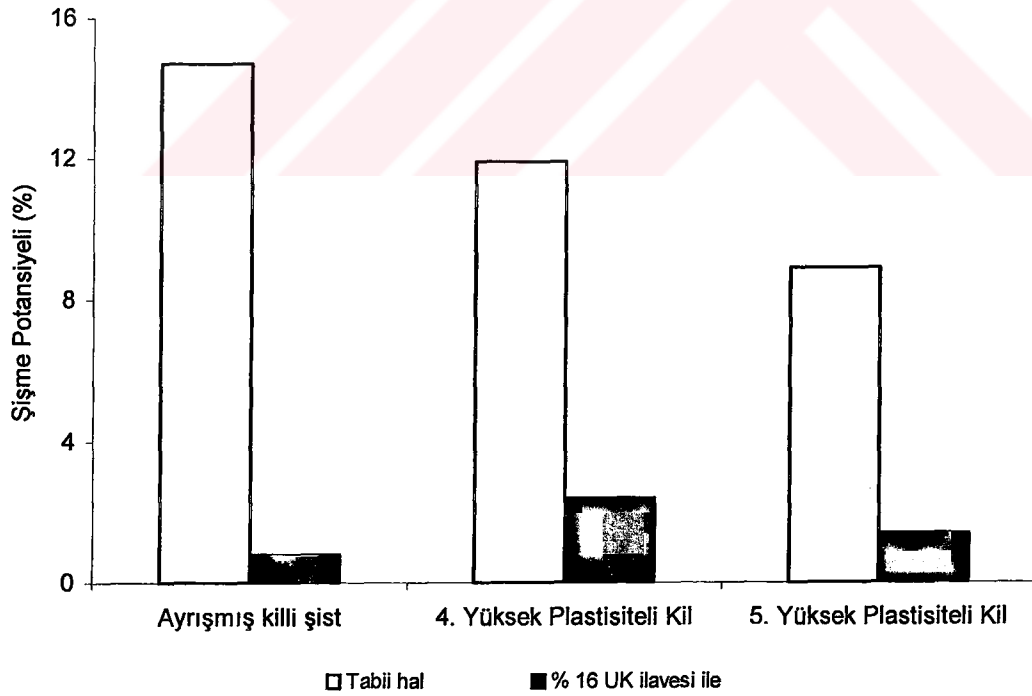


Şekil 3.31 : Tayvan kili-uçucu kül karışımlarına ait kayma direnci açıları (Chu ve Kao, 1993)

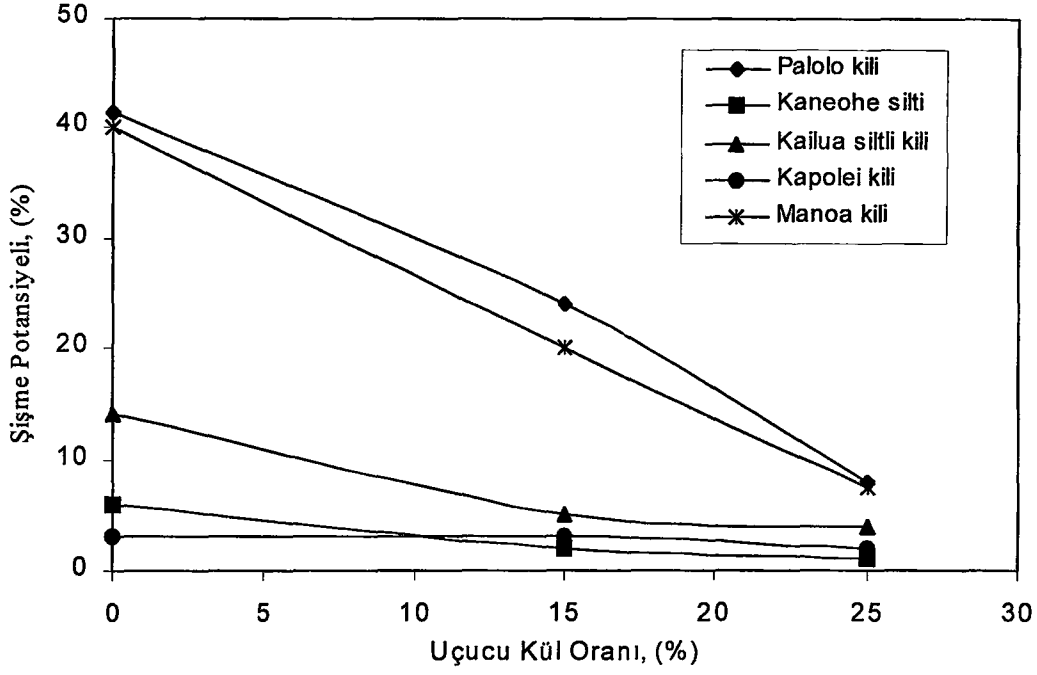
mukavemet değerlerinin azalma durumu da gözlemlenmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen c ve ϕ değerlerinin değişimi de Şekil 3.30 ve Şekil 3.31 de görülmektedir.

3.3 Uçucu Külün Şişme Potansiyeline Etkisi

Ferguson (1994), Topeka Heartland Park yarış pistinin iyileştirilmesi projesinde, 6 farklı zemin cinsi üzerinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarda, zemine uçucu kül ilavesinin, zeminin şişme potansiyelini düşürdüğü sonucuna varmıştır. Şekil 3.32’de görüldüğü üzere, örneğin ayrışmış killi şist % 14.7 olan şişme potansiyeli, % 16 uçucu kül ilavesi ile sonucunda % 0.8 seviyelerine kadar inebilmektedir. Araştırmacı, bu azalmanın büyük bir ihtimalle, uçucu külün hidrasyonu esnasında zemin daneciklerinin çimentovari partiküllerle kurduğu bağlardan ve zemin daneciklerinin flokülleşmesinden kaynaklandığını öne sürmekte ve bu yöntemin, kireçle stabilizasyona göre, hem maliyetinin düşük olması hem de uçucu külün kireç gibi işlemiden önce sulandırılmaya gereksinim duymaması nedeniyle, para ve zaman tasarrufu sağladığını belirtmektedir.



Şekil 3.32 : Zeminin şişme potansiyelinde sağlanan azalma (Ferguson, 1993)



Şekil 3.33 : Volkanik kökenli Hawaii zeminlerinin şişme potansiyellerinin değişimi (Nicholson ve Kashyap, 1993)

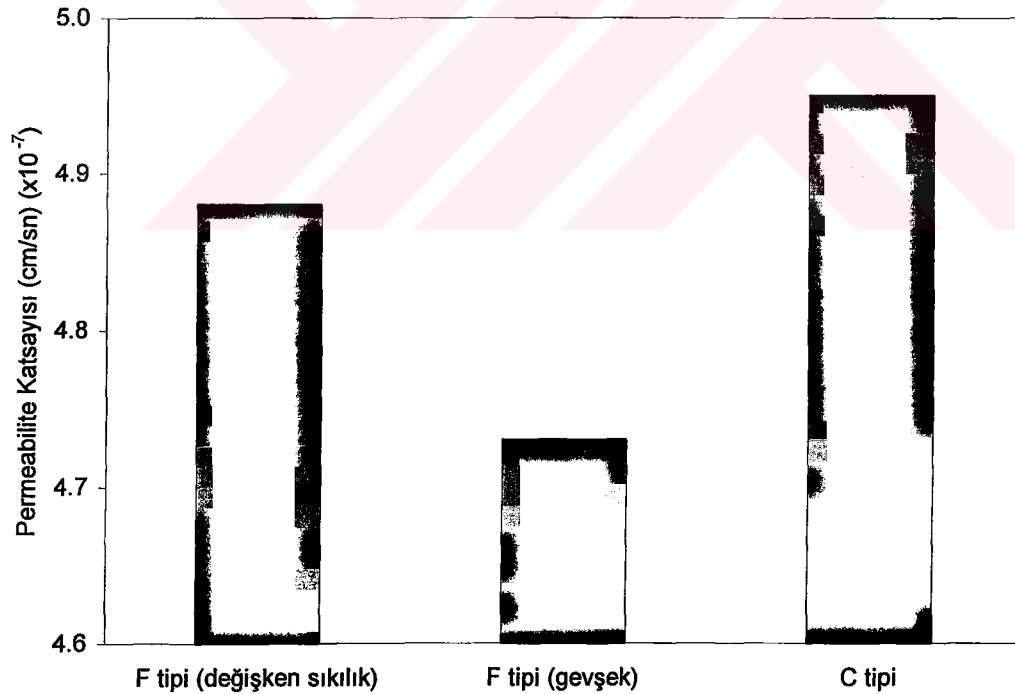
Nicholson ve Kashyap (1993) yüksek şişme potansiyeline sahip, volkanik kökenli Hawaii zeminlerinin şişme potansiyellerinin, uçucu kül ilavesi ile değişimlerini incelemişlerdir. Kaneohe kili ve Kailua siltli kilinin CBR şişme testinde, şişme potansiyeli değerlerinin % 10 mertebesinde, % 1 seviyesine indiğini gözlemlemişlerdir. 5 tip zemin üzerinde ayrıca gerçekleştirilen serbest şişme testlerinde, her zemin tipi için uçucu kül ilavesinin şişme potansiyelini azalttığını belirlemişlerdir. (Şekil 3.33)

3.4 Uçucu Külün Geçirgenliğe Etkisi

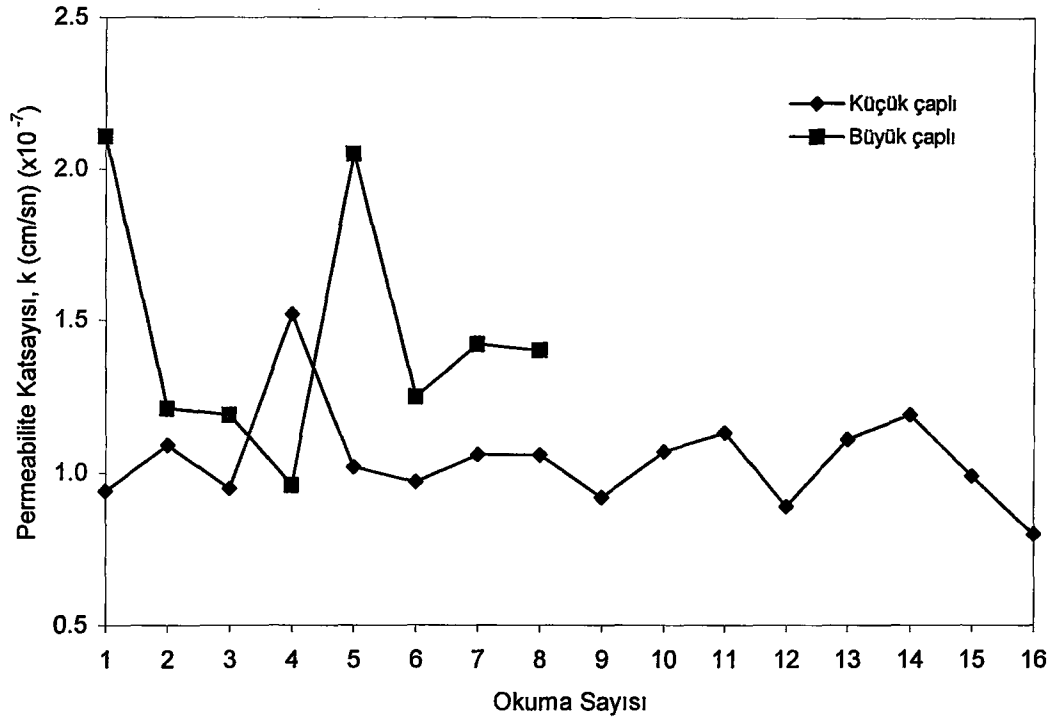
Uçucu külün özelliklerine ve miktarına bağlı olarak, yeterli sıkıştırma ile, A.B.D. şartnamelerinde istenen 10^{-7} cm/sn'den daha düşük permeabiliteler elde edilebilmektedir. C tipi uçucu külün sertleşme özelliğinden dolayı, arazide sıkıştırmanın su ile karıştırdıktan sonra süratle gerçekleştirilmesi (veya sertleşmeyi geciktirici katkı maddesi kullanılması) sıkıştırma enerjisi ve su muhtevasının sıkı kontrolü gerekmektedir. Uçucu kül karışımlarının, ıslanma/kuruma ve donma/çözülme dayanımı, inorganik sıvıların geçirimsizliği olumsuz etkilemesi ve çevre açısından kimyasal etkileşim gibi özelliklerinin de olumlu olduğu tespit

edilmiştir (Wasti, 1993). Araştırmacı, uçucu küllerin geçirgenliği azaltıcı etkisi nedeniyle, özellikle çevre geoteknolojisi alanında; zararlı atık veya çöp depolanan sahalarda sızdırmazlık tabakası olarak, eski katı atık sahalarının kullanıma açılmasında enjeksiyon olarak, katı atık sahalarındaki düşey geçirimsizlik perdelerinin geçirimsizliğinin azaltılmasında büyük faydalar sağlayacağını belirtmektedir. Şekil 3.34’de araştırmacının deneysel çalışma neticesinde elde ettiği F ve C tipi uçucu küllere ait permeabilite değerleri görülmektedir.

Günal (1996) Kemerburgaz kilinin % 20 oranında Seyitömer uçucu külü ile karıştırılması neticesinde elde edilen karışımın permeabilite katsayısının 1.88×10^{-7} cm/sn olduğunu belirtmektedir. Araştırmacı elde edilen bu değer, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Örgütü (US EPA)’nın katı atık ve çöp depolama sahalarının sızdırmazlık tabakaları için belirlediği, permeabilite katsayı sınırına uygun olduğunu da belirtmektedir. Araştırmaya ait deney sonuçları Şekil 3.35 de görülmektedir.



Şekil 3.34 : F ve C tipi uçucu küllerin permeabilite katsayıları (Wasti,1993)

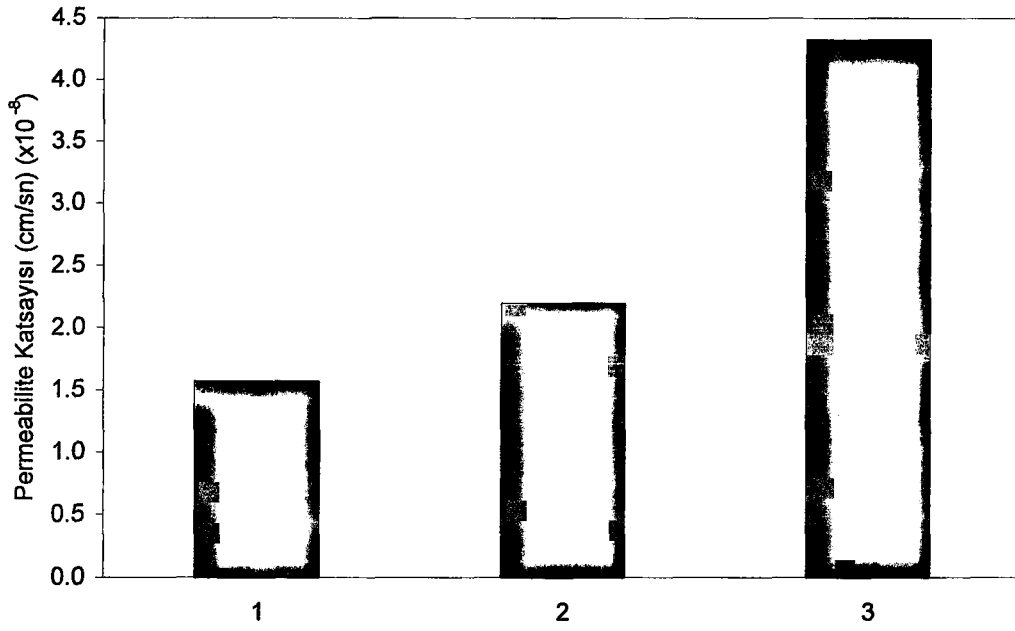


Şekil 3.35 : Permeabilite deneyi sonuçları (Güenal, 1996)

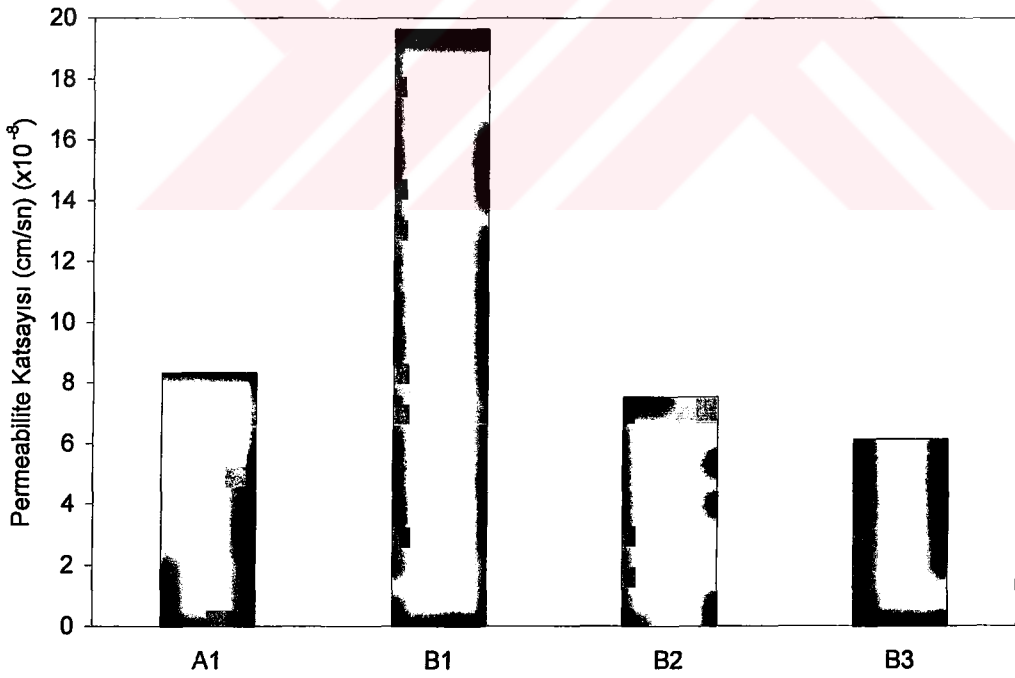
Tablo 3.5 : Arıtma çamuru ve uçucu kül karışımlarına ait permeabilite katsayıları (Maher,1993)

Karışım	1	2	3
Uçucu kül : Arıtma çamuru oranı	2 : 1	2.5 : 1	3 : 1
Permeabilite katsayısı (cm/sn)	1.56×10^{-7}	2.19×10^{-7}	4.32×10^{-7}

Maher ve diğerleri (1993), su arıtma tesislerinde atık olarak büyük oranda ortaya çıkan, yüksek su muhtevası ve ince daneli madde içeriği sebebiyle, depolanma durumunda dahi, yüksek kurutma maliyeti yaratan arıtma çamurunun uçucu kül ilavesi ile iyileştirilmesi amacıyla, bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacıların, farklı oranlardaki arıtma çamuru ve uçucu kül karışımları üzerinde gerçekleştirdikleri permeabilite deneylerine ait sonuçlar, Tablo 3.5 de görülmektedir ve Şekil 3.36 yardımı ile karşılaştırmalarını yapmak mümkün olmaktadır. Elde edilen sonuçlardan, karışımların 10^{-7} cm/sn civarında permeabilite katsayılarına sahip olduğu ve artan arıtma çamuru ile permeabilite katsayılarında bir miktar azalma



Şekil 3.36 : Arıtma çamuru ve uçucu kül karışımlarına ait permeabilite katsayıları
(Maher,1993)



Şekil 3.37 : Tayvan kili, uçucu kül ve cüruf karışımlarına ait permeabilite katsayıları
(Chu ve Kao, 1993)

meydana getirdiği sonuçları çıkarılmaktadır. Araştırmacılar bu sonuçlar ışığında, arıtma çamuru ve uçucu kül karışımlarının geçirimsiz tabaka ve perdelerin teşkilinde kullanılabileceğini belirtmektedirler.

Chu ve Kao (1993), düşük plastisiteli gri Tayvan kilinin, uçucu kül ve cüruf ile iyileştirilmesini yönelik deneysel çalışmalarında, karışımlara ait permeabilite katsayılarını da belirlemişlerdir. Araştırmalarında uçucu kül olarak F sınıfı uçucu kül kullanmışlar ve puzzolanik reaksiyon yaratabilmek amacıyla kireç ihtiva eden cüruf kullanmışlardır. Çeşitli oranlardaki karışımlar 10^{-8} cm/sn mertebesinde permeabilite katsayıları vermişlerdir. Tablo 3.6 ve Şekil 3.37 de deneysel çalışmalara ait sonuçlar görülmektedir.

Tablo 3.6 : Taiwan kili,uçucu kül ve cüruf karışımlarına ait permeabilite katsayıları (Chu ve Kao, 1993)

<i>Karışım no</i>	<i>A1</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>
Kil oranı (%)	100	85	82.5	80
Uçucu kül oranı (%)	0	10	10	10
Cüruf oranı (%)	0	5	7.5	10
Permeabilite katsayısı, k (cm/sn)	8.3×10^{-8}	19.6×10^{-8}	7.5×10^{-8}	6.1×10^{-8}

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1 Zemin Numunesi

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan zemin numunesi, İstanbul Kemerburgaz'da bulunan, Kilsan tuğla fabrikasına ait kil yataklarından temin edilmiştir. Bu bölgedeki kilin düşük plastisiteli olduğunun bilinmesi, zemin numunesinin bu bölgeden alınmasında etkili olmuştur.

4.1.1 Dane Birim Hacim Ağırlığı

Zemin numunesinin dane birim hacim ağırlığının belirlenmesinde ağırlık şişesi yönteminden yararlanılmıştır. Bu deney yöntemi izlenilerek gerçekleştirilen üç adet deney neticesinde zemin numunesinin dane birim hacim ağırlığı,

$$\gamma_s = 26.9 \text{ kN/m}^3$$

olarak elde edilmiştir.

4.1.2 Kıvam Limitleri

4.1.2.1 Likit Limit

Zemin numunesinin likit limitinin belirlenmesinde Casagrande deney yönteminden yararlanılmıştır. Tekrarlanan iki deney neticesinde zemin numunesinin likit limiti,

$$w_L = \% 50$$

olarak elde edilmiştir.

4.1.2.2 Plastik Limit

Zemin numunesinin plastik limitinin belirlenmesinde Casagrande deney yönteminden yararlanılmıştır. Yapılan deney neticesinde zemin numunesinin plastik limiti,

$$w_p = \% 19$$

olarak elde edilmiştir. Bu durumda zemin numunesinin plastisite indisi,

$$I_p = \% 31$$

olmaktadır.

4.1.3 Zemin Numunesinin Sınıflandırılması

Zemin numunesinin dane çapı dağılımı iri daneler için elek analizi, ince daneler için ise hidrometre analizi yapılarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen granülometri eğrisi Şekil 4.1 de görülmektedir.

Zemin numunesinin granülometri eğrisinden,

İri dane oranı : % 19

Kum yüzdesi : % 19

İnce dane oranı : % 81

Silt yüzdesi : % 57

Kil yüzdesi : % 24

D_{60} : 0.013 mm

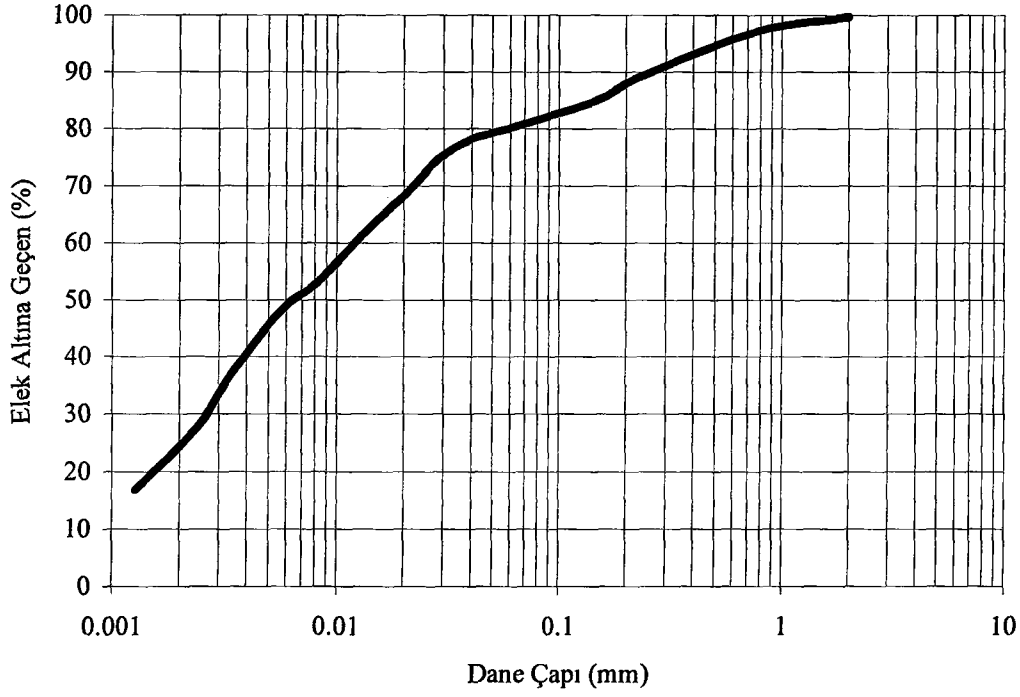
D_{30} : 0.0027 mm

D_{60} : 0.00025 mm

Üniformluk katsayısı, $C_U = 52$

Derecelenme katsayısı, $C_r = 2.24$

olarak elde edilir. Geliştirilmiş birleşik zemin sınıflandırmasına göre, deneysel çalışmalarda kullanılan zemin numunesi “yağlı kil kumlu (CH)” olmaktadır.



Şekil 4.1 : Zemin numunesine ait granülometri eğrisi

4.1.4 Kompaksiyon Karakteristikleri

Zeminin kompaksiyon eğrisinin belirlenmesinde Standart Proktor Deney yönteminde yararlanılmıştır. Deney şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

Bir gün önceden etüve yerleştirilen zemin numunesinden 30 N tartılmış ve bu ağırlık zemin numunesi ağırlığı olarak kaydedilmiştir. Geniş bir madeni kaba yerleştirilen zemin numunesi, ısısının bir miktar azalmasını sağlamak üzere bir süre daha bekletilmiştir. Daha sonra zemin numunesinin ağırlığının yaklaşık % 7.5'ine tekabül eden 2.25 N su, suyun homojen olarak dağılımını sağlamak üzere, bir sprej yardımıyla azar azar ilave edilmiş ve sürekli karıştırılmıştır. Su tamamen ilave edildikten sonra karışımda su kaybı meydana gelmesini engellemek üzere metal kabın üzeri nemli bir bezle örtülmüş ve suyun zemin danelerine iyice nüfuz etmesini sağlamak üzere karışım, 45 dakika kadar bu durumda bekletilmiştir.

Sürenin dolmasıyla beraber zemin, su muhtevasının % 7.5 civarında olduğu bu durumda standart proktor yöntemiyle sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra deneye ilgili ağırlıklar ölçüldükten sonra sıkıştırma işleminin yapıldığı su muhtevasını belirlemek üzere standart proktor deney kabının hem üst hem de alt

kısmından alınan bir miktar numune iki ayrı kaba konularak etüve yerleştirilmiştir. (Hesaplamalarda bu iki kaptan elde edilen su muhtevalarının ortalaması kullanılmıştır). Böylece kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkisine ait ilk değerler elde edilmiştir.

Deney kabındaki sıkıştırılmış zemin kabın dışına alınıp, tekrar deney yapılacak boyuta ufalandıktan sonra, zeminin kuru ağırlığının yaklaşık yüzde 2.5'ine tekabül eden 0.75 N su, yine sprey yardımıyla yavaş yavaş ilave edilerek, zeminin su muhtevası yükseltilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra metal kabın üzeri tekrar nemli bezle örtülerek, zemin 20 dakika kadar dinlendirilmiştir. Daha sonra zemin tekrar sıkıştırılarak kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkisine ait ikinci nokta belirlenmiştir. Deney bu şekilde, her defasında zeminin su muhtevası yaklaşık % 2.5 arttırılarak, yaş numune + kalıp ağırlığında azalma meydana gelene kadar tekrarlanmıştır.

Bu şekilde gerçekleştirilen iki adet Standart Proktor Deneyi neticesinde zeminin,

Optimum su muhtevası, $w_{opt} = \% 21$

Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{k,maks} = 16.05 \text{ kN/m}^3$

olarak elde edilmiştir. Zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi Şekil 4.2 de görülmektedir.

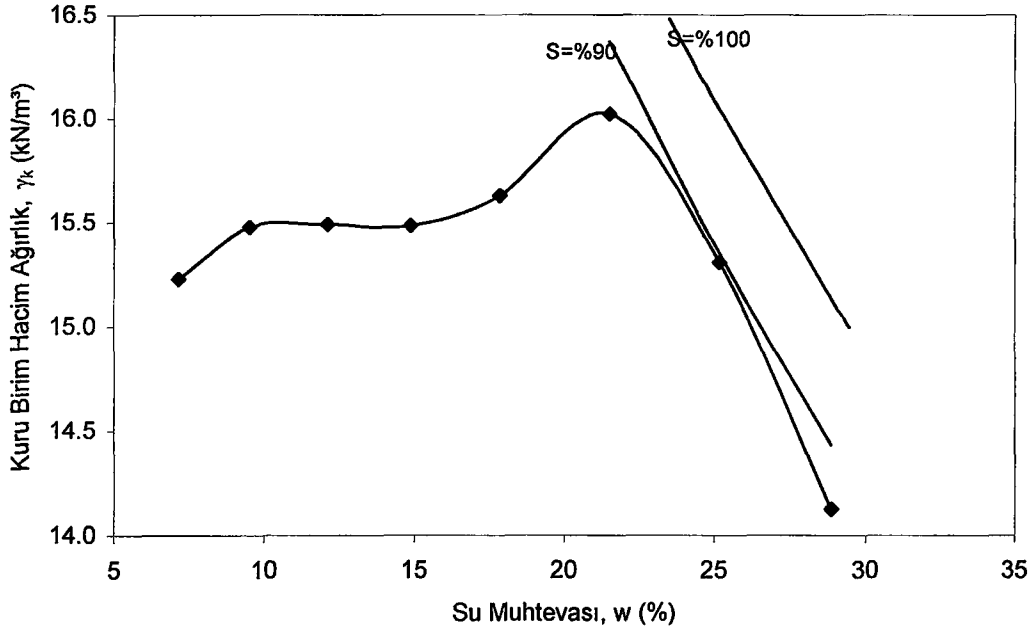
4.2 Uçucu Kül Numunesi

Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu kül numunesi Seyitömer Termik Santrali'ne ait olup, İTÜ İnşaat Fakültesi Geoteknik Laboratuvarı'dan temin edilmiştir. Uçucu kül numunesinin su muhtevası,

$$w = \% 2$$

olarak tespit edilmiştir. 1996 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde gerçekleştirilen bir yüksek lisans tezine göre bu uçucu kül numunesinin özellikleri şu şekildedir:

- Dane birim hacim ağırlığı, $\gamma_s = 19.8 \text{ kN/m}^3$
- Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{k,maks} = 8.50 \text{ kN/m}^3$ (Standart Proktor)



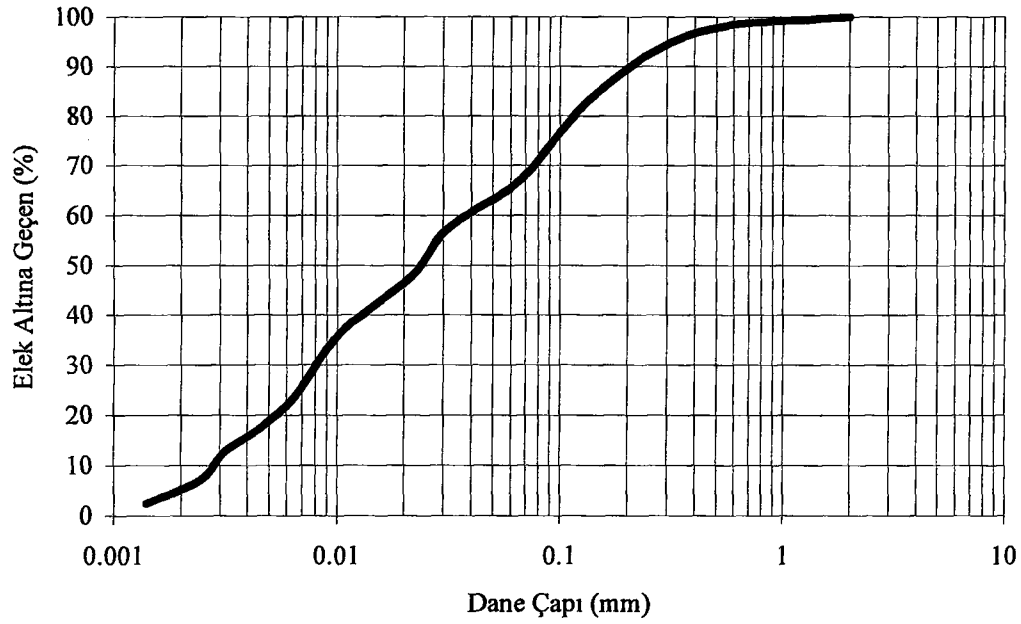
Şekil 4.2 : Zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi

- Optimum su muhtevası, $w_{opt} = \% 52$ (Standart Proktor)
- Likit ve plastik limit deneyleri gerçekleştirilememiştir, yani numune non-plastiktir.
- Uçucu kül numunesi ince danelidir ve danecikleri genel olarak silt boyutundadır. Birleştirilmiş zemin sınıflandırılmasına göre sınıflandırılacak olsaydı, “killi silt, kumlu” olarak sınıflandırılabilirdi. (Günel, 1996)

Yine aynı çalışmada belirlenen uçucu kül numunesine ait granülometri eğrisi Şekil 4.3 de gösterilmiştir.

4.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan deney numunelerinin neler olduğu, hazırlanmaları esnasında hangi yöntemlerin izlendiği, hangi esaslara uyulduğu gibi konular açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.3 : Uçucu Kül Numunesinin Granülometri Eğrisi

4.3.1 Deney Numunelerinin Gruplanması

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, zemin numunesine uçucu kül eklenmesinin, zemin özelliklerine etkisini inceleyebilmek açısından üç deney grubu oluşturulmuştur. Bunlardan birincisi tamamı kil numunesinden oluşan deney numunesi, diğer ikisi ise iki farklı oranda uçucu kül içeren karışımlardır. Deney grupları,

- 1) % 100 Kil Numunesi (% 100 K)
- 2) Kil Numunesi + % 10 Uçucu Kül (K + % 10 UK)
- 3) Kil Numunesi + % 20 Uçucu Kül (K + % 20 UK)

şeklinde. (Parantez içinde yazılmış olan kısaltmalar deney gruplarını temsilen grafiklerde kullanılmıştır). Uçucu külün zeminde gerçekleştireceği varsayılan iyileştirmenin zamana bağımlılığı veya zamanla değişiminin gözlemlenebilmesi amacıyla, içerisinde % 10 ve % 20 oranında uçucu kül ihtiva eden deney gruplarına ait 1 günlük, 7 günlük, 30 günlük ve 195 günlük alt deney grupları oluşturulmuştur. % 100 kil numunesinden oluşan deney numunelerinin özelliklerinde zamana bağlı bir değişim gözlemlenmeyeceğinden, bu deney grubuna ait alt gruplar teşkil

Tablo 4.1 : Deney Numuneleri

Kür Süresi (gün)	1	7	33	195
% 100 Kil Numunesi	3 Deney	-	-	-
Kil Numunesi + % 10 Uçucu Kül	3 Deney	3 Deney	3 Deney	3 Deney
Kil Numunesi + % 20 Uçucu Kül	3 Deney	3 Deney	3 Deney	3 Deney

[Deneyler 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa çevre basınçlarında gerçekleştirilmişlerdir.]

edilmemiştir. Deney alt gruplarına ait numunelerin mukavemetlerinin belirlenmesinde, üç farklı çevre basıncı altında, üç eksenli basınç deneyi yapılması düşünüldüğünden her alt grup için üç adet üç eksenli basınç deneyi numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan toplam 27 deney numunesinin dağılımı Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

4.3.2 Optimum Su Muhtevalarının Belirlenmesi

Üç eksenli basınç deneylerinde kullanılacak her üç numune grubuna ait deney numunelerinin optimum su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanması gerekmektedir. Bu sebeple ilk adım olarak üç deney grubuna ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim hacim ağırlık ilişkilerini belirlemek gerekmektedir. Bu deneysel çalışmada $w_{opt} - \gamma_{k, maks}$ ilişkisinin belirlenmesinde standart proktor deney yöntemi uygulanmıştır.

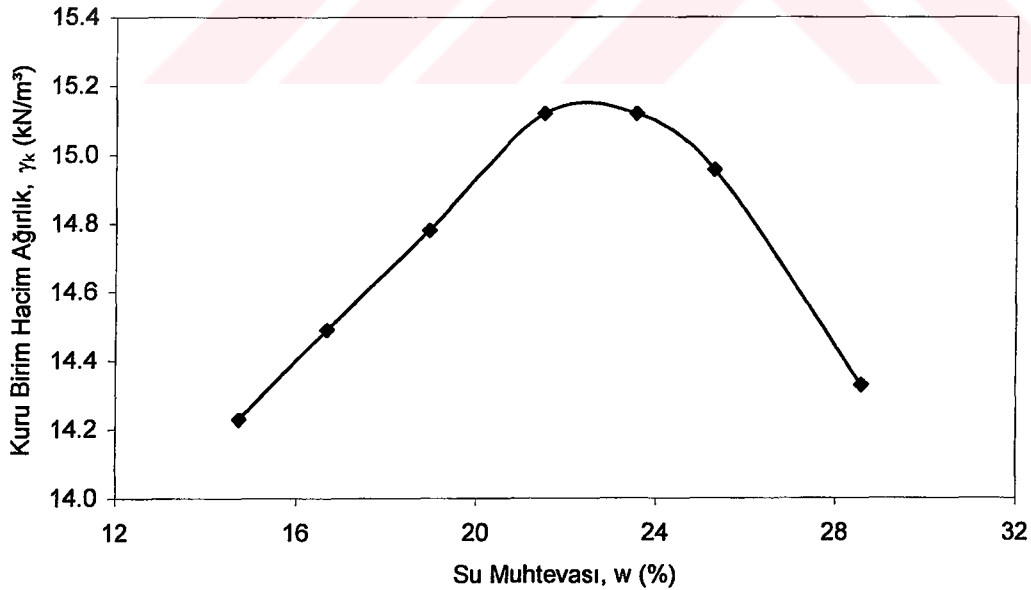
4.3.2.1 Kil + % 10 Uçucu Kül Numunesi İçin Standart Proktor Deneyi

Bir gün önceden etüve yerleştirilen zemin numunesinden 27 N tartılmış ve bu ağırlık zemin numunesi ağırlığı olarak kaydedilmiştir. Geniş bir madeni kaba yerleştirilen zemin numunesi üzerine, zemin numunesi ağırlığının % 10’una tekabül eden, 2.7 N uçucu kül ilave edilmiş ve karışım homojen görünüm kazanana kadar yaklaşık 5-10 dakika boyunca, küçük bir kürek yardımıyla, karıştırılmıştır. Homojen görünüm elde

edildikten sonra karışımın ıslısının bir miktar daha azalmasını sağlamak üzere bir süre daha beklenmiştir. Daha sonra zemin numunesi ve uçucu külün toplam ağırlığının yaklaşık % 15'ine tekabül eden 4.5 N su karışıma ilave edilmiştir. Suyun homojen olarak dağılmasını sağlamak üzere, su bir sprey yardımıyla azar azar karışıma ilave edilmiş ve sürekli karıştırılmıştır. Suyun tamamen ilave edildikten sonra karışımda su kaybı meydana gelmesini engellemek üzere metal kabın üzeri nemli bir bezle örtülmüş ve suyun zemin danelerine iyice nüfuz etmesini sağlamak üzere karışım, 45 dakika kadar bu durumda bekletilmiştir.

Sürenin dolmasıyla beraber, karışımın su muhtevasının % 15 civarında olduğu bu durumda karışım standart proktor yöntemiyle sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlanıp, deneyle ilgili ağırlıklar ölçüldükten sonra sıkıştırma işleminin yapıldığı su muhtevasını belirlemek üzere standart proktor deney kabının hem üst hem de alt kısmından alınan bir miktar numune iki ayrı kaba konularak etüve yerleştirilmiştir. (Hesaplamalarda bu iki kaptan elde edilen su muhtevelarının ortalaması, karışımın su muhtevası olarak dikkate alınmıştır). Böylece kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkisine ait ilk değerler elde edilmiştir.

Deney kabındaki sıkıştırılmış karışım kabın dışına alınıp, tekrar deney yapılacak boyuta ufalandıktan sonra, karışımın kuru ağırlığının yaklaşık yüzde 2.5'ine tekabül



Şekil 4.4 : Kil + %10 Uçucu Kül İçin Kompaksiyon Eğrisi

eden 0.75 N su, yine sprej yardımıyla yavaş yavaş ilave edilerek, karışımın su muhtevası yükseltilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra metal kabın üzeri tekrar nemli bezle örtülerek, karışım 20 dakika kadar dinlendirilmiştir. Daha sonra karışım tekrar sıkıştırılarak kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkisine ait ikinci nokta belirlenmiştir. Deney bu şekilde, her defasında karışımın su muhtevası yaklaşık % 2.5 artırılarak, yaş numune + kalıp ağırlığında azalma meydana gelene kadar tekrarlanmıştır.

Kil + % 10 uçucu kül numunesi için yapılan bu deneyde su muhtevası – kuru birim hacim ağırlık ilişkisine ait toplam yedi nokta belirlenmiştir. Bu karışıma ait kompaksiyon eğrisi Şekil 4.4 de gösterilmiştir. Bu eğriye göre Kil + % 10 Uçucu Kül karışımının;

Optimum su muhtevası, $w_{opt} = \% 23$

Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{k,maks} = 15.15 \text{ kN/m}^3$

olmaktadır.

4.3.2.2 Kil + % 20 Uçucu Kül Numunesi İçin Standart Proktor Deneyi

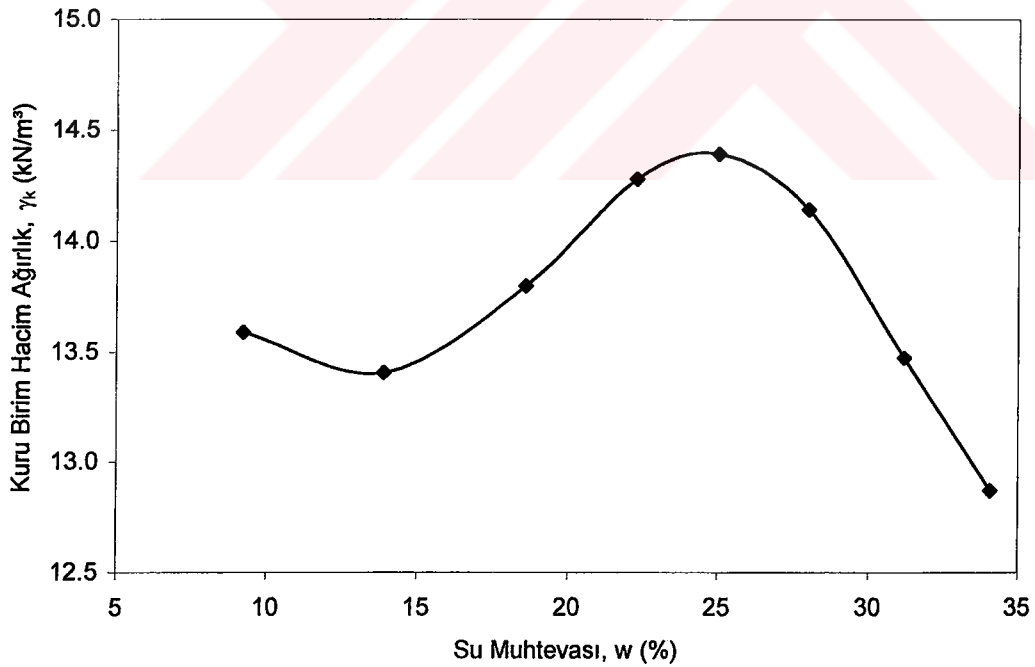
Bir gün önceden etüve yerleştirilen zemin numunesinden 25 N tartılmış ve bu ağırlık zemin numunesi ağırlığı olarak kaydedilmiştir. Geniş bir madeni kaba yerleştirilen zemin numunesi üzerine, zemin numunesi ağırlığının % 20'sine tekabül eden, 5 N uçucu kül ilave edilmiş ve karışım homojen görünüm kazanana kadar yaklaşık 5-10 dakika boyunca, küçük bir kürek yardımıyla, karıştırılmıştır. Homojen görünüm elde edildikten sonra karışımın ısısının bir miktar daha azalmasını sağlamak üzere bir süre daha beklenmiştir. Daha sonra zemin numunesi ve uçucu külün toplam ağırlığının yaklaşık % 15'ine tekabül eden 4.5 N su karışıma ilave edilmiştir. Suyun homojen olarak dağılımını sağlamak üzere, su bir sprej yardımıyla azar azar karışıma ilave edilmiş ve sürekli karıştırılmıştır. Suyun tamamen ilave edildikten sonra karışımın su kaybı meydana gelmesini engellemek üzere metal kabın üzeri nemli bir bezle örtülmüş ve suyun zemin danelerine iyice nüfuz etmesini sağlamak üzere karışım, 45 dakika kadar bu durumda bekletilmiştir.

Sürenin dolmasıyla beraber, karışımın su muhtevasının % 15 civarında olduğu bu durumda karışım standart proktor yöntemiyle sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlanıp, deneyle ilgili ağırlıklar ölçüldükten sonra sıkıştırma işleminin yapıldığı su muhtevasını belirlemek üzere standart proktor deney kabının hem üst hem de alt kısmından alınan bir miktar numune iki ayrı kaba konularak etüve yerleştirilmiştir.

(Hesaplamalarda bu iki kaptan elde edilen su muhtevalarının ortalaması, karışımın su muhtevası olarak dikkate alınmıştır). Böylece kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkisine ait ilk değerler elde edilmiştir.

Deney kabındaki sıkıştırılmış karışım kabın dışına alınıp, tekrar deney yapılacak boyuta ufalandıktan sonra, karışımın kuru ağırlığının yaklaşık yüzde 2.5'ine tekabül eden 0.75 N su, yine sprey yardımıyla yavaş yavaş ilave edilerek, karışımın su muhtevası yükseltilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra metal kabın üzeri tekrar nemli bezle örtülerek, karışım 20 dakika kadar dinlendirilmiştir. Daha sonra karışım tekrar sıkıştırılarak kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkisine ait ikinci nokta belirlenmiştir. Deney bu şekilde, her defasında karışımın su muhtevası yaklaşık % 2.5 arttırılarak, yaş numune + kalıp ağırlığında azalma meydana gelene kadar tekrarlanmıştır.

Kil + % 20 uçucu kül numunesi için yapılan bu deneyde su muhtevası – kuru birim hacim ağırlık ilişkisine ait toplam sekiz nokta belirlenmiştir. Bu karışıma ait kompaksiyon eğrisi Şekil 4.5 de gösterilmiştir. Bu eğriye göre Kil + % 20 Uçucu Kül karışımının;



Şekil 4.5 : Kil + %20 Uçucu Kül İçin Kompaksiyon Eğrisi

Optimum su muhtevası, $w_{opt} = \% 25$

Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{k,maks} = 14.4 \text{ kN/m}^3$

Olmaktadır.

4.3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi Numunelerinin Hazırlanması

Üç eksenli basınç deneyi numunelerinin hazırlanmasında, bütün deney grupları için, izlenen yöntem aynı olduğundan, her grup için ayrı ayrı açıklanmasına gerek görülmemiştir. İzlenen yöntem şöyledir:

Bir gün önceden etüve yerleştirilen zemin numunesinden belirli bir ağırlıkta alınan zemin, geniş metal bir kapta, o deney grubuna ait oranda uçucu külle homojen bir görünüm elde edilene kadar iyice karıştırılır. Deney gruplarına ait, daha önceden belirlenen optimum su muhtevasını sağlayacak ağırlıkta su tartılarak spreyci kalıbına alınır. Aynen standart proktor deneyinde olduğu gibi kap içerisindeki su azar azar ve sürekli karıştırılarak zemin ve uçucu kül karışımına ilave edilir.

Karışımın suyun ilavesi, su muhtevasını her seferinde yaklaşık % 2.5 oranında arttıracak şekilde uygulanır ve her % 2.5'lik ilavenin ardından, suyun danelere daha iyi nüfuz edebilmesini sağlamak üzere, karışım 25 dakika boyunca, kabın üzeri nemli bir bezle örtülerek, dinlendirilir. Karışımın su muhtevası optimuma çıkarıldıktan sonra, karışım standart proktor deney yöntemi izlenerek sıkıştırılır. Deney kabının üst başlığı çıkartılıp, üst yüzey bir spatula yardımıyla düzeltildikten sonra, 38 mm çapında üç adet numune alıcı, bir pres yardımıyla sabit bir hızla sıkıştırılmış zemin içerisine itilir.

Numune alıcılar zemin dışına alınırken, karışımın su muhtevasının optimum su muhtevasına yakınlığının kabul edilebilir sınırlarda olup olmadığını belirlemek üzere, deney kabının hem üst hem de alt tarafında yer alan sıkıştırılmış karışımdan bir miktar alınarak metal kaba konulur ve etüve yerleştirilir. Numune alıcı içerisinde yer alan sıkıştırılmış zemin, sabit bir hızla çıkartıldıktan sonra üç eksenli basınç deneyinde kullanılmak üzere 3 adet numune hazırlanmış olur.

4.3.4 Numunelerin Saklanması

Üç eksenli basınç deneyinde kullanılacak olan numunelerin büyük bir kısmı, uçucu külün zemin özelliklerine etkisinin zamana bağlılığının ölçülebilmesi için belirli sürelerde bekletilmesi gerektiğinden, hazırlanan numunelerin saklanma koşulları,

Tablo 4.2 : Numunelerin Su Muhtevalarında Meydana Gelen Değişim

<i>Kür Süresi (gün)</i>	<i>1</i>	<i>7</i>	<i>33</i>
% 100 Kıl Numunesi	% 0.72	-	-
Kıl Numunesi + % 10 Uçucu Kül	% - 1.02	% - 0.41	% 0.25
Kıl Numunesi + % 20 Uçucu Kül	% 0.08	% - 0.7	% - 1.08

çeşitli dış faktörlerin deney sonuçlarını etkilememesini sağlamak üzere, büyük bir önem arz etmektedir. Numunelerin saklanması en önemli unsur numunelerin su muhtevalarının korunması olmaktadır. Bu sebeple numune alıcıdan çıkartılan numuneler, derhal birkaç kat ince naylona sarıldıktan ve etiketlendikten sonra üçerli gruplar halinde kalın bir naylon poşete konup ağzı bantlanarak, nem odasına yerleştirilmiştir. Numuneler, üzerinde üç eksenli basınç deneyi yapılana kadar bu ortamda muhafaza edilmiştir. Numunelerin hazırlanması ile üç eksenli basınç deneyi yapılması arasında geçen süreçte, numunelerin su muhtevalarında meydana gelen değişim Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

4.4 Üç Eksenli Basınç Deneyi

Bu bölümde zemine uçucu kül ilave edilmesiyle, zeminin mukavemetinde ortaya çıkan değişimin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve bu deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler sunulmuştur. Deney yöntemi olarak arazi şartlarına daha yakın bir olması sebebiyle üç eksenli basınç deneyi tercih edilmiştir.

4.4.1 Konsolidasyonsuz-Drenajsız Deney Yöntemi

Deney numunelerinin mukavemetini belirlemek üzere gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinde konsolidasyonsuz-drenajsız deney yöntemi izlenmiştir. Konsolidasyonsuz-drenajsız deneylerin deney hızının yüksek olması, deney numunelerinin suya doymun olmamaları ve su muhtevalarında meydana gelecek değişimlerin deneylerden alınacak sonuçları etkileyecek olması bu deney tipinin

seçilmesinde etkili olmuştur. Bu çalışmada gerçekleştirilen konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneylerinde izlenen yöntem şu şekildedir:

Standart proktor deney yöntemi ile sıkıştırılarak hazırlanan deney numuneleri, nem odasından çıkarıldıktan sonra ağırlığı, boyu ve çapı ölçülerek kaydedilir. Aparat yardımıyla deney numunesine kauçuk kılıf geçirilir. Alt başlık üzerine poröz taş ve kağıt konulduktan sonra deney numunesi yerleştirilir ve tekrar kağıt ve poröz taş konulduktan sonra üst başlık yerleştirilir. Kauçuk kılıf alt ve üst başlıkları kapatacak şekilde ayarlandıktan sonra aparat yardımıyla alt ve üst başlıklara ikişer tane olmak üzere toplam 4 adet contayla numunenin dış ortamla ilişkisi kesilir. Hazne takılıp ve iyice sıkıştırıldıktan sonra drenaj vanaları kapatılır ve hazneye su gönderilir. Hazne tamamen dolduktan sonra hazne üstünde yer alan hava tahliye vidası kapatılır. Çevre basıncı uygulanır ve yük halkasının üst başlıkla teması sağlandıktan sonra numune yüklenmeye başlanır.

Her numune alt grubuna ait üç deney numunesi üzerinde üç farklı çevre basıncı altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Çevre basınçları sırasıyla 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa olarak seçilmiştir. Deney hızı 0.0125 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Konsolidasyonsuz-drenajsız deney için yavaş sayılabilecek bu hızın seçilmesindeki amaç “ c ” parametresi elde etmektir. Bu deneysel çalışmada asıl olarak üç eksenli basınç deneyinden elde edilecek pik değer yeterli olmasına karşın, numunenin yüklenmesi işlemine % 16-20’lik deformasyona ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği ELE marka üç eksenli basınç deney aletinde takılı yük halkasına ait halka katsayısı 0.1484 kg/div’dir. Gerçekleştirilen tüm üç eksenli deneylerde, deney homojenliği sağlamak üzere aynı deney aleti, aynı yük halkası ve aynı kauçuk kılıf kullanılmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

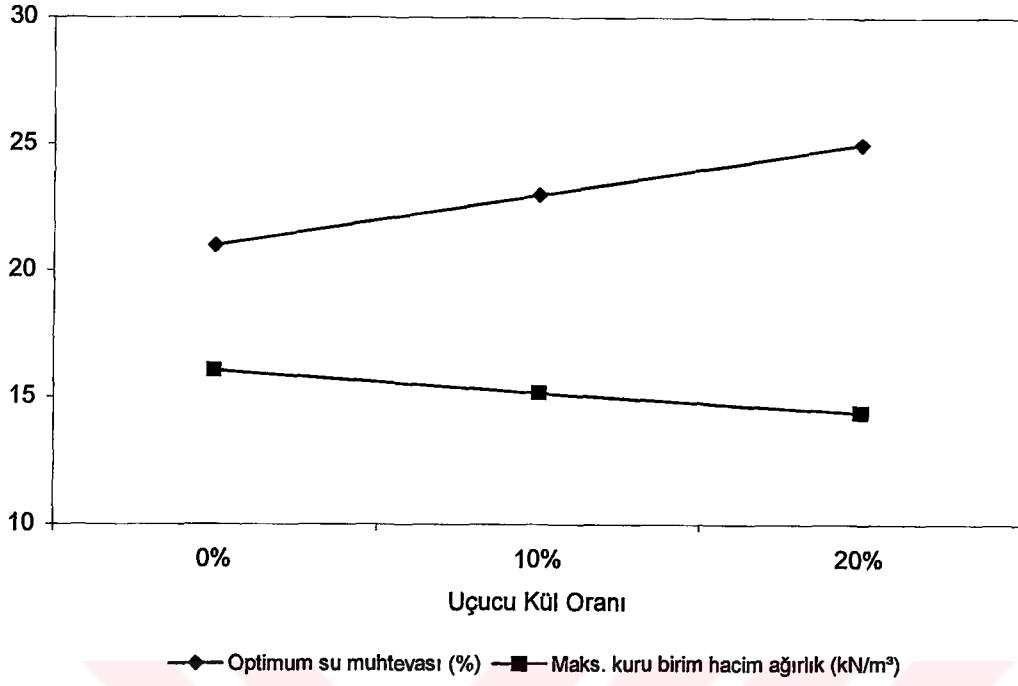
5.1 Standart Proktor Deneyleri

Kemberburgaz kili ve Kemberburgaz kiline % 10 ve % 20 oranında Seyitömer uçucu külü ilavesi ile elde edilen karışımlar üzerinde gerçekleştirilen standart proktor deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar Tablo 5.1 de görülmektedir. Deneyler neticesinde, beklendiği üzere, zemine uçucu kül ilavesi ile optimum su muhtevası değerlerinde artış ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde de azalma meydana gelmektedir. Şekil 5.1 de optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin, uçucu kül oranlarına bağlı olarak değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir.

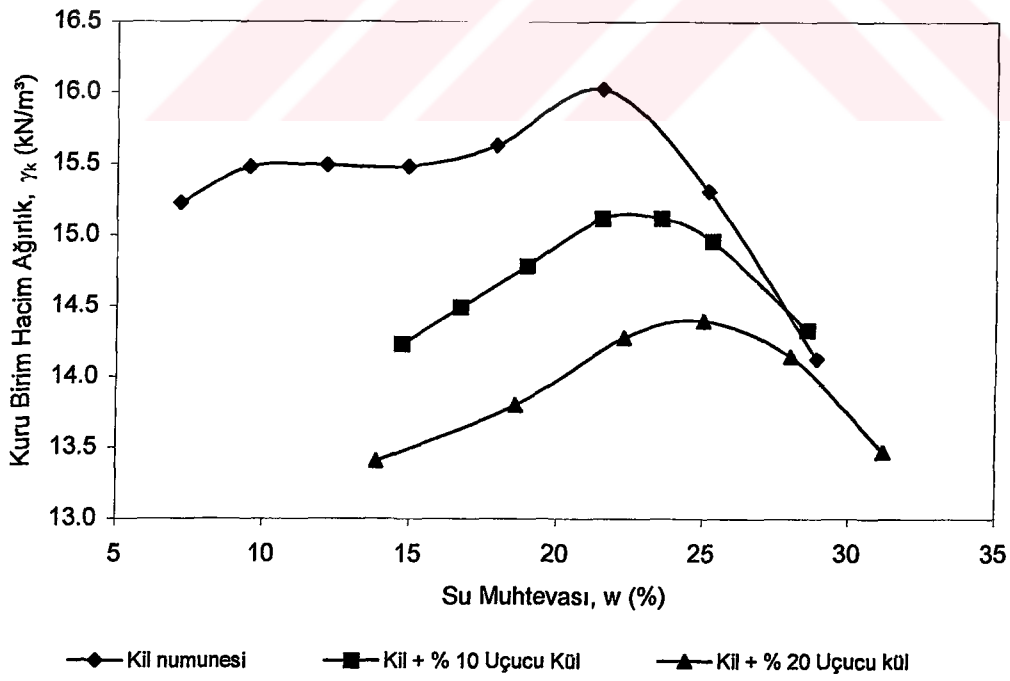
Azalan maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri, diğer araştırmacıların da belirttiği üzere uçucu külün hafif bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.2 de deney numunelerine ait kompaksiyon eğrileri görülmektedir. Şekil 5.2 incelendiğinde artan uçucu kül muhtevası ile kompaksiyon eğrisinde yassılaşıma meydana geldiği de görülmektedir. Bu bilgi ışığında, zemine uçucu kül ilavesi ile zeminin arazide rahat çalışılabilir duruma geldiği söylenebilir.

Tablo 5.1 : Numunelerin kompaksiyon özellikleri

	Optimum su muhtevası w (%)	Maks. kuru birim hacim ağırlık $\gamma_{k,maks}$ (kN/m ³)
Kemberburgaz kili	21	16.05
Kemberburgaz kili + % 10 Seyitömer uçucu külü	23	15.15
Kemberburgaz kili + % 20 Seyitömer uçucu külü	25	14.40



Şekil 5.1 : Numunelerin kompaksiyon karakteristiklerinin değişimi



Şekil 5.2 : Numunelerin kompaksiyon eğrileri

5.2 Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Uçucu külün zeminin mukavemetine etkisini ve özellikle bu etkinin kür süresine bağlı olarak değişimini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışmasında, arazi şartlarını en iyi yansıtan üç eksenli basınç deneyi tercih edilmiştir. Uçucu kül karışım oranı olarak % 10 ve % 20 tercih edilmiştir. Kür süresi olarak ise 1 gün, 7 gün, 33 gün ve 195 gün belirlenmiştir. Diğer birçok araştırmada yer almayan 195 günlük kür süresi ile zemin ve uçucu kül karışımlarının uzun dönem mukavemet değişimleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Kil numunesi, kil + % 10 uçucu kül ve kil+% 20 uçucu kül karışımlarına ait 1 günlük, 7 günlük, 33 günlük ve 195 günlük kür sürelerinde ve 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa çevre basıncı altında gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerine ait grafikler ekler bölümünde sunulmuştur. Üç eksenli basınç deneylerinde kullanılan deney numunelerine ait bilgiler Tablo 5.2 de görülmektedir.

Tablo 5.2 : Üç eksenli basınç deneyi numuneleri

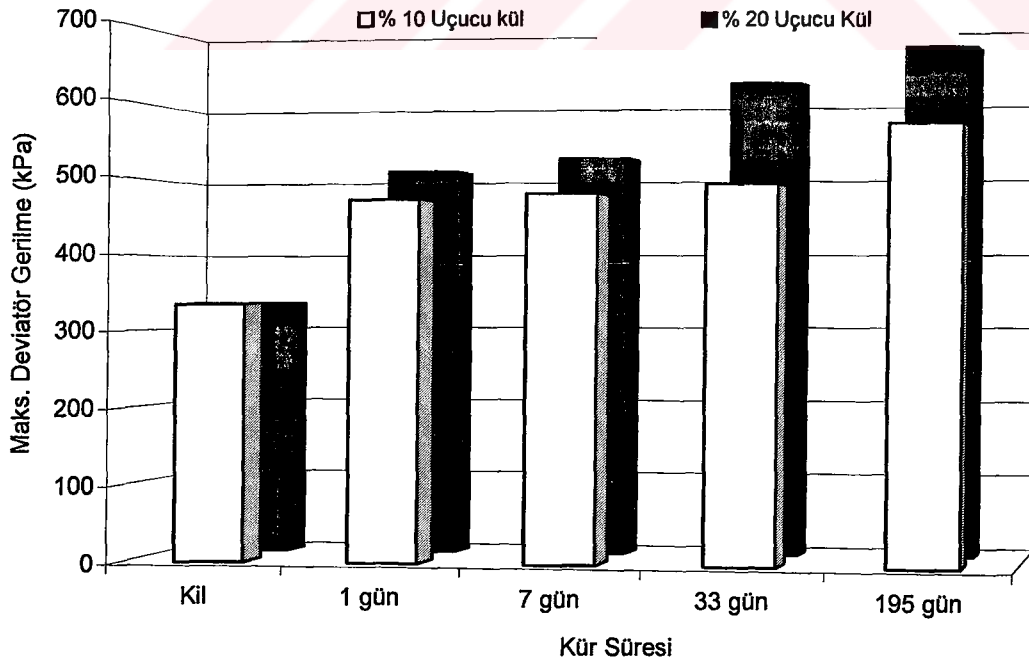
<i>Numune kodu</i>	<i>Uçucu kül oranı</i>	<i>Kür süresi</i>	<i>Deney sonu su muhtevası</i>
0.0	yok	yok	% 22.5
10.1	% 10	1 gün	% 23.2
10.7	% 10	7 gün	% 24.2
10.33	% 10	33 gün	% 23.9
10.195	% 10	195 gün	% 22.9
20.1	% 20	1 gün	% 24.9
20.7	% 20	7 gün	% 25.5
20.33	% 20	33 gün	% 24.7
20.195	% 20	195 gün	% 24.1

Tablo 5.3 : Üç eksenli basınç deneyi sonuçları

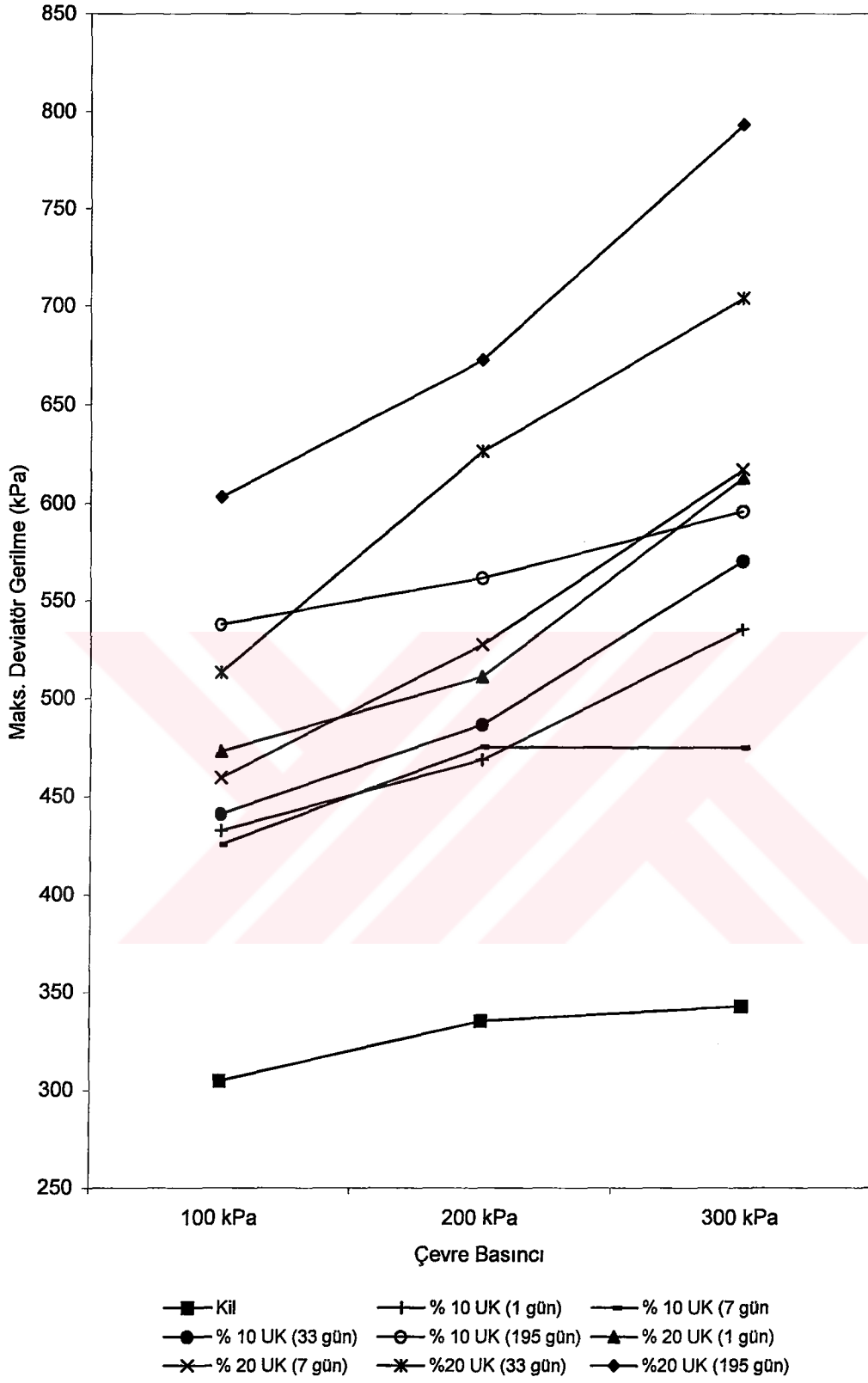
<i>Numune kodu</i>	<i>Çevre basıncı (kPa)</i>	<i>Maks. deviatör gerilme (kPa)</i>	<i>Kırılmanın meydana geldiği deformasyon</i>
0.0	100	304.746	% 7.82
	200	335.131	% 8.23
	300	343.036	% 7.18
10.1	100	432.647	% 8.76
	200	468.596	% 10.32
	300	535.193	% 6.84
10.7	100	425.520	% 9.32
	200	475.191	% 10.64
	300	475.008	% 9.09
10.33	100	441.154	% 8.17
	200	486.445	% 7.01
	300	570.321	% 10.38
10.195	100	537.945	% 5.95
	200	561.676	% 6.65
	300	595.945	% 8.20
20.1	100	472.873	% 8.19
	200	510.874	% 11.93
	300	612.811	% 9.18
20.7	100	459.738	% 6.94
	200	527.286	% 7.22
	300	617.142	% 10.03
20.33	100	513.275	% 6.63
	200	626.409	% 7.25
	300	703.810	% 8.83
20.195	100	603.118	% 6.68
	200	672.650	% 7.29
	300	793.082	% 7.57

Üç eksenli basınç deneyleri (UU)'ne ait sonuçlar Şekil 5.3 yardımıyla daha rahat analiz edilebilir. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde, zemine uçucu kül ilavesi ile zeminin mukavemetinde belirgin artışlar elde edildiği belirlenmiştir. Bu artış, karışımın artan uçucu kül oranı ile artışını devam ettirmektedir. Öyle ki, örneğin 200 kPa hücre basıncında ve 7 günlük kür süresinde gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyleri neticesine göre, % 10 uçucu kül ihtiva eden numune maksimum deviatör gerilmeye % 42'lik bir artış kazanırken, % 20 oranında uçucu kül ihtiva eden numunede kaydedilen artış ancak % 57 olmaktadır. Bu durum karışımda belli bir uçucu kül oranından itibaren artık mukavemette bir artış kaydedilmeyeceğinin hatta belki bir azalmanın meydana gelebileceğinin kanıtı olmaktadır.

Uçucu kül ilavesinin, zeminin mukavemetinde meydana getirdiği artışın kür süresine bağlı olarak değişimini daha rahat gösterebilmek amacıyla Şekil 5.4 hazırlanmıştır. Bu grafikte, 200 kPa'lık hücre basıncında gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyleri neticesinde elde edilen maksimum deviatör gerilmeler yer almaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere uçucu kül ilavesi ile zeminin mukavemetinde meydana gelen artış zamana bağlı olarak yükselişini sürdürmektedir. Öyle ki, zeminin mukavemetinde gözlenen artışın büyük bir kısmı (yaklaşık % 75) 33 günlük kür süresi neticesinde ortaya çıkmakla beraber, dayanımda meydana gelen artış zamana bağlı olarak, artış hızı azalmasına rağmen devam etmektedir.



Şekil 5.4 : 200 kPa hücre basıncında elde edilen maksimum deviatör gerilmeler



Şekil 5.3 : Üç eksenli basınç deneylerine ait sonuçlar

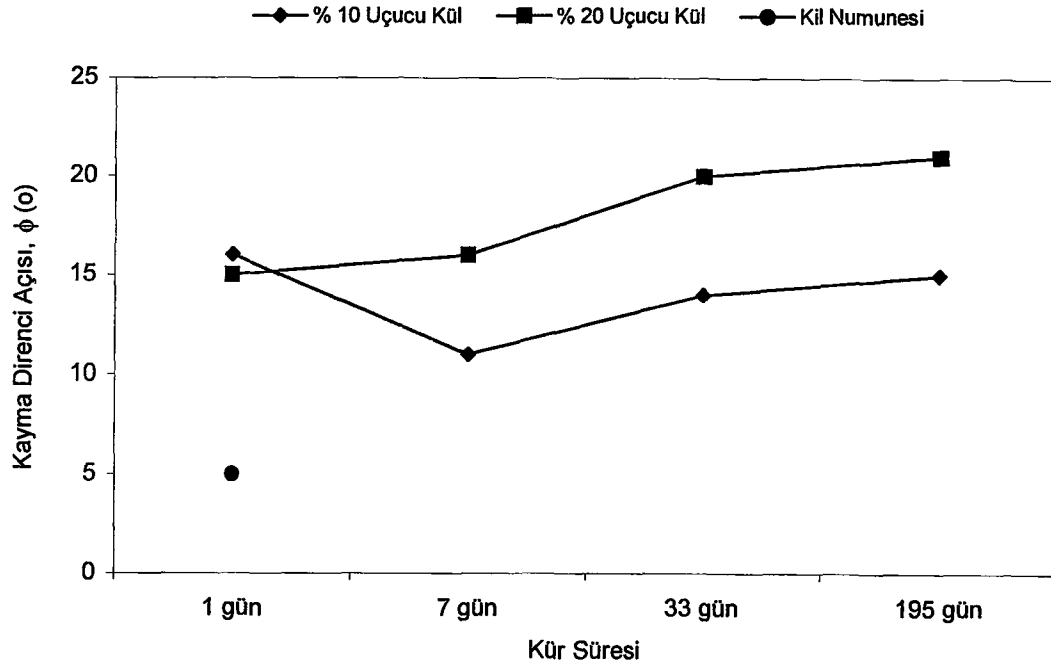
Üç eksenli basınç deneyleri neticesinde elde edilen ve Tablo 5.4 de verilen kohezyon ve kayma direnci açıları incelendiğinde, uçucu kül ilavesinin her iki parametrede de artışa sebep olduğu görülmektedir. Zemine uçucu kül ilavesi ile kohezyon teriminde yaklaşık % 20'lik bir artış meydana gelmiştir. Fakat bu artış, hem uçucu kül oranında meydana gelen artıştan hem de kür süresinden bağımsız gözükmemektedir. Kayma direnci açısından gözlenen artışlar ise daha dikkat çekicidir. Öyle ki, uçucu kül ilavesi ile bir günlük kür süresinde yaklaşık 10°'lik bir sıçrama meydana gelmekte ve kür süresine bağlı olarak artış devam etmektedir. Ayrıca artan uçucu kül oranı da bu artış üzerinde olumlu etki yapmaktadır. (Şekil 5.5)

Diğer araştırmacıların çalışmaları da göz önüne alındığında, kohezyon teriminde gözlenen artışın, uçucu külün çimentolaşma özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kayma direnci açısından meydana gelen artışa ise, uçucu kül daneciklerinin küresel yapısının neden olduğu düşünülmektedir.

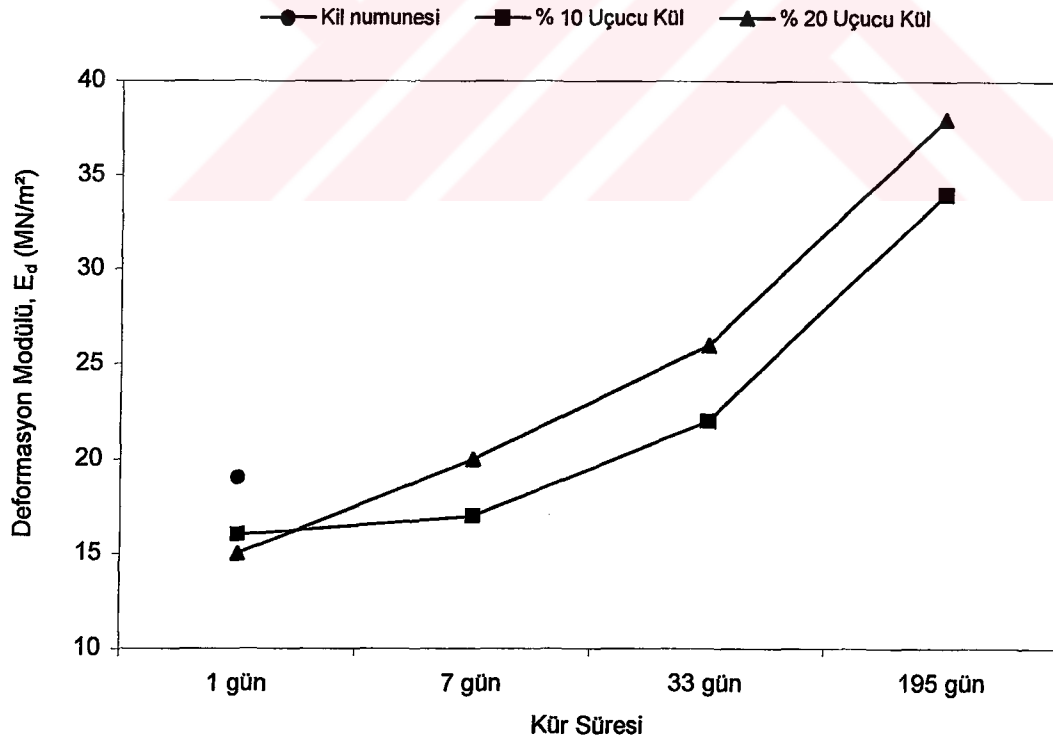
Üç eksenli basınç deneylerine ait sonuçlar yardımıyla hesaplanan deformasyon modüllerinde ise uçucu kül ilavesi ile 1 günlük kür süresi sonunda azalma meydana gelmekte iken artan kür süresi ile karışımlar önce kil numunesinin değerini

Tablo 5.4 : Kohezyon ve kayma direnci açısı parametrelerinin değişimi

<i>Uçucu Kül Oranı</i>	<i>Kür süresi (gün)</i>	<i>Kohezyon (kPa)</i>	<i>Kayma Direnci Açısı (°)</i>	<i>Deformasyon Modülü (MN/m²)</i>
% 0	---	125	5	19
% 10	1	150	16	16
% 10	7	150	11	17
% 10	33	150	14	22
% 10	195	150	15	34
% 20	1	150	15	15
% 20	7	150	16	20
% 20	33	150	20	26
% 20	195	150	21	38



Şekil 5.5 : Kayma direnci açısında gözlenen değişimler



Şekil 5.6 : Deformasyon modüllerinin değişimi

yakalamakta 195 günlük kür süresi neticesinde ise deformasyon modülü değerlerinde yaklaşık %90-100 arasında bir artış meydana gelmektedir. Uçucu kül oranının artışın deformasyon modülünde meydana gelen artışa olumlu etkisi olduğu da görülmektedir. Deformasyon modüllerinin kr süresine ve uçucu kül oranına bağlı olarak değişimi Şekil 5.6 da görülmektedir.

Üç eksenli basınç deneyleri neticesinde elde edilen, kırılmanın meydana geldiği deformasyon değerlerinin değişimi açık bir ilişkiyi onaylar dzenlilikte olmamasına rağmen, özellikle % 20 uçucu kül ihtiva eden numuneler üzerinde geręekleştiren deneylere ait sonuçlara bakarak, artan uçucu kül oranını ve ilerleyen kr süresi neticesinde malzemenin bir miktar kırılğanlaştığını söylemek mümkün görünmektedir.



6. YORUM VE ÖNERİLER

Termik santrallerde pulverize kömürün yakılması sonucu atık olarak büyük miktarlarda uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Oysa silt boyutunda içi boş küresel daneciklerden oluşan uçucu küller fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yardımı ile, inşaat mühendisliğinin birçok uygulamalarında yararlanılabilecek malzemelerdir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında uçucu küllerin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen standart proktor deneyleri neticesinde zemine uçucu kül ilavesi ile optimum su muhtevası değerinin yükseldiği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu değişimler değişen uçucu kül/zemin oranından da etkilenmektedirler. Ayrıca zemine uçucu kül ilavesi ile kompaksiyon eğrisinde yassılaşıma meydana geldiği de gözlemlenmiştir. Bu durum arazide gerçekleştirilen kompaksiyon çalışmalarında çalışılabilecek su muhtevası aralığını genişletmesi sebebiyle, uçucu küle ekonomikliği yanında kolay çalışılabilir malzeme özelliği de kazandırmaktadır.

Zemine uçucu kül ilavesinin mukavemette meydana getirdiği değişimi belirlemek üzere de üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu değişimin zamana bağımlılığını belirlemek üzere deneyler, 1 günlük, 7 günlük, 33 günlük ve 195 günlük, 4 farklı kür süresinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler neticesinde zemine uçucu kül ilavesinin mukavemeti % 100 civarında arttırdığı tespit edilmiştir. Sonuçlar dayanımda meydana gelen artışın zamana bağlı olarak devam ettiğini göstermektedir. Öyle ki, mukavemet 1 günlük kür süresinde dahi % 50 artarken, artışın büyük bir bölümü 33 günlük kür süresinde tamamlanmakta fakat artış, artım hızını azaltarak, zamana bağlı olarak devam etmektedir. % 10 ve % 20 uçucu kül ilavesinin incelendiği bu çalışmada, artan uçucu kül / zemin oranının mukavemette büyük bir değişim meydana getirmediği gözlenmiştir. Bu durum belirli bir uçucu kül/zemin oranından itibaren artık mukavemette bir artış kaydedilmeyeceğinin hatta belki bir azalmanın meydana gelebileceğini işaret edebilir.

Üç eksenli basınç deneyleri neticesinde uçucu kül ilavesi ile drenajsız şartlardaki kohezyonda yaklaşık % 20'lik artış meydana geldiği kaydedilmiştir. Bu artış uçucu kül/zemin oranından ve kür süresinden bağımsız görünmektedir. Kayma direnci açısından ise 1 günlük kür süresi sonunda 10°'lik bir sıçrama meydana gelmiş ve artış

zamana bağılı olarak devam etmiştir. Kohezyonda meydana gelen artış, uçucu külün çimentolaşma özelliği, kayma direnci açısından gözlenen artış ise uçucu kül danelerinin daha çok küresel şekilli olması ile açıklanabilir.

Farklı uçucu kül/zemin oranları ve kür sürelerinin mukavemette meydana getirdiği artışlara paralel olarak deformasyon modüllerinde de artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca kırılmaların meydana geldiği deformasyonların değişimi, çok net olmamakla birlikte, uçucu kül ilavesinin zemini kırılğanlaştırdığı izlenimini de uyandırmaktadır.

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışması neticesinde, uçucu külün zemin stabilizasyonu çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Gelişmekte olan ülkemizde atık olarak nitelendirilen ve büyük depolama masrafları yanında çevre kirliliğine yol açan bu malzemenin, Geoteknik Mühendisliği uygulamalarında kullanımı büyük ekonomik faydalar sağlayacak, ayrıca kamuya ve çevreye verilen zararın azaltılması imkanını doğuracaktır.



KAYNAKLAR

- Akman, M.S.**, 1993. Ağırılık barajlarında uçucu küllü rolkrit kullanımı: Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.
- Chu, S.C. and Kao, H.S.**, 1993. A study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag: *Fly Ash for Soil Improvement*, Geotechnical Special Publication. No:36, pp.89-100, Editor Sharp, K.D., ASCE, New York.
- Erdoğan, T.Y.**, 1993. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu: Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.
- Ferguson, G.**, 1993. Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent: *Fly Ash for Soil Improvement*, Geotechnical Special Publication. No:36, pp.1-15, Editor Sharp, K.D., ASCE, New York.
- Günel, R.G.**, 1996. Uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Keshawarz, M.S. and Dutta, U.**, 1993. Stabilization of South Texas soils with fly ash: *Fly Ash for Soil Improvement*, Geotechnical Special Publication. No:36, pp.30-43, Editor Sharp, K.D., ASCE, New York.
- Khan, L.I. and Sarker, M.**, 1993. Enzyme enhanced stabilization soil and fly ash: *Fly Ash for Soil Improvement*, Geotechnical Special Publication. No: 36, pp.43-58, Editor Sharp, K.D., ASCE, New York.
- Maher, M.H., Butziger, D.L., DiSalvo, D.L. and Owels, I.S.**, 1993. Lime sludge amended fly ash for utilization as an engineering material: *Fly Ash for Soil Improvement*, Geotechnical Special Publication. No:36, pp.73-89, Editor Sharp, K.D., ASCE, New York.

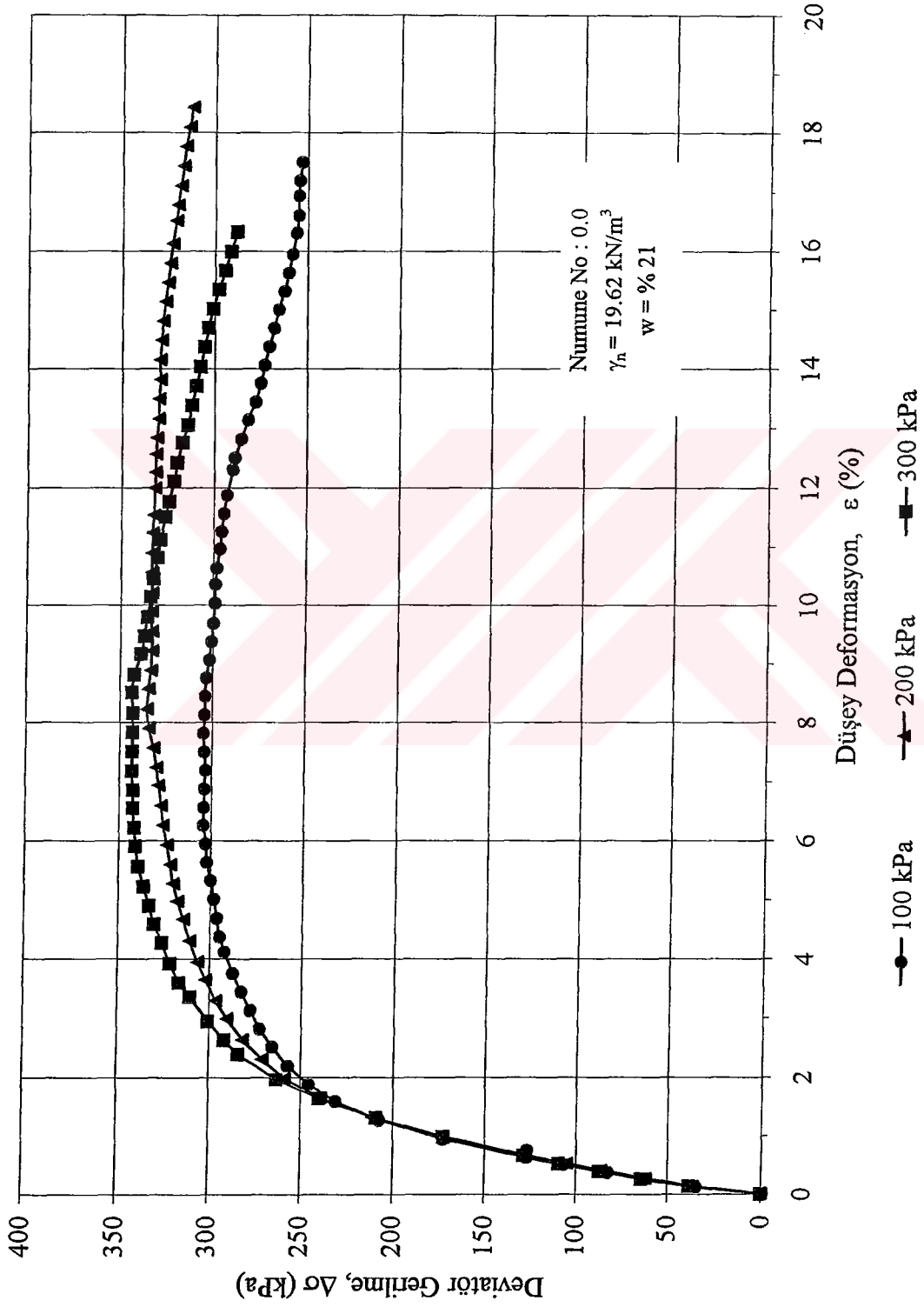
- Nicholson, P.O. and Kashyap, V.,1993.** Fly ash stabilization of tropical Hawaiian soils: *Fly Ash for Soil Improvement*, Geotechnical Special Publication. No:36,pp.15-30, Editor Sharp, K.D., ASCE, New York.
- Özbayoğlu, F.U., 1993.** Uçucu küllerin, bentonit, lireç ve çimento katkılarıyla kumlu zeminlerin stabilizasyonlarında kullanımı. Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.
- Smith, R.L.,1993.** Stabilization of industrial wastes: *Fly Ash for Soil Improvement*, Geotechnical Special Publication. No:36,pp.58-73, Editor Sharp, K.D., ASCE, New York.
- Tan, O. ve İyisan, R., 1996.** Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Tokay, M.,1993.** Betonda uçucu kül kullanımı. Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.
- Wasti,Y., 1993.** Uçucu küllerin geoteknik uygulamalarda kullanımı. Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.

EKLER



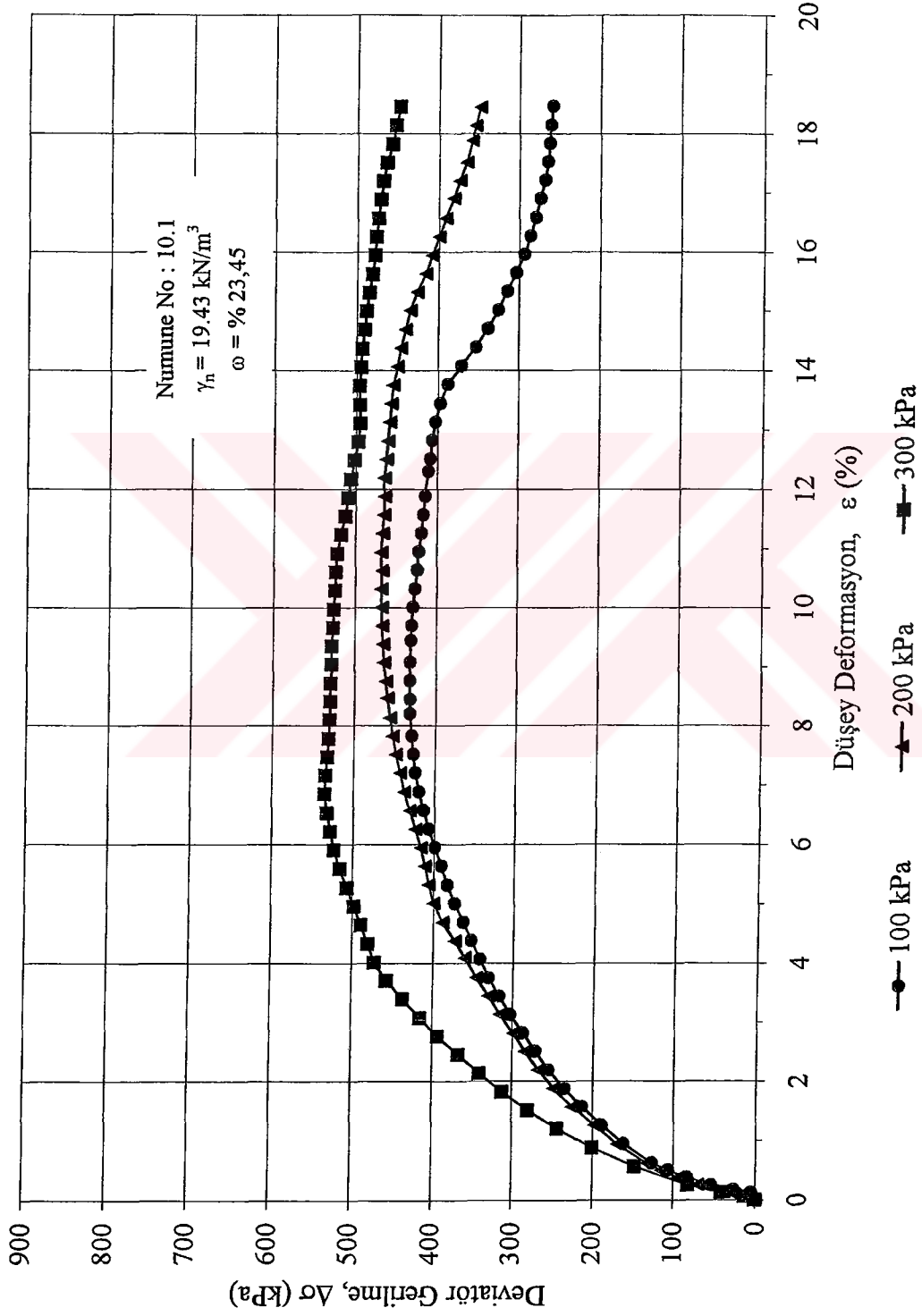
EKA

Şekil A.1 : 0.0 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları



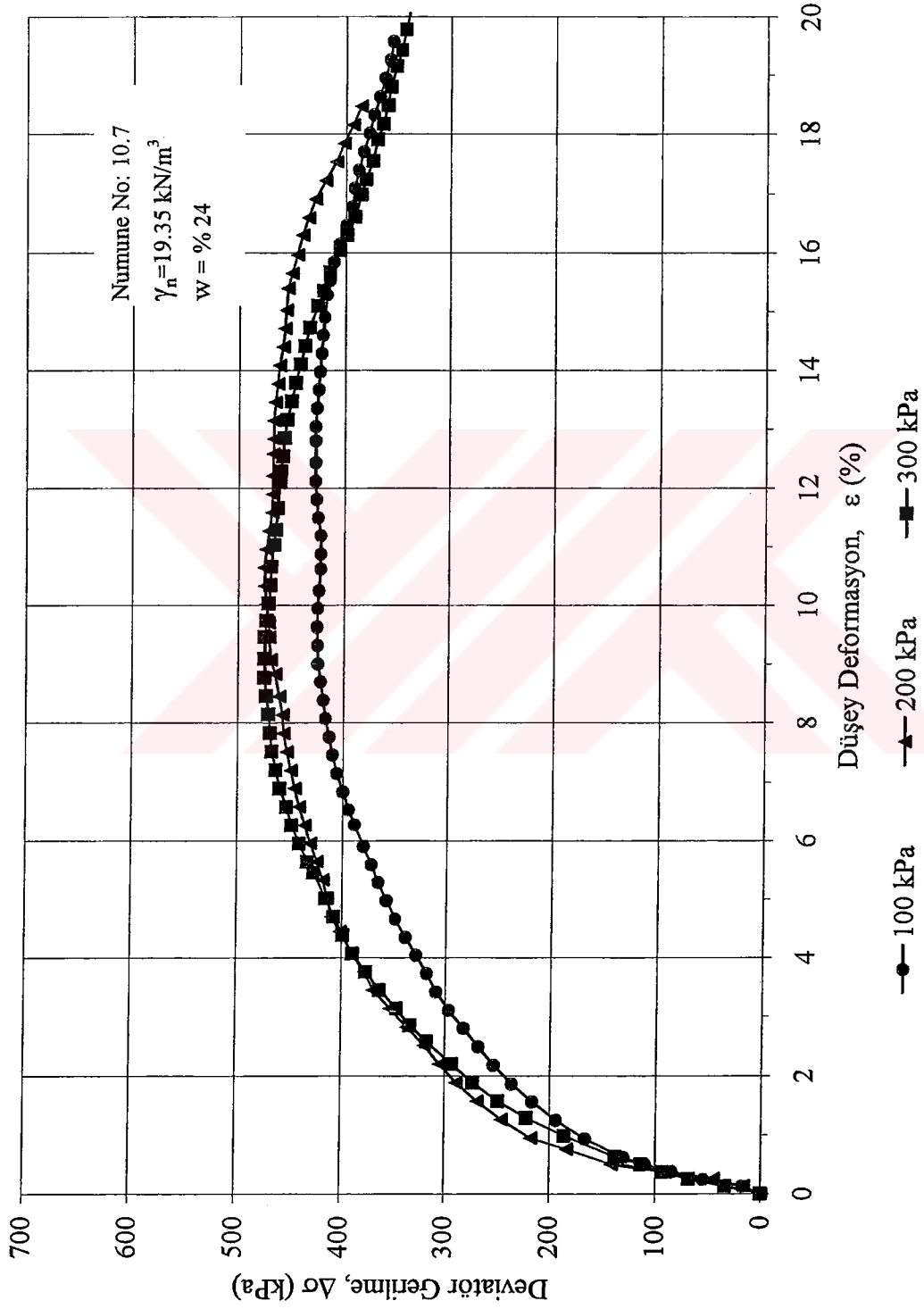
EK B

Şekil B.1 : 10.0 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları



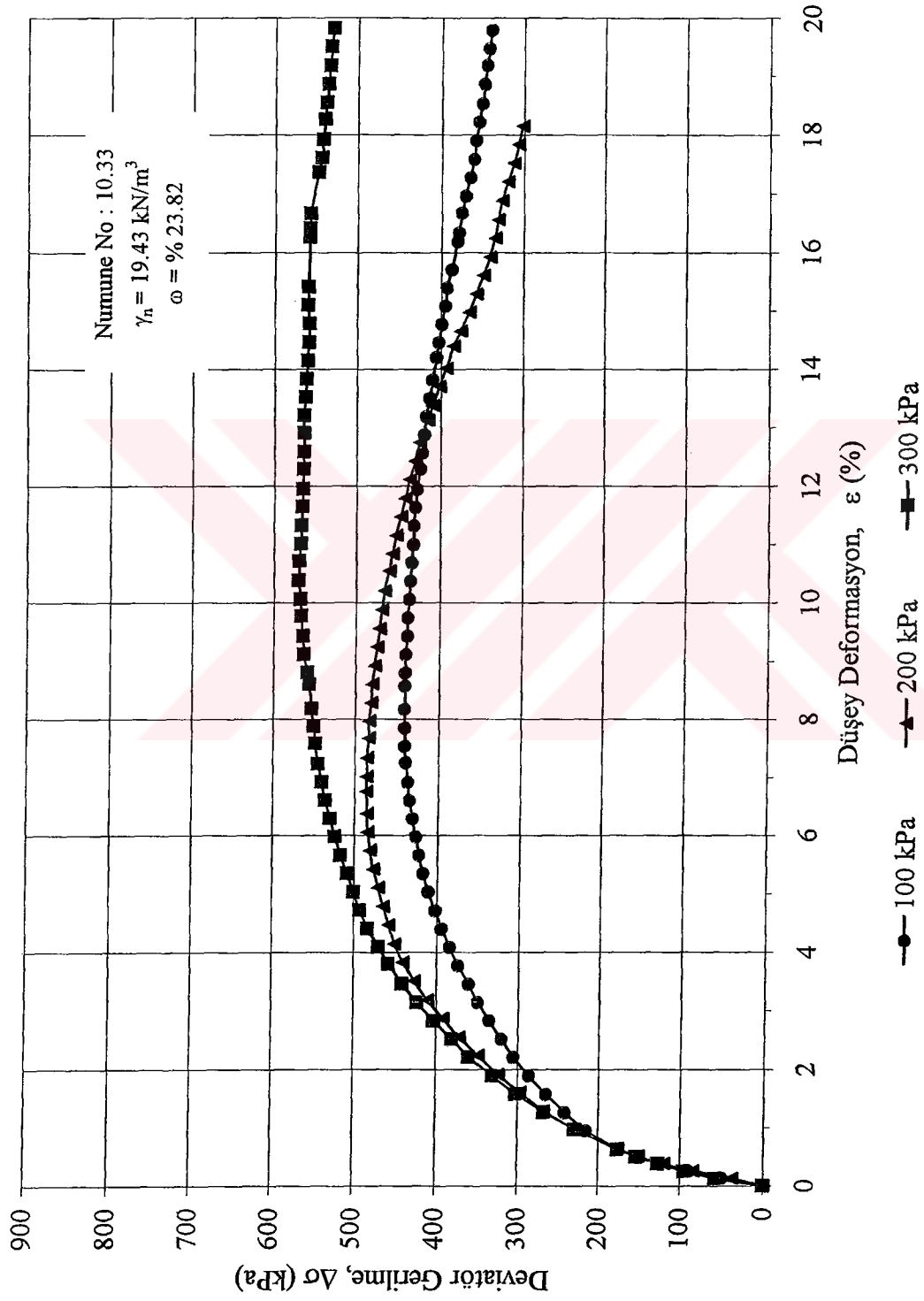
EK C

Şekil C.1 : 10.7 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları



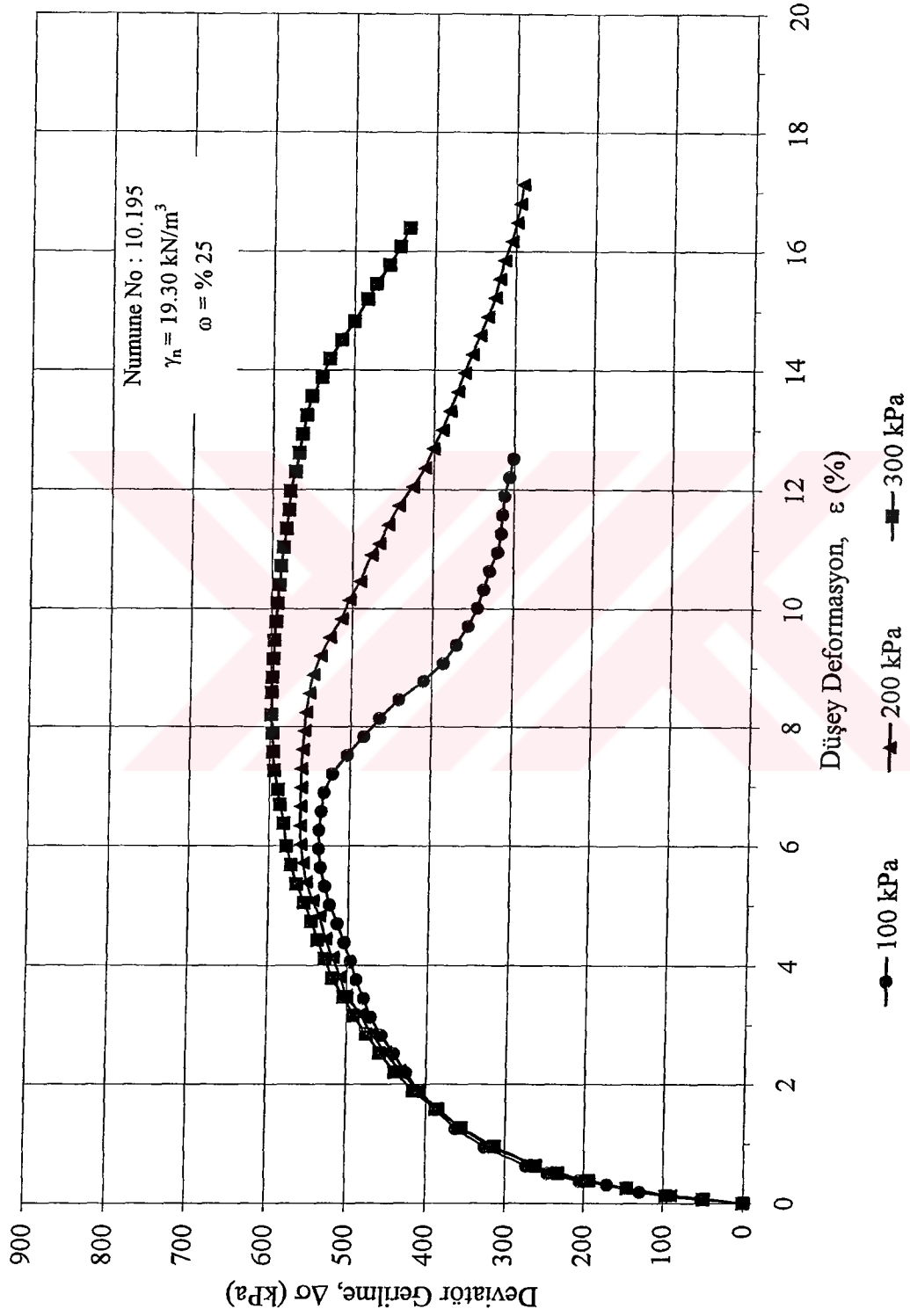
EK D

Şekil D.1 : 10.33 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları



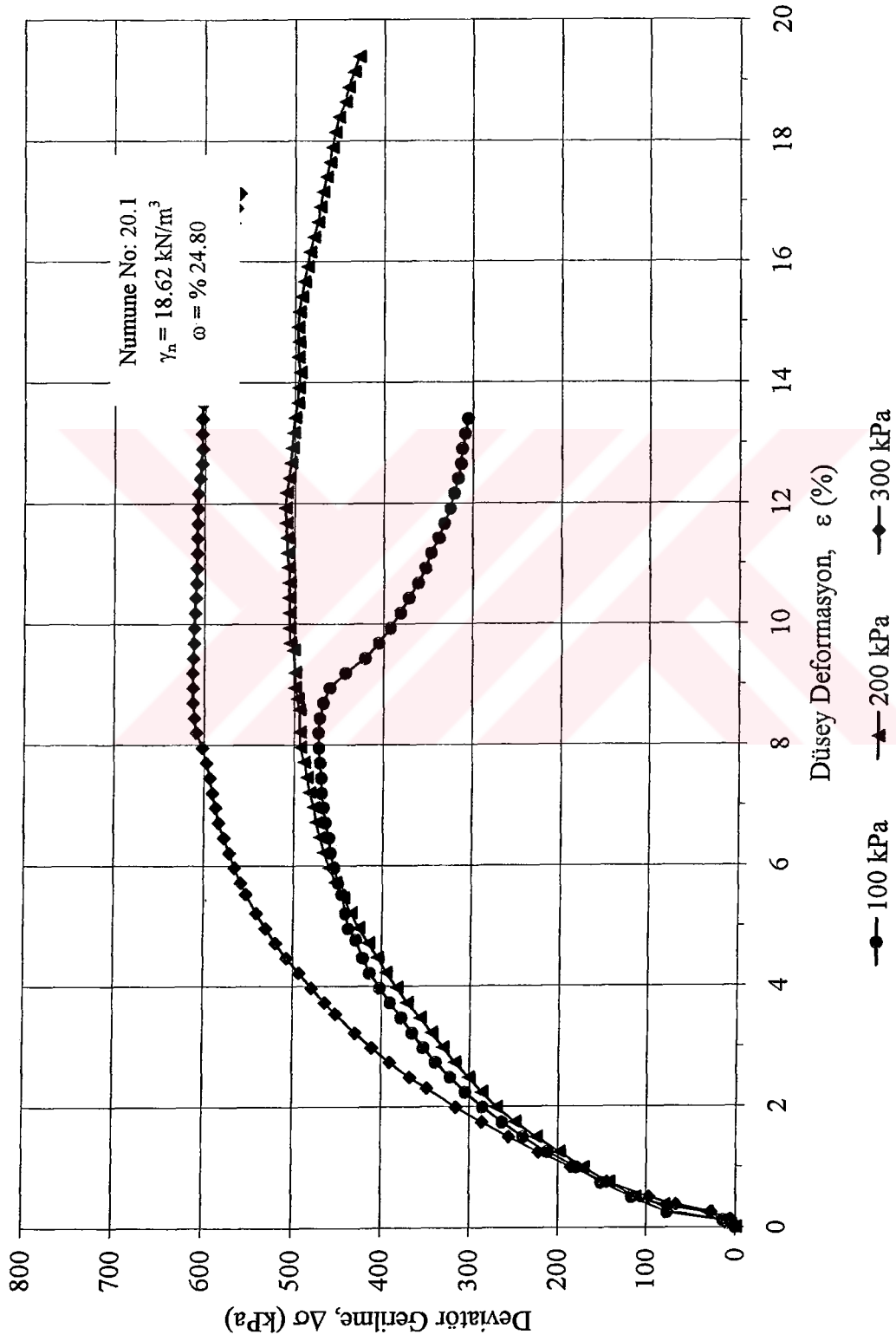
EKE

Şekil E.1 : 10.195 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları



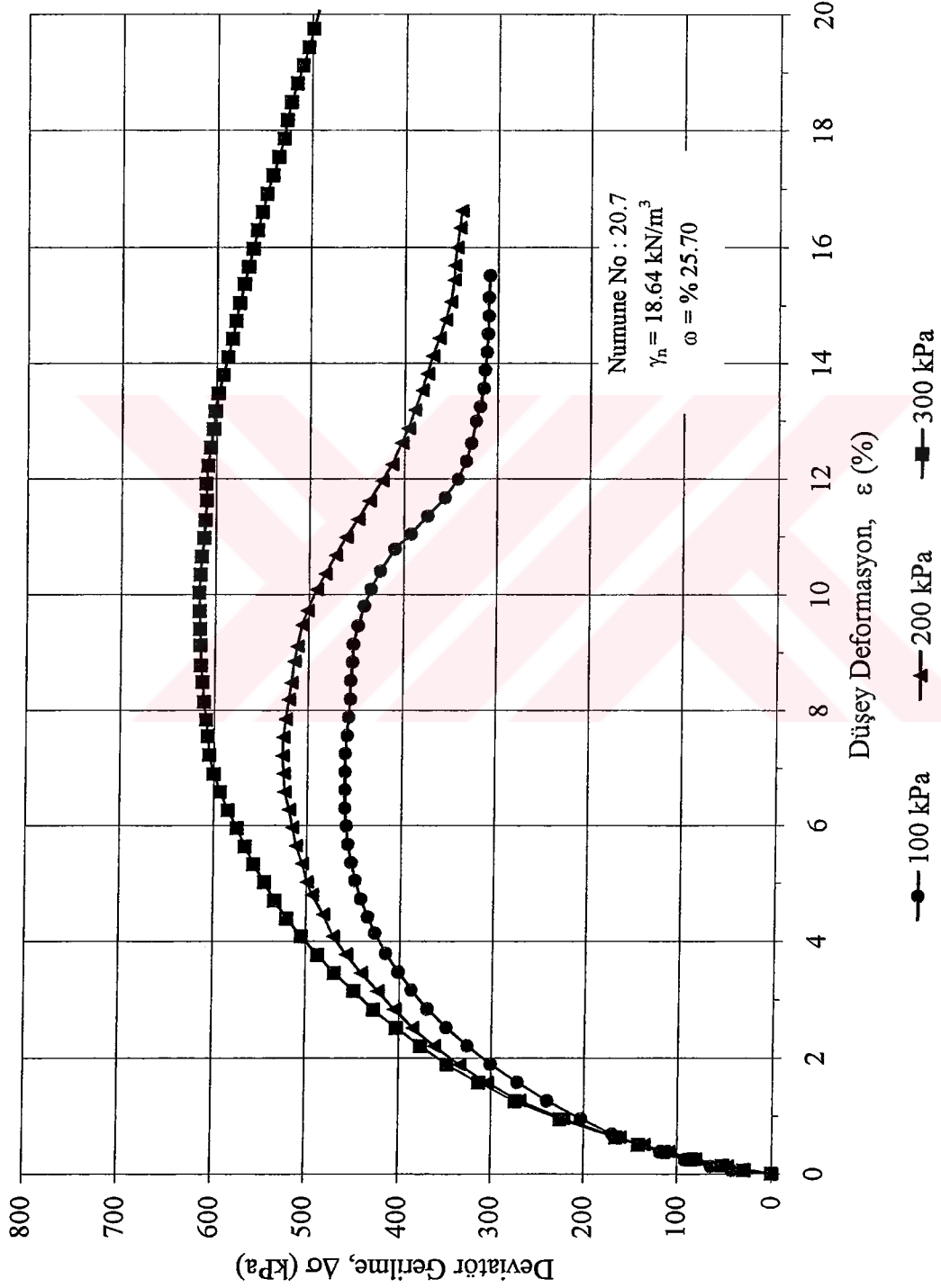
EK F

Şekil F.1 : 20.1 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları



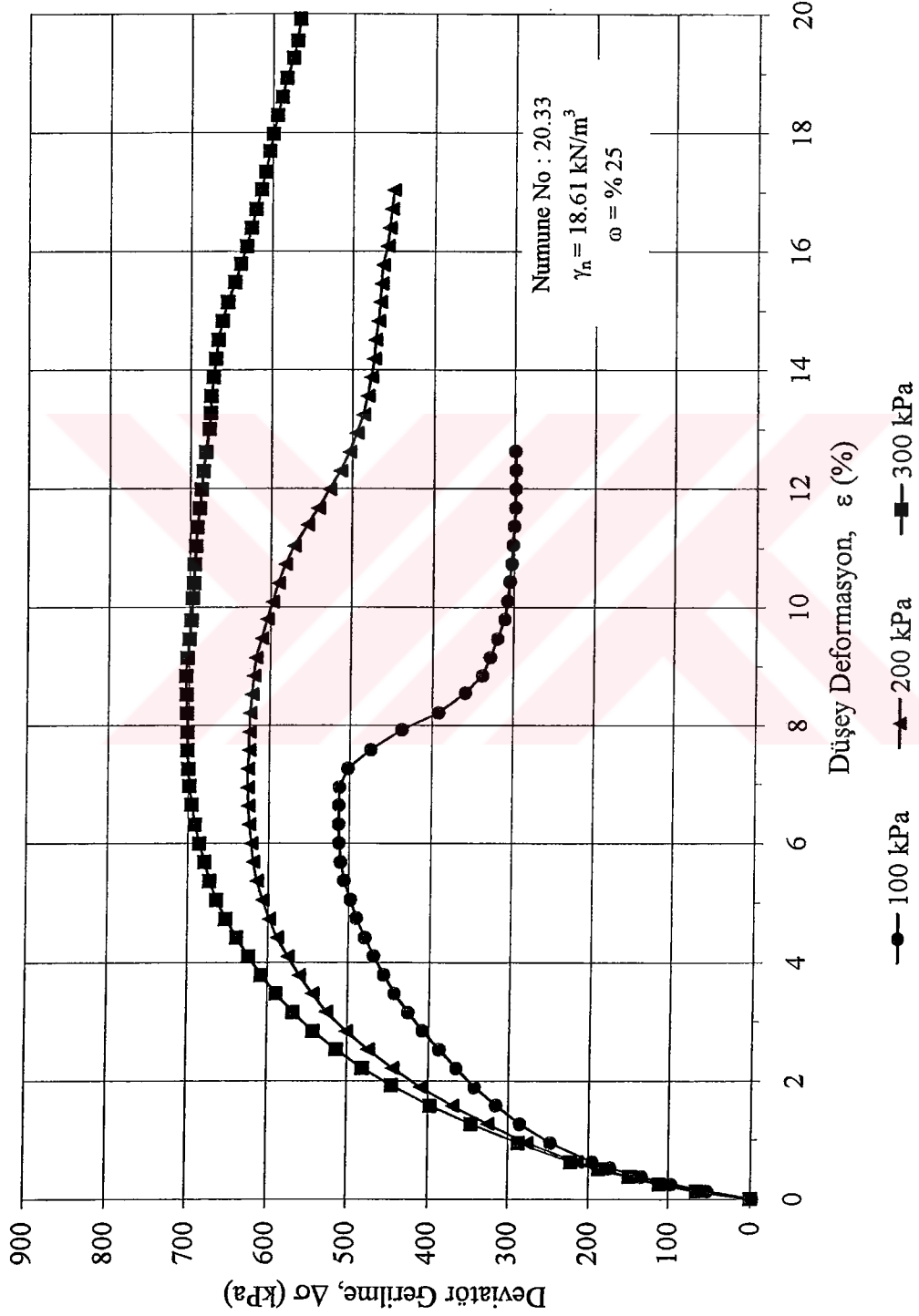
EKG

Şekil G.1 : 20.7 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları



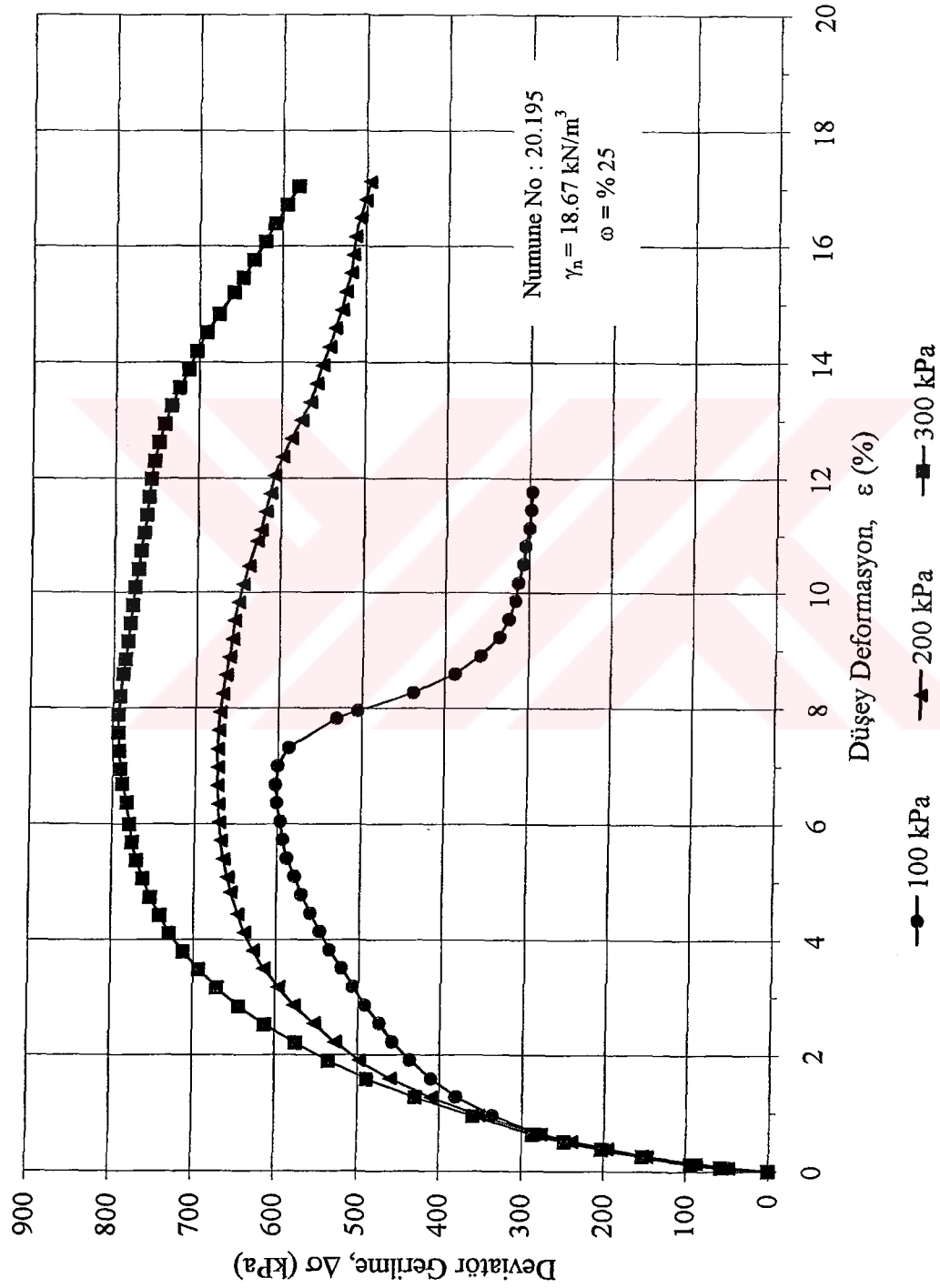
EK H

Şekil H.1 : 20.33 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları



EK I

Şekil I.1 : 20.195 no'lu numuneye ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları



ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 03 Mayıs 1976 tarihinde Samsun'da doğdu. İlköğretimini İstiklal İlkokulu'nda, ortaöğrenimini Samsun Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra, 1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek öğrenimine başladı. 1997 yılında İnşaat mühendisi olarak mezun olan yazar, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Mühendisliği Programına kayıt oldu.

