

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UÇUCU KÜL, MERMER TOZU VE ENDÜSTRİYEL
ATIK KUMU YOL ALT YAPISINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Tuna CÖMERT

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ
Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Mansur SÜMER
Ortak Danışman : Prof.Dr. Seyhan FIRAT

Mayıs 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UÇUCU KÜL, MERMER TOZU VE ENDÜSTRİYEL
ATIK KUMUN YOL ALT YAPISINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Tuna CÖMERT

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ

Bu tez 03/05/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Gülgün YILMAZ
Jüri Başkanı



Doç. Dr. Aydın KAVAK
Üye



Prof. Dr. Zeki GÜNDÜZ
Üye



Yrd. Doç. Dr. Mansur SÜMER
Üye



Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk ÇAPAR
Üye



TEŞEKKÜR

Bu tezin tamamlanması sırasında bana bağışladıkları için Yüce Allah'a hamd ederim.

Bu çalışma ortaya çıkarken birçok kişi ve kuruluş önemli katkıda bulunmuştur. Hepsinin ismini vermek mümkün olmasa da, aşağıdaki bireylerin katkıları işaret edilmelidir.

Danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mansur SÜMER'e değerli tavsiyeleri ve tartışmaları, çalışmamı geliştirmemdeki rehberlik için, şükran borcumu ve minnettarlığımı ifade etmek istiyorum. Bilimsel açıdan beni yüreklendirerek kendime güven kazanmamı sağlayan, yüksek lisans çalışmalarım boyunca danışmanım ve hocam Prof. Dr. Seyhan FIRAT'a çalışmalarımı geliştirmemdeki değerli rehberlik, tavsiye, makale, inceleme ve dersleri için yürekten teşekkür ve en derin şükranlarımı sunmak istiyorum. Kıymetli hocam Prof. Dr. Gülgün YILMAZ'a değerli tavsiye, rehberlik, makale, yorum ve gözetimleri için derinden minnettarım. Prof. Dr. Zeki GÜNDÜZ'e yoğun programına rağmen tecrübe dolu her sözü ile çalışmamı zenginleştiren ve boyut kazandıran katkılarına teşekkür ederim.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Rektörü Sayın Prof. Dr. Azmi ÖZCAN'a bu çalışma sırasında bana verdikleri sınırsız destek için minnettarlığımı sunarım.

Bu tez onların desteği ve bana olan güvenleri olmadan başarılamazdı. Onların öğrencisi olduğum ve aynı zamanda da onların dinamik ekibinin bir üyesi olduğum için çok gururluyum.

Prof. Dr. Selahattin KADİR'e yoğunluğu arasında yorumları ile çalışmaya değer kattığı için, Doç. Dr. Recep İYİSAN, Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ, Yrd. Doç. Dr. İrfan PAMUK ve adını burada saymadığım diğer tüm değerli hocalarıma verdikleri kıymetli dersleri ve her konudaki rehberlikleri için ayrı ayrı teşekkür ederim.

Katkıları ile çalışmayı şekillendiren MTA mineral inceleme laboratuvarı idareci ve çalışanlarına, KGM Yol Üstyapı Şb. Md. Ahmet Gürkan GÜNGÖR'e, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi MYO Müdürü Doç. Dr. Çağlayan AÇIKGÖZ'e, Üniversite ve MYO'nun tüm idareci ve çalışma arkadaşlarıma özellikle İnşaat Teknolojisi Programı teknikeri Hüseyin TEMEL'e teşekkür ederim.

Ayrıca bitirme projelerinde çalışmalarının bir bölümü olarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirerek bana yardımda buldukları için öğrencilerime de teşekkür etmek istiyorum.

Malzeme sağlama ve diğer yardımları için Matel A.Ş., Camış A.Ş. ve Çayırhan Termik Santral İşletmesi Park Termik A.Ş. idareci ve çalışanlarına da şükranlarımı sunarım.

Aile fertlerim de kalben doktora çalışmamda beni desteklediler. Hiç kimseden böyle içten ve sonsuz bir destek alacağımı düşünmezdim. Başta sevgili eşimin çalışmamda bana destek verme şekli örnek olacak şekildeydi. Bu nedenle anneme, babama ve eşim Meral CÖMERT'e, kızım Nazlı Gökçe ve oğlum Can Mete'ye gösterdikleri sabır ve verdikleri destek için teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2009-50-02-007). Bu desteği sağladığı için Sakarya Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xx

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
--------------------	----------

BÖLÜM 2.

KATI ATIKLAR ve ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNDE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
2.1. GİRİŞ.....	7
2.2. Uçucu Kül.....	9
2.3. Mermer Tozu	25
2.4. Endüstriyel Atık Kum.....	32

BÖLÜM 3.

MATERYAL ve METOT.....	36
3.1. Zemin Numuneler.....	36
3.1.1. Zeminlerin özgül ağırlığı (Gs)	37
3.1.2. Zeminlerin dane çapı dağılımı	37
3.1.3. Zeminlerin kıvam limitleri	38
3.1.4. Zeminlerin alındığı bölgelerin jeolojik özellikleri	39
3.1.5. Zeminlerin kimyasal özellikleri (XRF).....	40

3.1.6. Zeminlerin mineral özellikleri (XRD ve SEM)	41
3.1.7. Zeminlerin sıkıştırma (kompaksiyon) özellikleri.....	45
3.1.8. Zeminlerin geçirimsizlik (permeabilite) özellikleri	46
3.1.9. Zeminlerin taşıma gücü (CBR) özellikleri.....	46
3.1.10. Zeminlerin serbest basınç (SB) dayanımları	47
3.1.11. Zeminlerin dinamik (M_R) özellikleri.....	47
3.2. Atık Numuneler	49
3.2.1. Atıkların kimyasal özellikleri (XRF)	50
3.2.2. Atıkların mineral özellikleri (XRD ve SEM).....	53
3.2.3. Atıkların özgül ağırlığı (G_s).....	56
3.2.4. Atıkların dane çapı dağılımı.....	56
3.2.5. Atıkların kıvam limitleri	56
3.3. Metot.....	58
3.3.1. Malzeme hazırlama	59
3.3.2. Karışım oran hesabı.....	60
3.3.3. Karışımların kürlenmesi.....	62
3.3.4. Sıkıştırma (kompaksiyon) deneyi	67
3.3.5. Özgül ağırlık deneyi.....	68
3.3.6. Elek analizi ve hidrometre deneyi.....	70
3.3.7. Kıvam limitleri deneyi	70
3.3.8. Geçirimsizlik (Permeabilite) deneyi.....	71
3.3.9. Serbest basınç (SB) deneyi	73
3.3.10. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi	75
3.3.11. Esneklik modülü (M_R) deneyi.....	76
3.3.12. Kimyasal özelliklerin belirlenmesi (XRF).....	77
3.3.13. Zemin-atık karışımlarının mineral özellikleri (XRD ve SEM) .	77

BÖLÜM 4.

ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ ve KONTROLÜ

4.1. Giriş	80
4.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri	80

4.2.1. Mekanik iyileştirme	82
4.2.2. Kimyasal iyileştirme	85
4.2.3. Enjeksiyon teknikleri	87
4.2.4. Katkı maddeleri ile iyileştirme	89
4.3. Zemin İyileştirme Kontrolü	90
4.3.1. Laboratuvar deney teknikleri	91
4.3.2. Arazi deney teknikleri	92
4.3.3. Jeofizik deney teknikleri	93

BÖLÜM 5.

ESNEKLİK (RESILIENT) MODÜLÜ DENEYİ..... 95

5.1. Giriş	95
5.2. Karayolu Yapısı	96
5.3. Üst Yapıya Gelen Yükler	98
5.4. Dinamik Üç Eksenli Deneyleri	99
5.5. Dinamik Deneylerin Tarihsel Gelişimi	101
5.6. Esneklik Modülü (M_R) Deneyi	104
5.7. Esneklik Modülü Cihazı ve Parçaları	107
5.7.1. Yükleme çerçevesi	107
5.7.2. Hücre	107
5.7.3. Hidrolik güç ünitesi	108
5.7.4. Servo-valf	108
5.7.5. E/P kontrol ünitesi	108
5.7.6. Sinyal şartlandırma ünitesi	108
5.7.7. Bilgisayar	108
5.8. Esneklik Modülü Deneyi Numune Hazırlama	108
5.8.1. Tip-1 ve Tip-2 malzemeler	109
5.8.2. Tip-1 ve Tip-2 numunelerin hazırlanması	109
5.9. Esneklik Modülü Deneyin Yapılışı	111
5.10. Esneklik Modülü Deneyinde Kullanılan Haversine Yükleme Dalgası ve Yükleme Serileri	112

BÖLÜM 6.

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	114
6.1. Giriş	114
6.2. Zemin-Atık Karışımlarının Mineral ve Mikro Yapı Özellikleri (XRD, SEM)	115
6.2.1. XRD analizi.....	115
6.2.2. Taramalı elektron mikroskop (SEM ve EDX) analizi.....	118
6.3. Zemin-Atık Karışımlarının Sıkıştırma (Kompaksiyon) Özellikleri	132
6.4. Zemin-Atık Karışımlarının Dane Çapı Dağılımı.....	135
6.5. Zemin-Atık Karışımlarının Geçirimsizlik (Permeabilite) Özellikleri	138
6.6. Zemin-Atık Karışımlarının Serbest Basınç (SB) Özellikleri.....	143
6.7. Zemin-Atık Karışımlarının Taşıma Gücü (CBR) Özellikleri.....	149
6.8. Zemin-Atık Karışımlarının Esneklik Modülü (M_R)	152

BÖLÜM 7.

SONUÇ ve ÖNERİLER.....	159
KAYNAKLAR.....	167
ÖZGEÇMİŞ.....	182

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER LİSTESİ

G _s	Özgül ağırlık,
I _p	Plastisite indeksi, %,
k	Permeabilite katsayısı, cm/s,
k ₁ , k ₂ , k ₃	Katsayılar,
M _R	Esneklik modülü, MPa,
No.4	4 Numaralı (4.75mm) elek,
No.200	200 Numaralı (75µm) elek,
P _a	Atmosferik basınç, kN,
P _{max}	Toplam yük, kN,
P _t	Temas yükü, kN,
P _c	Tekerrür yükü, kN,
S _w	Özgül yüzey, cm ² /g,
q _u	Serbest basınç dayanımı, kN/m ² , kPa,
w _L	Likit limit, %,
w _n	Deney sonu (nihai) su içeriği, %,
w _{opt}	Optimum su içeriği, %,
w _p	Plastik limit, %,
γ _k	Kuru birim hacim ağırlık, kN/cm ³ ,
γ _d	Dane birim hacim ağırlık, kN/cm ³ ,
γ _{kmax}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık, kN/cm ³ ,
γ _{su}	Suyun birim hacim ağırlığı, kN/cm ³ ,
ρ _k	Kuru yoğunluk, g/cm ³ ,
σ ₁	Düşey gerilme, kPa,
σ ₁ +σ ₂ +σ ₃	Toplam (bulk) gerilme, kPa,
σ ₂ , σ ₃ , S ₃	Yanal gerilme, kPa,
σ _d	Deviatör gerilme, kPa.

KISALTMALAR LİSTESİ

AASHTO	Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği,
AK	Endüstriyel atık kum,
ASCE	Amerika İnşaat Mühendisleri Birliği,
ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Enstitüsü,
CAH	Kalsiyum-Alüminyum-Hidrat,
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı, %,
CH	Yüksek plastisiteli inorganik kil,
CI	Orta plastisiteli kil,

CL	Düşük plastisiteli inorganik kil,
CSH	Kalsiyum-Silikat-Hidrat,
Ç	Çimento,
D _{BSK}	Bitümlü sıcak karışım tabakalarının toplam kalınlığı, cm,
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işınları Spektroskopisi,
ESEM	Atmosfer basıncı kontrollü taramalı elektron mikroskobu,
FHWA	Amerikan Federel Karayolları İdaresi,
KDK	Katyon değişim katsayısı,
KK	Kızdırma kaybı,
Ku	Kuvars,
km	Kilometre,
K zemin	Pamukova kırmızı zemini,
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü,
KTŞ	Karayolu Teknik Şartnamesi,
LTPP P-46	Uzun süreli karayolu performans protokolü 46,
M	Atık mermer tozu,
MH	Yüksek plastisiteli inorganik silt,
MKBA	Maksimum kuru birim hacim ağırlığı,
ML	Düşük plastisiteli inorganik silt, kum,
MTA	Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü,
OSİ	Optimum su içeriği,
SB	Serbest basınç deneyi,
SEM	Taramalı elektron mikroskobu,
SHRP	Amerikan Stratejik Karayolu Araştırma Programı,
Sm	Simektit,
sa	Saat,
sn	Saniye,
T zemin	Bozüyük zemini,
TSE	Türk Standartları Enstitüsü,
TOT	Taş ocağı tozu,
UK	Uçucu kül,
XRD	X-ışınları difraktometresi,
XRF	X-ışınları Floresanı.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Yol tip enkesidi (Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006).....	8
Şekil 2.2.	Termik santralde baca gazının izlediği yol.....	14
Şekil 2.3.	a) Küresel ve yarı-küresel uçucu kül (x2500) (Alyamaç ve İnce, 2010), b) Küresel, yarı-köşeli ve köşeli Çayırhan uçucu külü (x2000) (bu çalışma).....	16
Şekil 2.4.	Hematit, feldispat kaplı küresel Çayırhan uçucu külü (x5000) (bu çalışma)	17
Şekil 2.5.	1-40 µm arasında değişen küresel, içi mikro küreler ile dolu plerosfer Çayırhan uçucu kül danecikleri (x10000) (bu çalışma).....	18
Şekil 2.6.	Önemli mermer ve doğaltaş yataklarının bölgelere göre dağılımı (Ersoy, 2010).....	26
Şekil 2.7.	1-5 µm arasında değişen mermer tozu danecikleri (x10000) (Alyamaç ve İnce, 2010)	27
Şekil 2.8.	1-300 µm dane çaplı a) Yuvarlak ve kısmen köşeli b) Keskin köşeli mermer tozu danecikleri (x1000) (Güneyisi vd., 2009)...	28
Şekil 2.9.	Mermer tozu tipik XRD difraktogramı (Güneyisi vd., 2009).....	29
Şekil 3.1.	Zeminlerin granülometri eğrileri	38
Şekil 3.2.	Zeminlerin TS 1500/2000 plastisite kartındaki yeri (Likit limit deneyi koni düşürme cihazı ile yapılmıştır)	38
Şekil 3.3.	Zeminlerin X-ışınları difraktogramları, a) T zemini, b) K zemini (D: dolomit, F: feldispat, İ: illit, K: kaolin, Ka: kalsit, Ku: kuvars, Sm: simektit).....	41

Şekil 3.4.	Montmorillonit/çoklukasyon karışımının tipik davranışının şematik görünümü (Lvov vd., 1996)	42
Şekil 3.5.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) montmorillonit mikro resimleri, a) Toz montmorillonit (x50000), b) Islandıktan sonra birkaç gün havada kurutulmuş montmorillonit eğri yaprakçıkları (x25000) (Lvov vd., 1996).	43
Şekil 3.6.	Farklı büyütmelerde (x) a) T zemini (x500) ve b) K zemini (x250) c) T zemini (x6000) ve b) K zemini (x3000) SEM görüntüleri (K: kaolin, Sm: simektit)	44
Şekil 3.7.	Zeminlerin sıkıştırma eğrileri	45
Şekil 3.8.	Atık malzemelerin XRD difraktogramları (UK: uçucu kül, M: mermer tozu, AK: endüstriyel atık kum, A: anhidrit, D: dolomit, F: feldispat, H: hematit, İ:illit, K: kaolin, Ka: kalsit, Ku: kuvars, Op: opal-CT).....	53
Şekil 3.9.	Çayırhan uçucu külü SEM mikro resimleri a) Uçucu kül genel görünümü içinde karbonat kümesi (beyaz ok), b) Küreler şeklinde uçucu kül plerosfer ve senosferler (UK), hematit kaplı uçucu kül (UK-H) (beyaz ok) ve Karbonat-UK kümeleri (siyah oklar).....	54
Şekil 3.10.	Çayırhan uçucu külü SEM mikro resimleri Küreler şeklinde uçucu kül (UK), hematit kaplı (UK-H) ve alkali feldispat kaplı (UK-F) uçucu kül (beyaz ok) a) x5000, b) x100000 büyütme ...	54
Şekil 3.11.	Mermer tozu ve endüstriyel atık kum SEM mikro resimleri a) Mermer tozu genel görünümü, c) Endüstriyel atık kum genel görünümü b) ve d) Genel görünümelerde işaretli alanların detay görüntüleri	55
Şekil 3.12.	Atıkların dane çapı dağılım eğrileri (UK: Uçucu kül, M: Mermer tozu, AK: Atık kum).....	57

Şekil 3.13.	Atıkların TS 1500 plastisite kartındaki yeri (UK: Uçucu kül, M: Mermer tozu, AK: Atık kum)	58
Şekil 3.14.	Malzemelerin etüvde kurutulması	60
Şekil 3.15.	a) Tanımlama deneyleri sırasında serbest basınç numuneleri desikatörde bekletilmesi b) Üstte serbest basınç numuneleri, altta CBR numunelerin dolap içinde kürlenmesi.....	66
Şekil 3.16.	Otomatik sıkıştırıcının genel ve yakından görünüşleri	68
Şekil 3.17.	İki boyutlu blok diyagram (Yücel vd., 2004; Uzuner, 2007)	69
Şekil 3.18.	Cam piknometreler ve numunelerin piknometre ile özgül ağırlıklarının tespit aşamaları	69
Şekil 3.19.	a) Sıcaklık kontrollü hidrometre havuz düzeneği, b) Mezürlerin içinde hidrometreler ve c) Hidrometre (menüsküs) okuması	70
Şekil 3.20.	Düşen koni aleti ile likit limitin bulunması, a) Malzemenin su ile karıştırılıp deney kabına konulması, b) Batma miktarının ölçümü, c) Üç batma sonrası numune görünümü	71
Şekil 3.21.	a) Permeabilite düzeneği, b) Numunenin doygun hale getirilmesi, c) Deney sonunda T zeminin belirgin şişme görünüşü	72
Şekil 3.22.	Serbest basınç numunelerinin standart Proktor kalıbından çıkartılması, a) Numune çıkarıcı (kriko), b) Üç numune silindirinin karışıma saplanması, c) Numune silindirlerinin kalıptan ayrılması, d) Numune çıkarıcı ile numune silindirinden numune çıkartma, e) Pistonla itilen numunenin ölçüsünde kesilmesi.....	73
Şekil 3.23	Serbest basınç numunelerinin kesilmesi a) Yenilmiş numune, b) Tam kesilmiş yenilmiş numune, c) Kesilme düzlemi	74
Şekil 3.24	a) CBR deney aleti, b) Numunelerin suda bekletildiği su havuzu ve içindeki numune şişme miktarı ölçülürken, havuzda	

	bekleme süresi bitmiş deneye alınacak bir numune suyu süzülürken görülmektedir	75
Şekil 4.1.	İyileştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği (Önalp, 1983; Tunç, 2002; Mitchell ve Soga, 2005)	82
Şekil 4.2.	a) Arazi CBR deneyi ve deney aleti, b) Nükleer yoğunluk ölçme cihazı	92
Şekil 5.1.	Romalılarda yol yapımı (Chio, 2005).....	97
Şekil 5.2.	Tipik esnek kaplamalı karayolu tabakaları (Brunton, 1983; Chio, 2005; Sağlık ve Güngör, 2008).....	97
Şekil 5.3.	Esnek üstyapıya etkiyen yükün dağılımı (Karaşahin vd., 2007)	98
Şekil 5.4.	Tekerlek yükü nedeniyle yol üstyapısında oluşan gerilme durumu (Brown, 1996; Lekarp vd., 2000; Karaşahin vd., 2007; Brito, 2011).....	99
Şekil 5.5.	Üç eksenli numunesine etkiyen yükler(Karaşahin vd., 2007).	100
Şekil 5.6.	Esneklik modülü genel formülü (Lekarp vd., 2000; Durham vd., 2003; Özay ve Güngör, 2008; Brito, 2011; Wang, 2011) ..	101
Şekil 5.7.	Dinamik üç eksenli deneyindeki (Haver-sine) yükleme formu (Durham vd., 2003; Witczak, 2004; Karaşahin vd., 2007; Özay ve Güngör, 2008).....	102
Şekil 5.8.	Üstyapı Taban Malzemelerinin Mevsimsel Esneklik Modülü Değişimi (Özay ve Güngör, 2008)	105
Şekil 5.9.	Düşey gerilme (σ_1) ve yükün tekrar sayılanına karşılık birim şekil değiştirme (ϵ_r) eğrisi üzerinde kalıcı ve esnek şekil değiştirmeler (Brito, 2011).	106
Şekil 5.10.	Tekrarlı yükler altındaki plastik ve elastik şekil değiştirmeler (Sağlık ve Güngör 2008).	106
Şekil 5.11.	Esneklik modülü cihaz parçaları (Durham vd., 2003).....	107

Şekil 5.12.	Tip-1 (Sol) ve Tip-2 (Sağ) numune kalıpları (Sağlık ve Güngör 2008).....	109
Şekil 5.13.	İnce daneli zeminlerde (Tip-2) numune hazırlama basamakları (Sağlık ve Güngör 2008)	110
Şekil 6.1.	a), b), c) T-Atık, d), e), f) K-Atık serilerin farklı kür süresinde XRD difraktogramları. UK: uçucu kül, M: mermer tozu, AK: atık kum, Sm: simektit, İ: illit K: kaolinit, Ku: kuvars, F: feldispat, Ka: kalsit, D: dolomit, Op: opal-CT	116
Şekil 6.2.	Katkı ve kür ile iyileştirme / katılaştırma (Stabilization / Solidification) uygulanmış zeminlerin mikroskop incelemesindeki ana değişiklikler (alterasyonlar) ve bunları temsil eden özelliklerin şematik gösterimleri. 1a, hidrate olmamış çimento granülleri; 1b, hidrate olmuş çimento granülleri “kalıntıları”; 2a, reaksiyona girmemiş uçucu kül; 2b, kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül senosfer 3, boşluklar; 4, mikro çatlaklar; 5a, kalsit; 5b, aragonit; 6a, etrenjit; 6b, alçı; 7a, mika granülü; 7b, kaolinleşmiş mika; 7c, alterasyona uğramış etrenjit içeren mika granülü; 8, organik parçalar içeren zemin veya çimento matrisi (Antemir vd., 2010).....	119
Şekil 6.3.	Karışımların 112 gün kür sonrası 1000-3000 büyütme mikroyapıları a), d) uçucu kül (UK), b), e) mermer tozu (M), c), f) atık kum (AK) atık serileri (oklar atık danelerini göstermektedir).....	119
Şekil 6.4.	T-15UKkarışımının 10000 büyütme mikroyapısı	121
Şekil 6.5.	T-15UKkarışımının EDX analizi	121
Şekil 6.6.	K-15UKkarışımının 6000 büyütme mikroyapısı.....	122
Şekil 6.7.	K-15UK karışımının EDX analizi	122

Şekil 6.8.	Kireç zemin etkileşimi (puzolanik reaksiyon vb.) ile oluşan mikro yapının şematik gösterimi (Peethamparan, 2006).....	123
Şekil 6.9.	T-15Mkarışımının 1500 büyütme mikroskobu yapılarında karbonatlaşma (oklar).....	124
Şekil 6.10.	T-15Mkarışımının EDX analizi.....	124
Şekil 6.11.	K-15M 3000 büyütme mikroskobu yapılarında karbonatlaşma (oklar)	125
Şekil 6.12.	T-15AK karışımının 6000 büyütme mikroskobu yapısı.....	125
Şekil 6.13.	T-15AK karışımının EDX analizi	126
Şekil 6.14.	K-15AK karışımının 6000 büyütme mikroskobu yapısı.....	126
Şekil 6.15.	T-15AK karışımının EDX analizi	126
Şekil 6.16.	a) T-UK b) K-UK karışımların hidrasyon belirtilerinin detay görünüşleri, büyük oklar geriye kalmış uçucu kül senosfer şeklinde boşluk, küçük oklar incelmış ve delinmiş senosferleri göstermektedir	127
Şekil 6.17.	Karışımların 112 gün kür süresi sonunda SEM mikro resimleri a), d) UK, b), e) M, c), f) AK atık serileri, Sm: simektit, UK: uçucu kül, K: kaolin, Ku: kuvars, Ka: kalsit, D: dolomit, Siyah oklar: karbonat kümeleri.....	129
Şekil 6.18.	Kil minerallerinde çift katmanın gösterimi (Başer, 2009).....	130
Şekil 6.19.	Kil plaklarının kümelemesinin şematik gösterimi a) kart-evi , b) kart-paketi (Kloprogge, 1998).....	131
Şekil 6.20.	Karışımların SEM mikro resimleri a) T-AK kaolin dizilimleri (yüzey-uç), b) K-AK kaolin dizilimleri (yüzey-yüzey) genel görünüm.....	131
Şekil 6.21.	Zeminlerin atık miktarına karşı, a), b) Optimum su içerikleri (%), c), d) Maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmax}) (kN/m^3).....	134

Şekil 6.22.	28 gün kürlü, zemin-atık dane çapı dağılımları, % 15 ve % 20 a), b) UK, c), d) M, e), f) AK karışımları	136
Şekil 6.23.	Atık miktarına görea) T-atık, b) K-atık karışımlarının permeabilite katsayıları (k).....	139
Şekil 6.24.	Bazı sıvıların (özellikle tuzlu sular) zemin geoteknik özellikleri üzerine etkileri, uygulama şartları (sıkıştırma, konsolidasyon vb.) ile oluşan danelerin dizilimine bağlı olan kil çift katman kalınlığının değişimi ile açıklanabilir. Dielektrik (yalıtkan) katsayısını azaltan monovalent (katyon) konsantrasyonunun artışı (> CEMC) olan tuz çözeltisi artışı ile geçirgenlik artmaktadır (Schmitz, 2006).....	141
Şekil 6.25.	Karışımların UK miktarına ve kür süresine karşı a), b) Serbest basınç dayanımı (q_u) (kN/m^2), c), d) Kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) (kN/m^3), e), f) Deney sonu su içeriği (w_n) (%).....	144
Şekil 6.26.	Karışımların M miktarına ve kür süresine karşı a), b) Serbest basınç dayanımı (q_u) (kN/m^2), c), d) Kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) (kN/m^3), e), f) Deney sonu su içeriği (w_n) (%).....	146
Şekil 6.27.	Karışımların AK miktarına ve kür süresine karşı a), b) Serbest basınç dayanımı (q_u) (kN/m^2), c), d) Kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) (kN/m^3), e), f) Deney sonu su içeriği (w_n) (%).....	147
Şekil 6.28.	Kürsüz ve 28 Gün Kürlü Yaş CBR'lar, a), b) T Zemin-Atık, c), d) K Zemin-Atık Serileri	150
Şekil 6.29.	Farklı KürUygulamalarında CBR Şişme Yüzdeleri, a), b) T Zemin-Atık, c), d) K Zemin-Atık Serileri	152
Şekil 6.30.	T ve K zeminlerin M_R a) Düşey gerilme 42 kPa b) Düşey gerilme 28 kPa eğrileri	155
Şekil 6.31.	T zemin-atık karışımı M_R a) Düşey gerilme 42 kPa b) Düşey gerilme 28 kPa eğrileri	156

Şekil 6.32. K zemin-atık karışımı M_R a) Düşey gerilme 42 kPa b) Düşey gerilme 28 kPa eğrileri 157

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Linyite dayalı termik santraller	13
Tablo 3.1.	Zemin numune alındığı tarih, yer, malzeme rengi ve kodu.....	37
Tablo 3.2.	Zeminlerin fiziksel özellikleri	39
Tablo 3.3.	Zeminlerin kimyasal bileşimi (XRF).....	40
Tablo 3.4.	Zeminlerin kompaksiyon ve geçirimsizlik özellikleri	45
Tablo 3.5.	Zeminlerin mekanik özellikleri	46
Tablo 3.6.	Zeminlerin dinamik deneyle geliştirilen (M_R) formülleri ve modeller	48
Tablo 3.7.	Zeminlerin dinamik özellikleri (M_R)	49
Tablo 3.8.	Atık numunelerin alındığı yer, renk ve atıklara verilen kodlar ..	50
Tablo 3.9.	Atıkların kimyasal bileşimi (XRF)	51
Tablo 3.10.	Uçucu külleri sınıflandırma sistemleri	51
Tablo 3.11.	Atıkların fiziksel özellikleri.....	57
Tablo 3.12.	Sıkıştırma deneyi için kullanılması gereken kalıp ve eleklerin seçim kuralları (TS 1900-1/2006).....	59
Tablo 3.13.	Zeminlere ilave edilen katkı miktarları ve uygulanan deneyler .	61
Tablo 3.14.	Zemin-atık karışımlarına yapılmış deneyler ve uygulanan kür süreleri	67
Tablo 4.1.	Zemin iyileştirilmesinde inorganik ve organik katkı maddelerinin karşılaştırılması (Conner, 1990)	90
Tablo 5.1.	Tip-2 numunelere ait yükleme tablosu	113

Tablo 6.1.	Katkısız zeminlerin ve %15 katkı karışımların deneyle belirlenen M_R modelleri.....	154
------------	---	-----

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirilmesi, Uçucu kül, Mermer tozu, Endüstriyel atık kum, Elastiklik modülü

Atık modern toplumun çözülmesi gereken ve ihmal edilemez bir sorundur. Üretimle beraber atıklar çeşitlenmekte ve miktarı artmaktadır. Atıklar endüstriyel, sağlık, şehir ve sanayi gibi ortaya çıkış yerlerine göre isimlendirilir. Atıklardan bazıları ortaya çıkış aşamasında kimyasal işleme tabi tutulmadan su ile işlem görür. Bunların bir kısmı toz haldedir veya kurutulduktan sonra toz haline getirilebilir. Bu çalışmada endüstriyel atık kum, mermer tozu ve uçucu külün karayolu dolgusunda değerlendirilmesi olanağı araştırılmıştır. Türkiye’de yaklaşık senelik ortaya çıkış miktarları mermer tozu 650000, endüstriyel atık kum 600000 ve uçucu kül 13 milyon tondan fazladır. Bu üç katı atığın her biri % 5-40 oranlarda iki farklı doğal zemine karıştırılmıştır. Kürlenmiş ve kürlenmemiş karışım numunelerine dinamik, fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Bu özelliklerinde oluşan değişimlerin mikro yapı ile ilişkisini belirlemek içinde karışımlara XRD, SEM ve EDX analizleri uygulanmıştır. Çalışma, karayolu dolgusunda katı atıkların kullanımı yöntemini tekrar gündeme getirmiş, deney sonuçları bu üç katı atığın kara yolu dolgusunda kullanılacak yaş CBR’ı düşük (% 8, 13) CI ve CL sınıfı plastik zeminlerin iyileştirilmesinde zemin/atık oranı olarak 85/15 oranında kullanılabileceğini göstermiştir.

INVESTIGATION OF USAGE POSSIBILITY OF FLY ASH, MARBLE DUST AND INDUSTRIAL WASTE SAND FOR ROAD SUBBASE FILL MATERIALS

SUMMARY

Keywords: Soil stabilization, Fly ash, Marble dust, Industrial waste sand, Resilient Modulus

Waste is the non-ignorable problem of the modern world to be solved. When production increases, type and amount of waste increase as well. The wastes are classified by sector where they come out as industrial waste, medical waste and domestic waste. Some sorts of wastes are processed by water without a chemical process while the waste is coming out. Some of these wastes are in form of dust or they can be turned into dust after dried. In this study, the possibility of recycling marble dust, fly ash and industrial waste sand in road subbase is studied. In Turkey approximately more than 650.000 tons of marble dust, 600.000 tons of industrial waste sand and 13 million tons of fly ash come out in a year. Each of these three solid wastes is mixed with two different natural soils in different ratios from 5 to 40 %. Dynamical, physical and mechanical analyses have been carried out for the mixture of cured and uncured samples. In order to compare the changes with micro-structure; XRD, SEM and EDX analyses are tested on the mixtures. This study shows that the issue of using solid wastes materials the test results show that soil/waste rate can be 85/15 in the reinforcement of CI and CL class plastic soil which has low wet CBR (8, 13 %) to be used in highway fill.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Zemin mekaniği, ihtiyaca göre üzerine yapılar yapmadan önce veya sonra, zemin mühendislik parametrelerini elde etmek için kullanılan bilimdir. Parametreleri elde edilerek tarif edilmesinde temel özellikler bize zemini sınıflandırma kolaylığı sağlamaktadır. Zemin temel özellikleri ile şöyle tanımlanabilir; Zemin üç fazlı (dane, boşluk, su), heterojen, anizotrop, elastoplastik ve danelerden oluşan bir yapıya sahip doğal malzemedir.

Zemin, bazen inşaat mühendisliği malzemesi gibi (dolgu) kullanılır hareketli veya sabit yükler taşıtılır, bazen de özellikleri tespit edildikten sonra inşaat mühendisliği yapılarına (dayanma yapıları vb.) taşıtılır.

İnsan ihtiyaç ve istekleri doğrultusunda, her tür zemin üzerine veya içine yapı yapma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Zemin taşıma gücünün yetersiz olduğu durumda yapı temel türünün değiştirilmesi veya yapıyı taşıyacak özellikteki zeminin başka yerden getirilerek yapı yapılacak yere dolgu yapılması düşünülebilir. Bu yöntemlerin yanında özellikle karayolu, demiryolu ve hava alanı gibi yüzeysel ve uzunluğu kilometrelerce süren yapıların inşasında zaman ve işgücü kaybına sebep olunmadan bu zeminin yerinde iyileştirilmesi çarelerden biridir. Bu aynı zamanda yüzeysel yapı temelleri için oldukça ekonomik bir dayanım artırılma yöntemidir. Bu nedenle zemin iyileştirme yöntemleri zemin mekaniği biliminde geniş yer tutar.

Bilimin gelişmesi ile yapıların üzerine oturduğu zemin hakkında elde edilmesi gereken bilgiler artmış ve geoteknik bilimi inşaat mühendisliğinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu durum, geçeceği yerdeki zemini seçme özgürlüğü olmayan karayolları için de aynıdır.

Karayolu, insanları ve eşyaları bir yerden bir yere taşıma yapısıdır. İnsanlık tarihinde bu taşıma ihtiyacı hep artarak devam etmiş, bu süreç içinde yol inşası mühendisliğinin

önemli uğraşlarından biri haline gelmiştir. Zamanla standartlar yükselmiş ve yolu kullananların konforu öncelikli hale gelmiştir. Kaliteli kullanım için yol boyuna eğimleri azalırken, kurp çapları, kullanılan şerit sayıları ve banket genişlikleri artmıştır. Bunun üzerine, zaten geoteknik çalışmaların büyük hacimli toprak işleri ile yapıldığı karayolu inşaatlarına, yukarıda sayılan teknik gelişmeler de eklenince yol temelinin daha geniş bir enkeside oturtulma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Sonuçta karayolunun her zaman uygun zemin üzerinden geçme olasılığı azalırken toprak işleri (dolgu ve yarma) miktarı da o oranda artmaktadır. Bu gelişmeler yanında taşıtların taşıdığı yüklerin artması yol üstyapısını oluşturacak zeminin taşıma gücü yanı sıra tekrarlı yüklerin etkileri gibi daha hassas mühendislik özelliğinin bilinmesini zorunluluk haline getirmektedir.

Yol inşaatlarında yapılan yarma ve dolgu miktarları büyük hacimlere ulaşmış olmasına rağmen teknolojik gelişmeler yardımıyla yarmalar daha kolay yapılır hale gelmiştir. Ancak günümüze değin bu değişikliklerin yanı sıra dolgu yapım teknolojisi, geçmişte çoğu işin insan gücüne dayandığı zamanlara göre ciddi bir değişim geçirmemiştir. Doğru su içeriği, gerekirse katılan belirli oranlarda katkı ve zeminin uygun enerji ile sıkıştırılması, dolguyu oluşturacak zemin karışımının geoteknik özelliklerini iyileştirdiği artık bilinmektedir. Teknolojinin günümüz yol yapımına kattığı üstünlük olan makine gücünün artması ile dolguyu da daha kaliteli yapılabilmek imkânı doğmuştur. Yol tabakalarını oluşturacak uygun dane dağılımında (granülometride) zemin, katkı ve optimum su içeriği mekanik karıştırıcılarda önce harmanlanır. Ardından karışım dane çapı uygunsa asfalt serme makineleriyle veya doğrudan dökülür ve değişik özelliklerde silindirlerle sıkıştırılır.

Yol projesinde belirtilen kalınlıkta üst üste serilmiş tabakalar taşıtların ve yolun kendi oluşturduğu yükleri yer kabuğuna iletir. Aşağıdan yukarıya yapılış sırasına göre gerektiğinde önce dolgu ve granüler malzemelerle yapılan üstyapı tabanı sonra alt temel ve temel tabakaları inşa edilir. Bunun üzerine rijit (çimento-betonu) veya esnek (bitümlü veya asfalt-betonu) kaplama tabakaları serilir. Böylece yol katmanları korunmuş ve tamamlanmış olur.

Kaplama tabakasına kadar olan kısmı oluşturan dolgu ve diğer yol tabakalarında kullanılacak büyük hacimli uygun malzeme depoları her zaman yol güzergâhı üzerinde olmayabilir veya depolardaki malzeme aranan mühendislik özelliklerini göstermeyebilir. Bu durumda tabakalarda kullanılan malzemenin yerini alabilecek granüler malzemeler aranır. Doğal malzemelerden sanayi atıklarına kadar iri, ince daneli veya ayırık daneli granülometriye sahip birçok malzeme laboratuvarında incelenir. Bunların, projede istenen taşıma kapasitesi doğrultusunda yolun hangi tabakasında ve hangi kalınlıkta kullanabileceği tespit edilir. Uygun bulunan malzeme dolgu, üstyapı tabanı, alt temel veya temel tabakası olarak kullanılır (Al-Rawas, 2005; Harichane, 2011)

Yol katmanlarında kullanılacak uygun malzeme aranırken öncelikle tespit edilecek mühendislik özellikleri; Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), serbest basınç dayanımı (SB) ve esneklik modülüdür (M_R). Yeterli özelliğe sahip olmayan malzeme yol kaplaması altındaki tabakalarda ve dolguda kullanılamaz. Yerine konabilecek daha iyi malzeme yoksa eldeki zemin iyileştirilerek özellikleri yol katmanlarında kullanılabilir hale getirilir.

Zemin iyileştirmesi (stabilizasyon) zemin mekaniğinde geniş bir yere sahiptir. İyileştirme mekanik, fiziksel ve kimyasal yöntemler içerir. Bu yöntemler zemin veya atık maddelerin dayanımını artırır. Katkı maddeleriyle yapılan iyileştirme, çok kullanılan yöntemlerdendir. Bu iki yönden fayda sağlamaktadır; birincisi, bu yöntemle zemin dayanımı ve taşıma gücü artırılabilir, ikincisi, eğer katkı olarak kullanılacak madde endüstriyel bir atık ise toprağa, havaya, suya karışmadan yani çevrenin doğal yapısına zarar vermeden tekrar kullanımı sağlanmış olur.

Bilecik ili, kil ve doğal taş yatakları bakımından zengin ve çeşitliliğe sahip bir jeolojik yapıya sahiptir. İlde bu hammaddelerin işlendiği çok sayıda mermer kesim fabrikası ve atölyesi bulunmaktadır. Bunların yanında ilde seramik fabrikaları, maden zenginleştirme, kalker öğütme ve kalker işleme tesisleri vardır. Bu tesislerin birçoğu, atıklarını doğaya hiçbir önlem almadan kendilerine gösterilen yasal biriktirme alanlarına bırakmaktadır. Bilecik, sayılan üretim tesislerinden çıkan, çoğu kimyasal işleminden geçmediği ve sadece su ile işlendiği için toksin madde içermeyen

birçok granüler sanayi atığına sahiptir. Dünyada ve ülkemizde Bilecik gibi gelişmekte olan, sadece su ile taş ve toprak işleyerek hammadde ve toz atık üreten birçok sanayi bölgesi bulunmaktadır. Dünyadaki benzer bölgelerde de bu ve benzeri toz atıklar sorun oluşturmaktadır. Atıkların verimli olarak dolgu baraj, gölet ve karayolu inşaatı gibi toprak işlerinin kübaj miktarı milyon m³'lerle ölçülen yapıların dolgusunda toprağa karıştırarak kullanılabilmesi düşünülmüştür. Bu çalışma toz atıkların özellikle yol katmanlarından dolguda ve daha yüksek taşıma gücüne sahip olması gereken yol enkesidi üst katmanlarını oluşturan alttemel ve temelde kullanılabilmesi ile yapılmıştır.

Günümüzde üretim ve buna bağlı olarak enerji ihtiyacı sürekli artmaktadır. Ekonominin temelini oluşturan kıt kaynakların çok amaçlı ve verimli kullanımı bu yüzden giderek daha da önem kazanmaktadır. Bunun yanında üretim çeşitliliği ve miktarının artması, farklı özelliklere sahip yan ürünlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Atık haline gelmiş yan ürünler ise kentsel atıkların bulunduğu deponi alanlarına ulaştırılmalı, ya da bertaraf edilmelidir.

Bu çalışmada malzeme olarak kullanılmak üzere Bilecik ilinden mermer tozu (M) ve endüstriyel atık kum (AK), Çayırhan termik santralinden uçucu kül (UK) atıkları, Bozüyük-Mekece yol inşaatı güzergâhı dolgularında kullanılan iki farklı zemin numunesi alınmıştır.

Çalışmada ilk olarak UK, M ve AK atıklarının karayolu inşaatı alt yapısına yetecek miktarda olup olmadığı araştırılmıştır. Üç atığın her birinin senelik ortaya çıkış miktarları UK için 15 milyon ton, M ve AK için 100 bin ton'dan fazla olduğu tespit edilmiştir. Hacimleri fazla olan atıkların depolanma ve uzaklaştırılma maliyetleri de yüksektir. Bu sebeple atıkların çevreyi ne kadar ve ne şekilde kirleteceği düşünülmeden buldukları en yakın ve göze çarpmayacak toplama alanlarına bırakılmaktadır. Çok büyük yığınlar oluşturan bu atıklar çevre ve görüntü kirliliği yanında:

- Yer kaplayarak arazinin başka bir kullanım amacına kapalı kalması,
- Rasgele araziye, doğaya atılması,

- Sulanabilir tarım arazilerinin azalması,
- Kuruyan atıkların hava, su etkileriyle dağılması,
- Çeşitli şekillerde insan vücuduna alınan atık parçacıklarının sağlık sorunlarına sebep olması,
- Yağmurla dağılmanın engellenememesi,
- Uzun süre vahşi depolanan atıklarda bulunan ince maddeler ve kimyasal reaksiyonu sonucu yeraltı suyollarına sızıp tıkararak su rejimi ve havzasına zarar vermesi, gibi büyük problemleri ortaya çıkartırlar.

Bu sebeplerden araştırmacılar için, toz atıkların yeniden kullanımı, kullanım miktarının artırılması önemli ve çözülmesi gereken bir problemdir.

UK puzolanik özelliği sebebiyle yol tabakalarında kullanımı giderek artan bir atık malzemedir. M ise tekrar kullanımı üzerinde çalışılan bir atıktır. Bu iki atık ve bu çalışma ile özellikleri belirtilen AK'nın karayolu dolgusunda kullanımı ile en azından hızla birikmesinin önüne geçilmiş olacaktır. Bu durum özellikle sanayisi gelişmekte olan küçük kentlerin atıkları toplama ve yeniden değerlendirme problemlerini küçümsenmeyecek ölçülerde azaltacak böylece gücü sınırlı yerel yönetimler atık alanlarındaki bu tür büyük hacimleri kaplayan toz, mineral veya granüler atıklarla değil sadece sanayi ve kentsel atıklarıyla mücadele etme gücü bulacaklardır.

Bu amaçlar doğrultusunda çalışmada iki laboratuvar programı hazırlanmıştır. Birinci laboratuvar programında atık ve zeminlerin kimyasal, fiziksel ve mineral özellikleri belirlenmiş, zeminlere Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), serbest basınç dayanımı (SB), esneklik modülü (M_R) deneyleri yapılmıştır.

İkinci laboratuvar programında atıklar iki farklı doğal zemine ayrı ayrı ilave edilerek elde edilen zemin-atık karışımlarının kimyasal analizleri, fiziksel özellikleri belirlenmiş ve karışımlara değişik kür süreleri sonunda CBR, SB, M_R deneyleri yapılmıştır. Farklı kür sürelerinin etkilerini görmek için ilave olarak kürlü karışım numunelerine dane çapı dağılımı, SB, CBR deneyleri yapılmıştır. Bu deney bulgularını desteklemek ve mineral özellikleri tespit etmek için X-ışınları

Difraktogram (XRD) analiz sonuçları ve Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntülerinden yararlanılmıştır.

Çalışma süresince yapılan araştırma, deney ve bulgular tez bölümlerinde şöyle sunulmuştur. Birinci bölümde konunun tanıtımı, çalışma neden ve amaçları, ikinci bölümünde konu hakkında daha önce yapılmış çalışmalar, üçüncü bölümde birinci laboratuvar programında atık ve zeminlerden elde edilen özellikler ve kullanılan metodlar anlatılmıştır. Dördüncü bölümde zemin iyileştirmesinde kullanılan metodlar, beşinci bölümde M_R deney cihazı, numune hazırlığı, deney yapılışı hakkında bilgiler verilmiştir. Altıncı bölümde ikinci laboratuvar programında elde edilen deney sonuçları, yedinci bölümde sonuçlar sunulmuş ve önerilerde bulunulmuştur.

Üretim artışı, kaynakların çok amaçlı ve verimli kullanım gerekliliğini arttırmaktadır ve bu süreç artarak devam edecektir. Sonuçta üretim çeşitliliği, değişik özellikte atıkların ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan atık ve zeminlerle yapılan deneylerden elde edilen bulgular bu atıkların kullanımının arttırması açısından ümit vericidir. Bunlardan kullanım miktarı açısından sıkıştırma deneylerinde elde edilmiştir. Sıkıştırma deney sonuçlarına göre iki zemine farklı miktarda atık ilave edilmiş, % 40'a kadar her oranda kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ), 2006 dolguda kullanılabilme sınır değerinin üstünde çıkmıştır. KTŞ'ye uygun olarak % 40 UK, M, AK atık miktarına kadar T ve K zeminleri ile yapılmış tüm karışımlar dolguda kullanılabilir olarak tespit edilmiştir. Ayrıca yol projelendirmesinde daha çok dikkate alınan CBR, SB değerlerine bakıldığında deney sonuçlarına göre % 15 oranında UK, M ve AK atıklarının MC sınıfı zeminlere karıştırılarak karayolu dolgusunda kullanılabilceği tespit edilmiştir.

BÖLÜM 2. KATI ATIKLAR ve ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNDE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. GİRİŞ

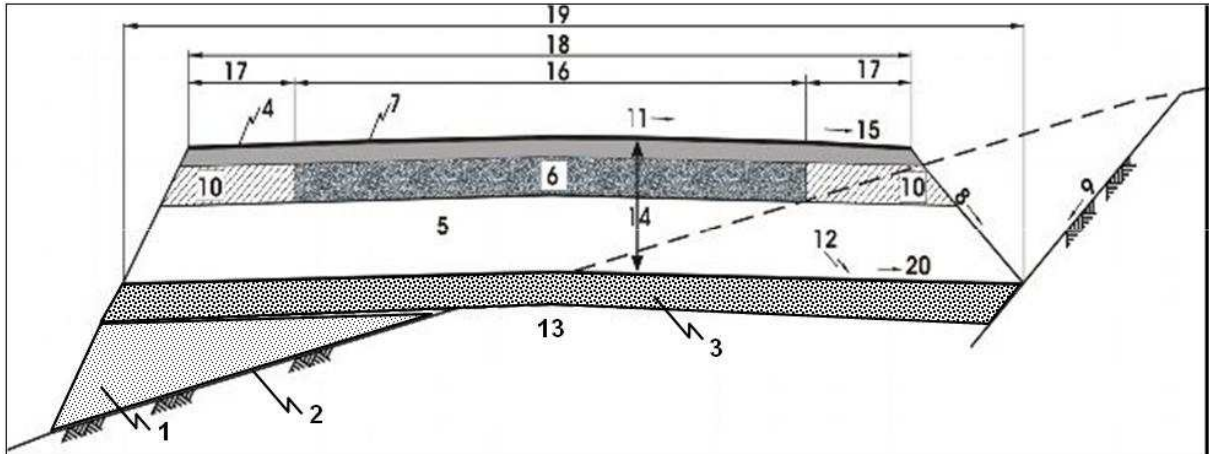
Katı atık, kullanılma süresi dolan ve yaşadığımız ortamdan uzaklaştırılması gereken her türlü katı malzemedir. Oluştığı yere göre adlandırılan katı atık evde, okulda, hastanede, endüstride, bahçelerde ve daha birçok yerde oluşabilir.

Atık malzemelerin yeniden kullanımı ile birçok fayda sağlanabilir. Bunlardan bazıları; a) Depolama maliyetleri azalır, b) Depolama için ayrılacak sahalara çok daha faydalı başka amaçlar için kullanılabilir, c) Atık malzeme kullanımının artması sonucu bu malzemelerin satılmasıyla bir miktar gelir elde edilebilir, d) Atık malzemeler bazı tükenmekte olan veya pahalı doğal malzemelerin yerine kullanılabilir (Ahmaruzzaman, 2010).

Mermer fabrikası su arıtma ünitesinde biriktirilen mermer tozu, kalker işlenen maden zenginleştirme tesisi çöktürme havuzlarında toplanan endüstriyel atık kum ve kömür yakılan enerji üretim tesisi baca gazlarından toplanan uçucu kül bu endüstriyel katı atıklardan sadece üçüdür. Bu çalışmada atık olarak anılacak üzerinde çalışılacak bu üç yan ürünün seçilme nedeni, sürekli ve hacimce büyük miktarlarda üretilmesidir. Ulaştırma alanında yol yapımı, bakım ve onarım çalışmalarında kullanılan agrega miktarı dünya piyasalarındaki talebin yaklaşık 2/3'üne eşittir. Dünya genelinde inşaat agregalarına talep yılda ortalama yüzde 4.7 oranında artmaktadır (Tutumluer, 2010). Karayolu inşaatları artan bu ihtiyaçta en büyük payı oluşturduğu yol üstyapısı tip enkesidindeki tabakaların ne oranda inşaat agregasına ihtiyaç duyulduğu incelendiğinde görülecektir.

Tipik bir yol enkesidi (Şekil 2.1) yol üstyapısı ve yol üstyapı tabanı şeklinde iki ana bölüme ayrılabilir. Yol üstyapısı kaplama, temel ve alttemellerden oluşurken yol üstyapı tabanı seçme malzeme ve dolgu tabakalarından oluşur.

Kaplama tabakası yolun yüzeyini oluşturan, diğer tabakalar gibi taşıt yüklerini alttaki tabakalara ileten, coğrafi iklim etkilerine karşı dayanıklı böylece yol granüler katmanlarını koruyan, esnek (bitüm-agrega) veya rijit (beton) malzemelerle yapılabilir. Kaplama malzemesinin % 75'ini inşaat agregaları oluşturmaktadır. Temel ve alttemel tabakaları % 95 oranında granüler iri malzeme içeren malzemedir. Seçme malzeme üstyapı tabanını oluşturan doğal zeminin taşıma gücü zayıfsa kullanılır ve 1/4 oranında ince malzeme içeriğine izin verilen dane dağılımı ayarlanmış agregadan imal edilir. Dolgu katmanlarında % 50 ince dane içeren doğal zemin, kırma çakıl-taş veya bunların karışımından oluşan malzeme kullanılabilir.



- | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1- Dolgu | 7- Kaplama Tabakası | 14- Üstyapı Proje Kalınlığı |
| 2- Doğal Zemin | 8- Hendek Şevi | 15- Banket Eğimi |
| 3- Üstyapı Tabanı (Seçme Malzeme) | 9- Yarma Şevi | 16- Trafik Şeritleri Genişliği |
| 4- Banket Kaplaması | 10- Banket Temeli | 17- Banket Genişliği |
| 5- Alttemel Tabakası | 11- Yolun Enine Eğimi | 18- Yol (Platform) Genişliği |
| 6- Temel Tabakası | 12- Tesviye Yüzeyi | 19- Üstyapı Tabanı Genişliği |
| | 13- Yol Gövdesi Taban Zemini | 20- Taban Yüzeyinin Enine Eğimi |

Şekil 2.1. Yol tip enkesidi (Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006)

Karayolu Teknik Şartnamesi (2006) yol tabakalarında kullanılan malzemenin dolguda en fazla % 50, alttemel ve temel tabakalarında en fazla % 5 ince malzemeye içermesine izin vermektedir. Bu rakamlar toplandığında yol katmanlarının

kalınlıklarına da bağılı olarak yolun yapımında kullanılan malzemenin % 75-90'ının granüler inşaat agregasından oluştuğu görülecektir.

Mühendislik özellikleri dolguda kullanılmaya elverişli olmayan yol yapım güzergâhındaki doğal zemini iyileştirmek, mevcut kötü malzemenin kazınıp dolgu için yerine yeni malzeme aranması ve taşınması gereğini ortadan kaldırır. Kullanılabilir malzeme özellikleri şartnamelerle düzenlenmiştir. Ülkemizde kullanılan şartname Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanıp 2006 yılında yürürlüğe konulan Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ)'dir. Bu çalışmada KTŞ "şartname" olarak anılacak ve yapılan deney sonuçlarının değerlendirmesinde KTŞ'ye uygunluk aranacaktır. Şartnamede yol üstyapı tabanında kullanılacak seçme malzeme ve dolgu malzemesinin Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) en az % 10 olarak belirtilmiştir. CBR'ı % 8'in altında olan yol gövdesi taban zemini kazılıp alınmak zorundadır. Bunun yerine şartnameye uygun doğal zemin veya uygun hale getirilmiş (iyileştirilmiş) malzeme konacaktır. Ayrıca bu katmanlarda fiziksel özellikleri, likit limit (w_L) ve plastik limit (w_P)'i uygun doğal zemin, agrega, katı atık veya bunların belli orandaki karışımı kullanılabilir. Dolayısıyla yol enkesidinde üstyapı katmanlarında kullanılan agrega malzeme miktarı gibi üstyapı tabanındaki dolgu için kullanılacak zemin veya zemin-agrega karışımı ihtiyacının da büyük hacimli olacağı ortadadır. Şartnamede dolgu malzemesi özelliklerine uymayan bu zeminlerin endüstriyel katı atıklarla kullanılabilir hale getirilmesi bu çalışmanın temel amacıdır.

Bu kısımda uçucu kül, mermer tozu ve endüstriyel atık kum katı atıkları başta olmak üzere daha önce yapılmış yol üstyapı katmanlarında ve öncelikle üstyapı tabanında kullanılan dolgu ile seçme malzeme iyileştirilme çalışmalarına değinilecektir.

2.2. Uçucu Kül

Enerji üretim yöntemlerinden biri de katı yakıt (kömür) kullanımımızdır. Bir fosil enerji kaynağı olan kömür, Dünya üzerinde yaygın olarak bulunur. Rezerv ve üretim seviyeleri yönünden diğer fosil yakıtlara göre ömürleri fazladır. Bugünkü tüketim seviyeleri ile dünya petrol rezervlerinin 40 yıl, doğalgaz rezervlerinin 60 yıl ve linyit rezervlerinin ise 156 yılda tükeneceği tahmin edilmektedir. Bu karşılaştırma, sadece

günümüz teknolojileri kullanılarak ekonomik olarak işletilebilecek linyit rezervlerini kapsamaktadır (Linyit Raporu, 2005). Linyit; fiyat istikrarı, taşıma, depolama ve kullanım kolaylığı yönünden emniyetli ve güvenilir olması, kullanıcıya arzının ucuzluğu ve sürekliliği, gibi özellikleri ile vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Kömür bu konumu ile geçmişte olduğu gibi gelecekte de sürdürülebilir kalkınma ve enerjide güvenilirlik açısından önemli bir role sahip olmaya devam edecektir. Ülkemizde fosil yakıtlar içinde en büyük rezerve sahip olan kaynak kömürdür. Türkiye'deki kömür türleri rezervi içindeki en büyük pay 12.3 milyar ton ile linyite aittir. Ülkemiz linyit rezervleri kalorifik değeri 1.000 kcal/kg ile 4.200 kcal/kg arasında değişiklik göstermektedir. Örneğin, en büyük rezervin bulunduğu Afşin-Elbistan havzasındaki 1.9 milyar ton linyit kömürünün ısı değeri 1100 kcal/kg civarındadır. Bu nedenle termik santrallerde kullanımı ön plana çıkmıştır. Linyit sektöründe faaliyet gösteren kuruluşların başında % 90'lık payla Kamu Kuruluşları olan Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ) ve Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) gelmektedir. Linyit rezervlerimizin ağırlıklı olarak düşük ısı değeri olması, bu kaynaklarımızın daha çok termik santrallerde elektrik üretim amaçlı tüketilmesine olanak sağlamaktadır (Kömür 'Linyit' Sektör Raporu, 2008).

Kömür homojen olmayan, kompakt, çoğunlukla bitki parçalarından meydana gelen, tabakalaşma gösteren, içerisinde karbon (C), az miktarda hidrojen (H), oksijen (O), kükürt (S) ve azot (N) elementlerinin bulunduğu ama inorganik (kil, silt, iz elementleri gibi) maddelerin de olabildiği, bataklıklarda oluşan, kahverengi ve siyah renk tonlarında, yanabilen, katı fosil organik kütlelerdir.

Kömür oluşum sürecinde önce bitkisel maddeler bataklık ortamlarda birikip çöker. Deprem, levha hareketi ve volkanik aktiviteler gibi jeolojik işlevler ile birlikte yeraltına gömülür. Üzerindeki zemin ağırlığının oluşturduğu basınç ve ortamın ısısal şartlarından etkilenme sonucu organik maddenin bünyesinde fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelir.

Kömürün ham hali Turba olarak adlandırılan ama kömür sayılmayan organik maddedir. Turba önce Linyit, daha sonra Alt Bitümlü Kömür, sonra Taşkömürü,

Antrasit ve en sonunda şartlar uygun olursa Grafit'e dönüşür. Bu olgunlaşma sürecine Kömürleşme denilmektedir.

Kömürün değişik şekilde uluslararası sınıflamaları vardır. Ana unsur olan kalorifik sınıflamaya göre kömürler 5 çeşide ayrılır.

- Turba (Yakıt olarak değeri yok),
- Linyit (Isıl Değer: 4610 kcal/kg'ın altında),
- Taşkömürü (Isıl Değer: 5390-7700 kcal/kg arasında),
- Antrasit (Isıl Değer: 7000 kcal/kg'ın üstünde),
- Grafit.

Ülkemizdeki kömür üretimi; Enerji Sektörü (Termik Santral), Sanayi Sektörü ve Isınma (teshin) Sektörü olmak üzere 3 sektörün taleplerinin karşılanmasına yöneliktir. 2007 yılı itibariyle, linyit üretiminin % 48'i TKİ, geri kalan ise EÜAŞ ve özel sektör tarafından yapılmıştır. Aynı yıl linyit tüketiminde en büyük pay % 76 ile termik santrallere ait olup, bu oranlar sanayide % 10, ısınma sektöründe ise % 14'dür (Kömür Sektör Raporu, 2008).

Taşkömürü, ısıl değeri yüksek, yanma sonucu geriye kalan kül miktarı az olması dolayısıyla kullanım alanı geniş bir kömürdür. 2006-2009 yılları arasında Türkiye'de tüketilen taşkömürünün ortalama miktarı yıllık 23 milyon ton'dur. Bunun 6 milyon tonu enerji sektöründe (termik santralde), kalanı sanayi ve ısınma sektöründe tüketilmiştir (Taşkömürü Sektör Raporu, 2011). Düşük ısıl değere sahip olduğundan özel yakım teknikleri gereken bu nedenle sınırlı değerlendirme imkânı olan linyit kömürü termik santral yakıtı olarak daha fazla tercih edilmektedir. Alkaya vd. (2006) göre termik santrallerde yakılan linyit miktarının 55 milyon ton/yıl'dır. Dolayısıyla yılda yakılan taşkömürü linyitin yaklaşık 1/10'u kadardır. Ayrıca yanma sonucu ortaya çıkan katı atıkları bakımından taşkömürü linyite göre daha az kirleticidir. Bunun için öncelikli çözülmesi gereken linyit atıklarının sorun teşkil etmeyecek hale getirilmesidir.

TKİ sorumluluğunda bulunan ve kurumca hiç veya çok az yatırım yapılan kömür sahalarını hızla özel sektöre açarak enerji alanında yerli kaynak oranının artırılması doğrultusunda aşağıdaki sahalarda özel sektörün yatırım yapmasına da imkân tanınmıştır.

- Tekirdağ-Saray’da 2*150 MW
- Bolu-Göynük’te 2*135 MW
- Çankırı-Orta’da 2*135MW
- Şırnak-Silopi’de 135MW
- Şırnak’ta 2*135 MW

Bunlara ilaveten; Eskişehir-Mihalıççık, Adana-Tufanbeyli, Bingöl-Karlıova’daki sahalarla ilgili olarak da, elektrik santrali kurma ön şartlı olarak değerlendirilmek üzere etüt çalışmaları devam etmektedir (Kömür Sektör Raporu, 2008).

Enerji Sektörü (Termik Santral) linyit kullanımına bakılırsa, Kamuya ait linyit sahaları için yıllık toplam üretim kapasitesi TKİ’nin satılabilir kapasitenin 34 milyon tonu 4209 MW kurulu gücündeki termik santrallere yöneliktir. Ayrıca, EÜAŞ Genel Müdürlüğü termik santrallara vermiş olduğu 23.5 milyon ton/yıl linyit miktarını, Elbistan Termik Santralı ilave ünitelerinin devreye girmesiyle 2010 yılından itibaren kademeli olarak arttırılması programlanmıştır (Kömür Sektör Raporu, 2008; Kömür ‘Linyit’ Sektör Raporu, 2009).

Tablo 2.1’de 2009 yılı itibariyle kurulu termik santralleri görülmektedir. Tunçbilek A ve Soma A santralleri 2010’da devre dışı kalmış, 2011 yılı itibariyle Çanakkale Çan ve Afşin Elbistan B termik santralleri devreye alınmış kademeli olarak elektrik üretim kapasiteleri arttırılmaktadır. Dolayısıyla çalışır durumdaki 12 santralin tam kapasite çalışması durumunda 8000 MW elektrik üretirken 80 milyon ton/yıl linyit kullanılması gerekecektir. Ancak kömür kalitesinin sürekli aynı olmaması, bazı santrallerde yanlış ve/veya ekonomikliğini yitirmiş yakma tekniklerinin kullanılması, tesislerin çok uzun sürebilen bakımlara girerek üretimin kesintiye uğraması gibi teknik nedenlerden dolayı bu rakama ulaşamamaktadır.

TKİ, 2010 yılında ürettiği ve ürettirdiği kömürlerden toplam 29.8 milyon tonunun satışını yapmıştır. Bu miktarın 23.4 milyon tonunu (% 79) termik santrallerde kullanılmak üzere EÜAŞ'ye ya da bağlı ortaklıklarına ve 6.4 milyon tonunu (% 21) ise ısınma ya da sanayide kullanılmak üzere piyasaya satmıştır. Buna göre yıllık enerji sektörü linyit tüketimi 2007-2010 yılları arasında yıllık toplam 50-58 milyon ton'dur (Linyit Sektör Raporu, 2010).

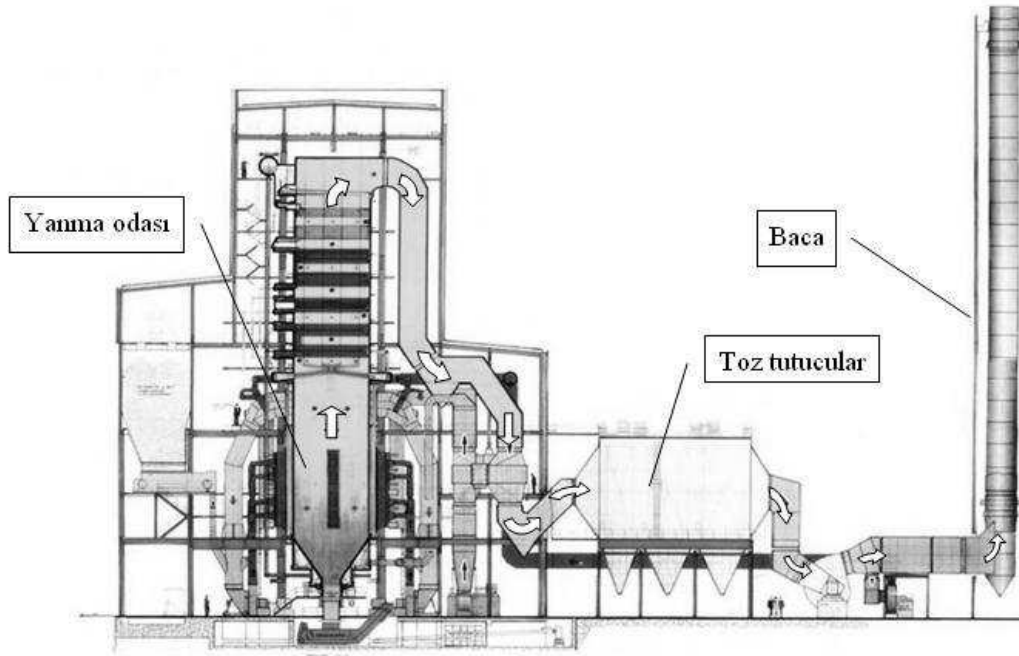
Tablo 2.1. Linyite dayalı termik santraller

Proje adı	Linyit Tüketim Kapasitesi (bin ton/yıl)	Kurulu Güç (MW)
Muğla Yatağan	5.350	630
Muğla Milas Yeniköy	3.750	420
Muğla Hüsamlar Kemerköy	5.000	630
Çanakkale Çan	1.800	320
Kütahya Seyitömer	7.100	600
Kütahya Tunçbilek A-B	2.450	365
Manisa Soma A-B	8.000	1.034
Bursa Orhaneli	1.500	210
Afşin Elbistan A	18.000	1.360
Afşin Elbistan B	18.000	1.440
Sivas Kangal	5.400	450
Ankara Çayırhan	4.300	620
Toplam	80.650	8.079
Not: Tunçbilek A ve Soma A santrallerinin 2010 yılında devre dışı kalacağı, santrallerin yılda 6.500 saat çalışacağı öngörülmüştür (Kömür Sektör Raporu, 2009).		

Termik santrallerin tam kapasiteli çalışması, yeni santral yatırımlarının işletmeye alınması ve Türkiye'nin ekonomik yapılanmasında bir olumsuzluk yaşanmaması durumunda linyitin enerji sektöründe payı % 30'un üzerine çıkacak, yakılan linyit kömür miktarı artacaktır. Elektrik üretiminde maliyet açısından hidrolikten sonra ikinci sırada linyitin yer alması ayrıca son yıllarda yerli kaynak üretim ve kullanımına ağırlık verilmesi nedeniyle gelecek yıllarda linyitin elektrik üretimindeki payını arttıracaktır.

Isıl değeri düşük linyit kömürü, evlerde kullanıma uygun olmayan bir yakıttır. Ancak termik santrallerde yakılarak ekonomik bir değere dönüştürülmektedir. Yakılan linyit kömürlerinden geriye kömür ağırlığının % 20'si dip külü (cüruf) ve % 23'ü uçucu kül olarak kalmaktadır (Misra vd., 2005a). Ortaya çıkan bu atık malzemelerden çevre açısından en büyük sorun yaratan uçucu kül 100 µm'den daha küçük inorganik

parçacıklardır. Uçucu kül toz halinde veya öğütülmüş (pulverize) kömürün yaklaşık 1200 °C gibi yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan ve baca gazları ile sürüklenen silikat ve silikat-alüminat toz halindeki yanma kalıntısıdır. Uçucu kül daneleri çok küçük oldukları için oluşan sıcak baca gazları ile birlikte kolayca sürüklenir. Bacadan önce bulunan elektrofiltre veya siklon tipi toz tutucularda, uçucu kül elektrostatik veya mekanik yöntemle tutulur (Şekil 2.2). Baca gazındaki kül daha sonra toz tutucuların alt kısmında bulunan haznelerde biriktirilir ve düzenli olarak santral dışına alınır. Santralde bu ünite çalıştığı sürece çevre ve havanın kirlenmesi önemli oranda önlenmiş olur (Cömert, 2005; Alkaya, 2009; Görhan vd., 2009).



Şekil 2.2. Termik santralde baca gazının izlediği yol

2002-2010 yılları arasında Türkiye termik santrallerinde yıllık ortalama 55 milyon ton linyit kömürü yakılmış, dolayısıyla yıllık en az 13 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmıştır (Türker vd., 2004; Alkaya vd., 2006; Linyit Sektör Raporu, 2010). Örnek olarak, Marmara bölgesinin bir işletmesi olan Orhaneli (Bursa) termik santralinde 2008 verilerine göre yılda 400 bin ton uçucu kül üretilmiştir. Termik santralin atık küllerinden 170 bin tonu beton üreticilerine satılmaktadır. Kalan kısmı kül-barajında üstü açık (vahşi) depolanmakta ve bu durum önemli çevre problemlerine neden olmaktadır.

Uçucu külde çoğunlukta bulunan mineraller alüminyum-silikat ve camlar, mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), kuvars (SiO_2), magnetit (Fe_3O_4), anortit/albit ($((\text{Ca},\text{Na})(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_8)$), anhidrit (CaSO_4), etrenjit ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$), opaline SiO_2 , hematit (Fe_2O_3) ve kireçtir (CaO) (Moreno vd., 2005).

Alkaya vd. (2006) uçucu külleri termik santralde kullanılan yakıtta göre taşkömürü ve linyit uçucu külleri olarak iki ve kimyasal yapıları bakımından 4 ana gruba ayırmışlardır;

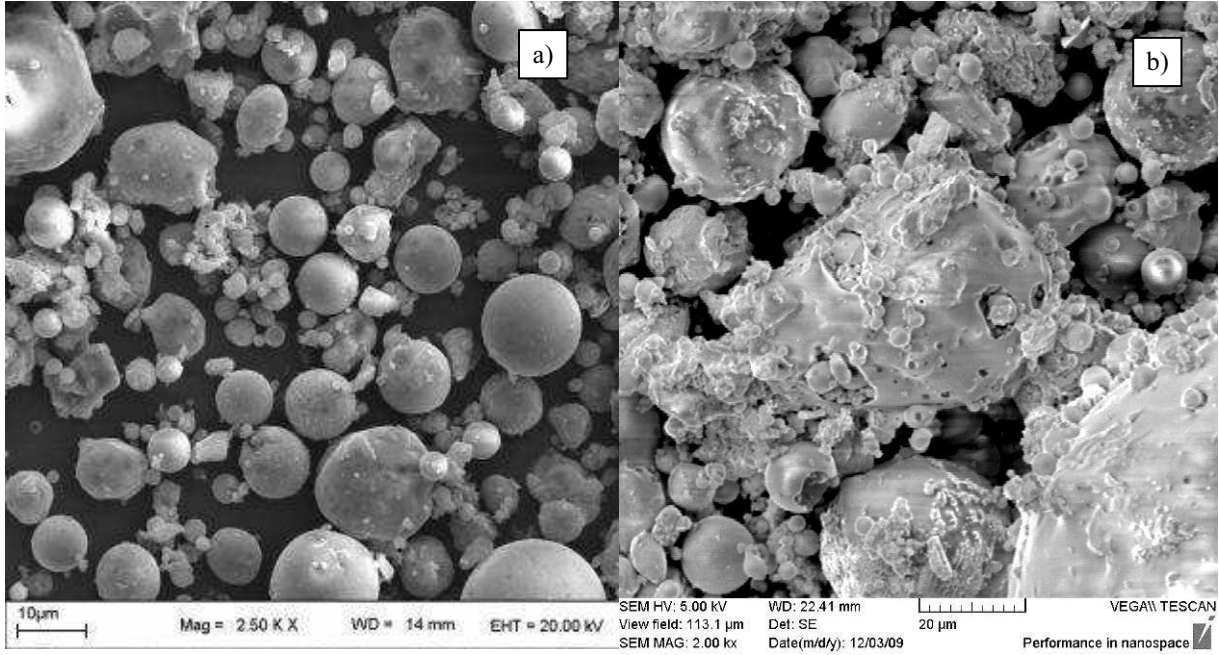
1. Silikat-Alüminat Esaslı Uçucu Küller: Bileşimlerinin büyük bir kısmını silikat (SiO_2) ve bir miktar alüminat (Al_2O_3) meydana getirmektedir. Genellikle taşkömürü uçucu külleri bu yapıdadır.

2. Silikat-Kalsit Esaslı Uçucu Küller: Yapılarındaki ana oksitler silikat (SiO_2) ve kalsittir (CaCO_3). Bazı durumlarda ek kireç kullanımına gerek kalmaksızın kendi kendilerine bir bağlayıcılık oluştururlar.

3. Sülfö-Kalsit Esaslı Uçucu Küller: Yapılarının büyük bir bölümü kükürt trioksit (SO_3) ve kalsitten (CaCO_3) meydana gelmiştir. Sulu ortamda kendiliğinden sertleşebilirler. Bu sınıfa genellikle linyit uçucu külleri girmektedir.

4. Sınıflandırılmayan Uçucu Küller: Termik santrallerdeki yakma sisteminin homojen olmamasından kaynaklanan ve belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir. Kimyasal bileşim oranları sürekli değişebilir.

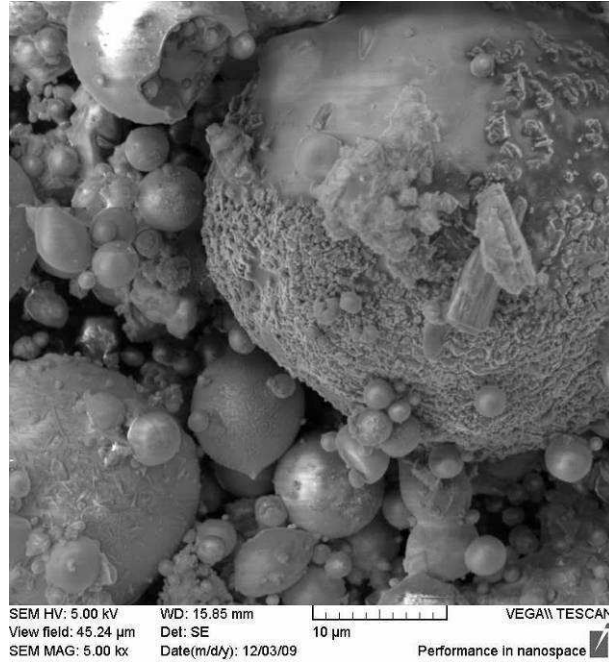
TS EN 450-1/2008'e göre uçucu kül, kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip, esas olarak alüminat (Al_2O_3) ve silikat (SiO_2)'tan oluşan taneciklerdir. Uçucu kül, toz haline getirilmiş (pulverize) antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarından toplanır.



Şekil 2.3. a) Küresel ve yarı-küresel uçucu kül (x2500) (Alyamaç ve İnce, 2010), b) Küresel, yarı-köşeli ve köşeli Çayırhan uçucu külü (x2000) (bu çalışma)

Uçucu külün üretimi ve karakteristik özellikleri; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi, kömür kompozisyonu ve yakma sistemine göre değişmektedir. Uçucu külün özellikleri aynı santralde bile gün içerisinde yapılan yüklemelerden (farklı kömür karışımından) dolayı değişebilmektedir. Uçucu kül, son yıllarda yapılan çok sayıda araştırmayla çimento ve beton üretiminde yaygın olarak değerlendirilen, puzolanik özellikleri olan bir maddedir. Uygun oranlarda ve doğru kullanımı halinde betonun birçok özelliğini olumlu yönde etkilediği ve özellikle kimyasal etkilere dayanıklılığını arttırdığı bilinmektedir (Görhan vd. 2009).

Uçucu küllerin boyutları genellikle 0.5 ile 200 µm arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Özgül yüzeyleri ortalama 2800-3800 cm²/g dolayındadır. Uçucu külün özgül ağırlığı; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin özgül ağırlığı ortalama 2.4'tür. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, uçucu külün puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak için farklı yaklaşımlar kullanılmış ve bunlarla uçucu kül aktifleştirilerek yapı malzemelerinde önemli bir katkı malzemesi olarak kullanımının yolu açılmıştır (Görhan vd., 2009).

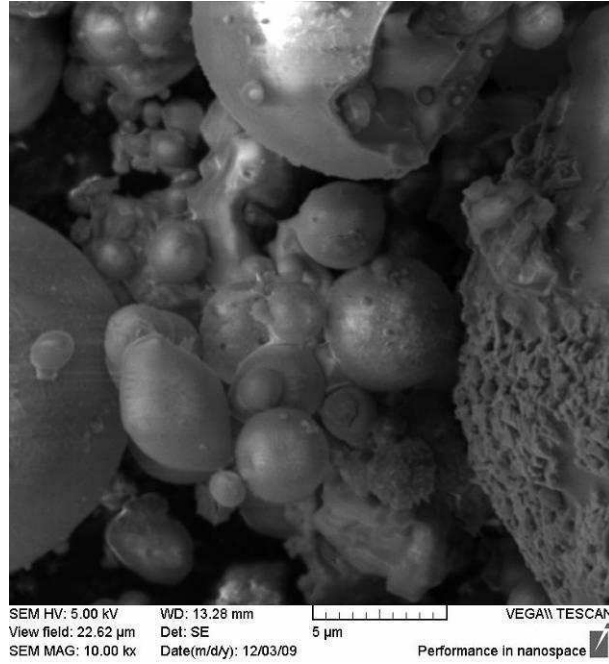


Şekil 2.4. Hematit, feldispat kaplı küresel Çayırhan uçucu külü (x5000) (bu çalışma)

Kömür kullanılan termik santral yan ürünü uçucu kül, üretim miktarı çokluğu ve kullanım olanakları bakımından yapı malzemeleri arasında önemli yer tutan atık ürünlerin başında gelmektedir. Kömürün içinde bulunan organik maddeler yanma ile oluşan yüksek sıcaklıklarda ayrışmakta ve bacadan atılırken aniden soğuyarak çoğunluğu küresel bir kısmı ise yarı-köşeli ve köşeli danecikler oluşturmaktadır (Şekil 2.3).

Uçucu küllerin % 67-95'ini oluşturan küresel şekilli danelerin içi daha küçük kürelerle dolu olanlarına plerosfer, içi boş olanlarına senosfer adı verilir (Mattigod, 1990). Uçucu kül partikülleri parlak (camsı), portakal yüzeyli (hematit), küçük iğneciklerle (feldispat) kaplı olabilir (Şekil 2.4 ve Şekil 2.5).

Uçucu kül kavramı 1930'larda elektrik enerjisi endüstrisinin gelişmesi ile yayılmaya başlamıştır. İlk olarak 1937 yılında R.E. Davis, Kaliforniya Üniversitesi'nde uçucu külün betonda kullanımıyla ilgili deneysel sonuçları elde etmiştir. Bu çalışma uçucu kül kullanımının temelini oluşturur. Uçucu küllerin ilk olarak inşaat sektöründe kullanımı ise 1948 yılında, A.B.D.'de Montana'da bulunan Hungry Horse barajında kullanılmasıyla gerçekleşmiştir.



Şekil 2.5. 1-40 µm arasında değişen küresel, içi mikro küreler ile dolu plerosfer Çayırhan uçucu kül danecikleri (x10000) (bu çalışma)

Uçucu kül kullanımının Türkiye'ye gelmesi 1960'ları bulmuştur. Çimento endüstrisinin uçucu küle tanışması ise 1970'lere dayanmaktadır. Bugün Dünya'da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yıllık 600 milyon ton/yıl civarındadır. Türkiye'de ise bu rakam çalışır vaziyette olan toplam 12 termik santralde yılda 13 milyon ton kadardır. Uçucu küller, günümüzde inşaat sektörü başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe katkılı beton ve çimento üretiminde, portland çimentosu üretiminde hammadde olarak, beton ve asfalt yol yapımında, kireç ile birlikte enjeksiyon uygulaması, dolgu ve zeminde iyileştirmesi vb. geoteknik uygulamalarda, tuğla, kiremit ve seramik üretimi ve dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006; Doğan, 2007; Uçucu kül, 2010).

Uçucu küller üzerine son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Misra vd. (2003) uçucu külün ticari kullanım alanını ve uçucu külün büyük miktarlarda tüketimi için geniş değerlendirme alanlarını araştırmışlardır. Atıkların zemine farklı karıştırma teknikleriyle iyileştirme katkısı olarak katılabileceği belirtilmiş, (jet grout, enjeksiyon, derin ve yüzeysel karıştırma ve kireç ile zemin iyileştirme ve tabakalarda sızdırmazlık sağlama vb.) birçok uygulama çeşidine sahip geoteknik alanının uçucu kül kullanım miktarını arttırmak için ideal olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları

çalışmada etkili ve ekonomik kullanım için uçucu külün fiziksel ve mekanik özelliklerinin daha fazla tanıtılmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Şu ana kadar külün fiziksel ve mekanik (fiziko-mekanik) özellikleri hakkında sınırlı ama giderek artan bilgi mevcuttur. Bu nedenle bu özelliklerin detaylı incelenmesine ve tanıtılmasına ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Lee vd. (1993) F sınıfı uçucu kül-kireç karışımı elastik modülünün, katkısız F sınıfı uçucu kül değerinden yüksek ve plastik deformasyonun ise daha düşük olduğunu göstermişlerdir. F sınıfı uçucu kül-kireç karışımında, uygun dayanım artışı için F sınıfı uçucu kül ve kirecin miktarını doğru ölçmek önemlidir (Lee vd., 1993; Chang vd., 1995). Hâlihazırda, iyileştirmede kullanılan F sınıfı uçucu kül-kireç karışımında kullanmak amacıyla tespit edilmiş sabit bir kireç-uçucu kül yüzdesi yoktur. Bir araştırma zeminin % 15'lik kireç ve ağırlığının 1/3'ü oranında uçucu kül ile iyileştirildiğinde, CBR değerinde % 4'den % 20'ye ve serbest basınç dayanımında 0.3 MPa'dan 0.68 MPa'ya varan bir artışa olanak sağladığını göstermiştir (Misra vd., 2005a).

Misra vd. (2005b) yaptıkları laboratuvar çalışmasında düşük plastisiteli tabii zemin ile değişik uçucu kül/su oranlı karışımlar hazırlamışlar ve bunlara uygulanan dinamik koni penetrasyon direnci (DCP) ile CBR değerleri arasında korelasyonları incelemişlerdir. Sonuçlar önceki araştırmalarda olduğu gibi uçucu külle iyileştirilmiş zeminlerin DCP ve CBR değerleri arasında iyi bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur. Bu korelasyonlarla C sınıfı uçucu kül ile iyileştirilmiş zeminlerin CBR değerini arazide anında belirlemenin mümkün olabileceği öne sürülmüştür.

Cömert vd. (2005a) Orhaneli uçucu külü (UK) ile yaptıkları çalışmada zemin olarak kaolin kili kullanmışlardır. Karışımlarda kireç miktarını (% 5) sabitlemişler, % 5, 10, 15 uçucu kül katarak sıkıştırma deneyleri yapmışlardır. 1, 7 ve 28 gün havada kendi optimum su içeriğini kaybetmeyecek şekilde kürlenmiş numunelere konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli kesme deneyleri (UU) 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncı altında yapılmış ve serbest basınç (SB) deneyleri 28 gün kürlü numunelere yapılmıştır. Kürsüz ve 4 gün suda bekletilmiş numunelere CBR deneyleri yapmışlardır. SB ve UU deneyinde 28 gün kürlenmiş en yüksek

dayanım % 5 kireç ve % 10 UK katkılı numunelerde elde edilmiştir. Dolayısıyla bu tip çalışmalarda SB deneyi ile UU deneyi yakın kayma dayanımı verdiğini göstermişlerdir. Islak CBR neticelerine göre CBR'ı % 25 olan % 5 kireç ve % 5 UK katkılı kilin çok iyi altyapı tabanı olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Leelavathamma vd. (2005) F sınıfı uçucu kül katarak problemlili siyah pamuk zemini ile yaptıkları deneylerle CBR değerlerinin yükseldiğini tespit etmişler, uçucu külün uygulamalarında arazide tam olarak karıştırılmasının güçlüğüne ve uçucu kül kullanımının zeminin dayanım ve depolama problemlerinin giderilmesine katkısının olacağını belirtmişlerdir.

Arora vd. (2005) yaptıkları çalışmada zemin-çimento ve zemin-kireç karışımı kullanılmış yol temel tabakasının F sınıfı uçucu kül ile iyileştirmesi araştırılmış, zemin-katkı karışımları üzerinde serbest basınç, CBR ve esneklik modülü (M_R) deneyleri yapmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre karışımların dayanımı yüksek oranda kür süresi, sıkıştırma enerjisi, çimento ve su içeriğine bağlanmıştır. Zemin-kireç-uçucu kül iyileştirmesinde yol temel tabakası için yeterli dayanım sağlanamamıştır. Çimento ile işlem görmüş karışımların donma-çözünme çevirimleri sonrasında fazla aşınma gözlenmemiştir. Granüler zeminleri, özellikle yol katmanı yapımında doğru modelleme imkânı veren toplu (toplam) gerilme (bulk stress) ölçümü M_R 'nin kuvvetli bir fonksiyonudur. Bu faktörlerin çoğu imal edilecek yol tabaka kalınlıklarına etki eder. Kendinden çimentolanma özelliği olmayan (non self-cementing) F sınıfı uçucu küller zemin iyileştirmede tek başına kullanılamazlar. Çimento, kireç ve uçucu külle hazırlanarak zemine katılan iyileştirme katkısı genellikle puzolanik iyileştirme karışımı olarak adlandırılır. F sınıfı uçucu külle hazırlanan puzolanik iyileştirme karışımlarına reaksiyon başlatmak veya hızlandırmak için kireç veya çimento ilave edilmesi gerekir. Büyük miktarda uçucu kül kullanarak atığı ortadan kaldırma potansiyeli bulunan uçucu kül-zemin karışımıyla iyileştirilmiş çevre dostu yolların dayanım ve durabilitesini hedeflenen seviyeye çıkarmak için yapılacak işlem sadece sıkıştırma (kompaksiyon)'dur (Arora ve Aydilek, 2005).

Cömert vd. (2006) F sınıfı uçucu külü (UK) ve Çimento (Ç) ile yaptıkları çalışmada zemin olarak kaolin kili kullanmışlardır. Karışımlarda % 5 oranında kireç değerini sabit tutarak, % 5, 10, 15 UK veya Ç katarak sıkıştırma deneyleri yapmışlardır. 1, 7 ve 28 gün desikatörde kendi optimum su içeriğini kaybetmeyecek şekilde kürlenmiş numunelere konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli kesme deneyleri (UU) 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncı altında yapılmış ve serbest basınç (SB) deneyleri 28 gün kürlü numunelere uygulanmıştır. Numunelere 28 gün kür süreleri sonunda yapılan SB deneylerinden sonra zemin sınıflama ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. UU ve SB deney sonuçları ile UK ve Ç katkılı zeminler üzerinde yapılacak kayma dayanımı tespiti için SB deneyinin tek başına yeterli olacağını göstermişlerdir.

Cömert vd. (2008) yaptıkları çalışmada, F sınıfı uçucu kül ve çimento ile iyileştirilen zeminlerin CBR yüzdeleri üzerinde, taze ve 28 günlük kür sürelerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada biri şişme eğilimli iki suni zemin kullanılmıştır. Bunlardan biri kil-kireç, diğeri kil-bentonit-kireç karıştırılarak hazırlanmıştır. Farklı yüzdelerde zemin-katkı karışımları hazırlanmış ve sıkıştırma sonunda kür edilmiştir. Karışımlar üzerinde ıslak (dört gün suda bekletildikten sonra) CBR deneyleri yapılmıştır. Bu sonuçlardan taşıma oranları 28 gün kür sonunda ilk gün deneylerine göre, uçucu kütle işlem gören karışımların % 4-160 daha yüksek, çimento ile işlem görmüş matrislerin çoğunda ise % 50'ye varan düşüş belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, puzolanik reaksiyon içeren zemin iyileştirmelerinde, CBR deneyinin 28 gün kür edilmiş örnekler üzerinde yapılmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Yılmaz vd. (2008) yaptıkları çalışmada, C sınıfı uçucu külü farklı oranlarda değişik iki tip kil ile karıştırmış ve bu karışım oranlarının, killerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Uçucu kül katkısının % 10-20 arasında bir oranda olması durumunda dayanım değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Kür süresinin de dayanımı arttırdığı ve mekanik özelliklerde iyileşme sağlandığı saptanmıştır. Sonuç olarak uçucu küllerin zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Fırat ve Cömert (2011) uçucu kül (UK), kireç ve çimento (Ç) katkılarını kaolin kiline katarak yaptıkları çalışmada, kireç oranını % 5 değerinde sabit tutarak karışımlara %

5, 10, 15 uçucu kül veya çimento katarak optimum su içeriğinde sıkıştırılmışlardır. 1, 7 ve 28 gün desikatörde kendi su içeriğini kaybetmeyecek şekilde kürlenmiş numunelere konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli kesme deneyleri (UU), serbest basınç (SB), zemin sınıflama ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Sonuçlara göre uçucu kül ve çimento oranı arttıkça dane dağılımındaki kil azalmakta ve silt oranı artmaktadır. Buda dane çaplarının büyüdüğünü göstermiştir. Ayrıca 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncı altında yapılmış UU ve SB deney neticelerine göre % 15 katkılı karışımlarda deneyin ilk anlarında dayanım hızla yükselmekte, devamında plastiklik özelliğini yitirmiş numune oldukça dik bir kayma açısıyla (90°-80°) ani olarak kırılmaktadır. Yenilmenin ani olması kırılmanın arttığını göstermiştir.

Yarbaşı vd. (2006) yaptıkları çalışmada, katı atık olarak kireç, Antalya Ferro-Krom Fabrikası silis dumanı ve Afşin Elbistan Termik Santrali uçucu külü kullanılarak iki granüler zemin iyileştirmişlerdir. Kürlenme, numuneler 28 gün suda bekletilerek yapılmıştır. Katkılı zeminlerin serbest basınç (SB) dayanımları katkı türüne, kür süresine ve donma-çözülme sonrasına göre incelemiştir. En yüksek SB dayanımları 28 gün kürlü % 15 katkı numunelerde olmak üzere en yüksek dayanım % 15 silis dumanı katılmış numunelerde elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, donma-çözülme çevrimleri iyileştirilmiş örneklerde etkili olduğu ve basınç mukavemeti değerlerinin % 2-10 oranında düşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Silis dumanı-kireç ve uçucu kül-kireç karışımlarının granüler zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Alkaya vd. (2006) yaptıkları çalışmada uçucu kül ile iyileştirme koşullarının ilişkisi araştırılmıştır. Sağlanan iyileşmede kür sürelerinin etkisi incelenerek uygun karışım oranları belirlenmiştir. Farklı oranlardaki uçucu kül katkısının, zeminin geoteknik özellikleri olan kıvam limitleri, sıkıştırma (kompaksiyon), serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Killi zemine % 15-20 oranlarındaki uçucu kül katkı miktarı ile kil zeminlerin özelliklerinde belirgin bir iyileşme olduğu görülmüştür. Uçucu kül katkısı ile oluşan mukavemet artışının yetersiz olması durumunda ilave kireç veya çimento katkısı ile istenen mukavemete ulaşılabilmesinin mümkün olduğu belirtilmiştir.

Pulverize uçucu kül kullanarak jet grout uygulamasında kullanılabilir sulu harç (enjeksiyon harcı) üretmek amacı ile yapılan bir çalışmada granülometrisi $D_{15} = 1.3 \mu\text{m}$, $D_{50} = 6 \mu\text{m}$, ve $D_{85} = 20 \mu\text{m}$ olarak ayarlanmış ve Blaine özgül yüzeyi (Sw) yaklaşık $8300 \text{ cm}^2/\text{g}$ ölçülmüş kül kullanılmıştır. Süspansiyon halindeki kül, ilave katkıyla kuvvetlendirilmiş, normal ve çok ince çimentoyla karıştırılabilir hale getirilmiştir. Süspansiyonlar temiz kum zemin içine enjekte edilmiştir. Jet grout ile güçlendirilmiş zeminlere permeabilite, üçeksenli UU ve konsolidasyonlu drenajsız (CU) deneyleri uygulanmıştır. Permeabilite katsayısı $3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 'den $3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 'ye düşmüştür. Güçlendirilen kum Mor-Clomb yenilme kriteri doğrultusunda beklediği gibi davranmış ve 290 den 450 kPa'ya yükselmiş kayma açısı temiz kumunkinden 5° daha büyük ölçülmüştür (Markou vd., 2002).

Edil vd. (2003) Uçucu külleri belirli oranlarda çimento ile karıştırarak, alt temel zemininin iyileştirmesini araştırmışlardır. Laboratuvar çalışmalarında 3 farklı uçucu kül kullanılmıştır. Numuneler değişik yüzdelerde uçucu kül kullanarak hazırlanmış bu karışımlar üzerinde CBR, M_R ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. İlk başta düşük CBR değerlerine sahip olan zemin uçucu kül katkısı ile yüksek değerlere ulaşmıştır. Sonuç olarak uçucu kül kullanımının maliyeti düşürdüğü ve dayanımı arttırdığı belirlenmiştir.

Baykal vd. (2006) çalışmalarında uçucu kül danelerinin silt boyutunda olması sebebiyle, uçucu külün sıkıştırılması (kompaksiyon) sırasında su içeriğindeki küçük değişikliklere aşırı hassasiyet gösterdiğini bulmuşlardır. Bu çalışma kapsamında geliştirdikleri yeni bir yöntemle, sıkıştırma sırasında kullanılan suyun katı fazda (kar halinde) olması durumunda, katı durumdaki suyun gerekenden daha fazla miktarlarda katılabildiğini ortaya koymuşlardır. Bu uçucu külün hidrasyon ısısını düşürmüş ve reaksiyon süresini arttırmıştır. Böylece çimento minerallerinin daha kolay büyüebileceği bir ortam oluşturulmaktadır. SB deneyi ile kırılan numunelerin, ESEM (Atmosfer basıncı kontrollü taramalı elektron mikroskobu) ve XRD cihazları ile mikro yapı ve kompozisyonları incelenmiş, mikro yapıdaki değişiklikler ile mühendislik özelliklerindeki değişimler açıklanmıştır. Karla sıkıştırılan numunelerde, suyla sıkıştırılanlarda gözlenen tomasit minerali yerine, daha yüksek atomik su içeren etrenjit (etringit) minerali saptanmıştır.

İkizler vd. (2008) yaptıkları çalışmada, bentonitin içerisine farklı oranlarda karıştırılan çimento, uçucu kül ve kumun dane çapı dağılımları, Atterberg limitleri ve şişme basınçlarını belirleyerek katkı oranlarının bu özellikler üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir. Bentonitin şişme basınç değeri bütün katkı oranları için, katkı oranının artması ile azalmaktadır. Uçucu kül oranı % 15'e çıktığında şişme basıncı değerinde gözle görülür bir azalma olmaktadır. % 20 kum katkısı bentonitin şişme basıncında fazla bir azalmaya neden olmamaktadır. % 40 kum katkısının şişme basıncında % 55'lik azalma sağladığını ve uygulama zorluğu nedeniyle % 60 ve % 80 kum katkısına göre daha etkili bir iyileştirme sağlayacağı bildirilmiştir.

Şenol ve Gümüşer (2009) Kangal termik santrali atığı olan C sınıfı uçucu kül ve polipropilen elyaflarla zemin iyileştirilmesi durumunda Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)'nın değişimi izlenmiştir. Kullanılan zemin örneğine sınıflandırma deneyleri yapılarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiş ve uçucu kül-zemin-polipropilen elyaf çeşitli karışım serilerinde hazırlanarak standart sıkıştırma deneyi ile belirlenen optimum su içeriğinde sıkıştırılmış örneklerde CBR değerleri tespit edilmiştir. Çalışmada yumuşak zemin, C sınıfı uçucu kül ve iki tip polipropilen elyaf kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarından yumuşak zeminlerin direncinin arttığı ve geoteknik parametrelerinde gelişme olduğu gözlenmiştir.

Çetin vd. (2010) düşük yol dayanımı veren iki farklı zemine yüksek karbonlu uçucu kül karıştırılarak SB, CBR ve M_R deneyleri yapmışlardır. Reaktif (kendi başına çimentolanma özelliği) olmayan yüksek karbonlu uçucu kül diğer bir atık olan kireç klinker tozu ile karıştırıp reaktif hale getirilmiştir. Farklı kür süreleri uygulanarak iyileştirilmiştir. Zemin-katkı karışımları kürlenmeden, 7 ve 28 gün kürendikten sonra serbest basınç dayanımı, taşıma gücünü tespit için CBR ve M_R tespit için dinamik üçeksenli deneyleri yapılmıştır. Yüksek karbonlu uçucu kül oranı arttıkça dayanımın ve M_R 'nin azaldığı görülmüştür. Kireç klinker tozu arttıkça serbest basınç dayanımı ve M_R 'nin arttığı gözlenmiştir. Karışımlardaki karbon miktarı CBR'ı arttırmakla birlikte kireç/silikat (CaO/SiO_2) ve kireç/silikat-alüminat ($CaO/(SiO_2+Al_2O_3)$) oranlarıyla M_R arasında korelasyon bulunmamıştır. İlâveten donma-çözünme koşullarında kireç klinker tozu kireç klinker tozu kireç klinker tozu kireç klinker tozu ve yüksek karbonlu uçucu kül katkılı kaplamasız yol

malzemelerinin M_R deęerlerini en az % 30 dūřurdūęu (plastisitesini kaybettięi) tespit edilmiřtir.

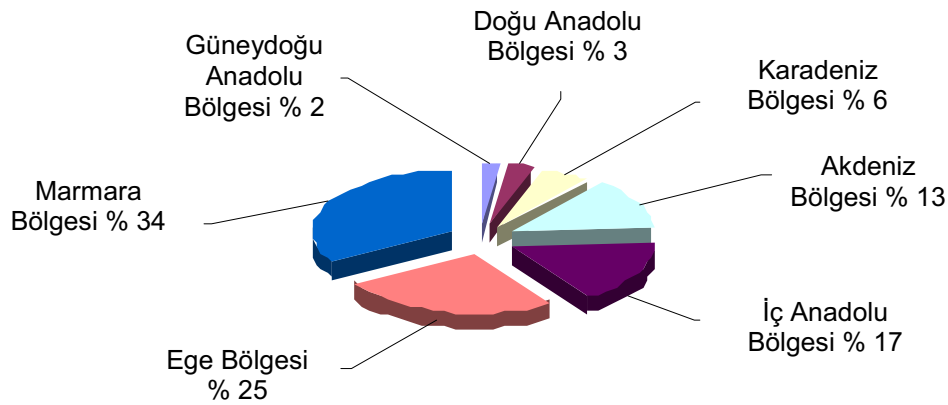
Yurdumuzda uęucu kūl, geęmiřte maliyetlerin yūksek oluřu nedeniyle katkı olarak çok kullanılamamıřtır. Gūnūmūzde tařıma ve ayrıřtırma maliyeti azalmıř, imento ve beton ūretiminde uęucu kūl tūketim miktarları artmaktadır. Yapılan çalıřmalarda gōrūldūęu gibi geoteknik mūhendislięi uęucu kūlūn birçok yōntemle zemine, zemin iyileřtirme katkısı olarak katılabileceęi uygulamalara sahiptir. Birçok bōlgemizde termik santrallerin olması tařıma maliyetlerini azalmakta, teknolojik geliřmeler uęucu kūl ayrıřtırmayı kolaylařtırmaktadır, buda ūlkemizdeki uęucu kūle talebi artmaktadır. Arařtırmacılar geoteknik alanının uęucu kūl kullanım miktarını arttırmada būyūk geliřme vaat ettięini çalıřmalarıyla gōstermektedirler. Ancak potansiyelin būyūk olduęu zemin iyileřtirilme alanında beklenen olmamıřtır. Tūrkiye hızla geliřen ve būyūyen bir ekonomiye sahiptir. Yerli kaynaklı enerjinin būyūmeye katkısı daha fazla olacaktır. Yurdumuz birçok bōlgesinde termik santral bulunmaktadır. Enerji ihtiyacının artması nedeniyle yenilerinin kurulması planlanmaktadır. Enerji ihtiyacına baęlı olarak yakılan kōmūr ve ūretilen atık miktarını artması kaçınılmaz gōrūnmektedir. Dolayısıyla daha fazla uęucu kūl tūketmek için mevcut uygulamalardaki kullanım miktarının arttırılmasına ihtiyaç vardır.

2.3. Mermer Tozu

Kireçtaşı veya dolomitlerin genel ya da yerel başkalaşıma uğraması sonucu oluşan mermer, yeryuvarlağının değişik yerlerinde bulunabilen ağır ve sert bir kayadır. Jeolojide ilksel kayac gurubunda bulunan mermerin damarlı yapısı ve rengi, içerdiği zengin metal oksitlere ve kil dūzeyine bağlıdır. Mermer ve mermerli taşlarda uzmanların benimsediği sınıflama bejler, beyazlar, maviler, siyah fonlular, pembe fonlular, gri siyahlar, sarılar, kırmızılar, yeşiller, morlar gibi baskın tonları şeklinindedir. Renklerin esas alındığı sınıflandırma dekoratōrlerin seçimini de kolaylaştırmak amaçlıdır.

Ülkemiz mermer kaynakları bakımından zengin bir potansiyele sahiptir. Mermerler, kristal boyutu, mineralojik bileşimi, rengi ve kökenine göre sınıflanabilir. Ancak, blok alma olanağı sağlayan, kesilebilen ve cilalanabilen her türlü kayacın ticari anlamda mermer olarak kabul edildiği göz önüne alınmalıdır. Mermer olarak kullanılabilir niteliklerdeki kayaç oluşumları ülkemizin pek çok yerinde bulunmaktadır.

Maden Tetkik Arama Enstitüsü (MTA) raporuna göre Türkiye 5 milyar metreküp mermer rezervine sahiptir ve bilinen mermer sahalarının da % 92'sinin işletmeye alınmadığı belirtilmektedir. Bu miktar dünya potansiyelinin % 40'ına karşılık gelmektedir. Bu raporda, Afyon'un Türkiye'deki rezervde % 12 payı olduğu belirtilmiştir. Bir metreküplük bir mermer bloğun (yaklaşık 3 ton ağırlığında) işlenmesi sırasında açığa çıkan toz miktarı, bloktan elde edilecek plaka kalınlığına da bağlı olarak, blok ağırlığının % 30-40'ı kadardır. Afyon bölgesindeki işletmelerde mermer blok ve plakalarının kesilmesi ve parlatılması sırasında ortaya çıkan mermer tozu miktarı yılda yaklaşık 150.000 ton civarında olduğunu hesaplamıştır (Ersoy, 2003).



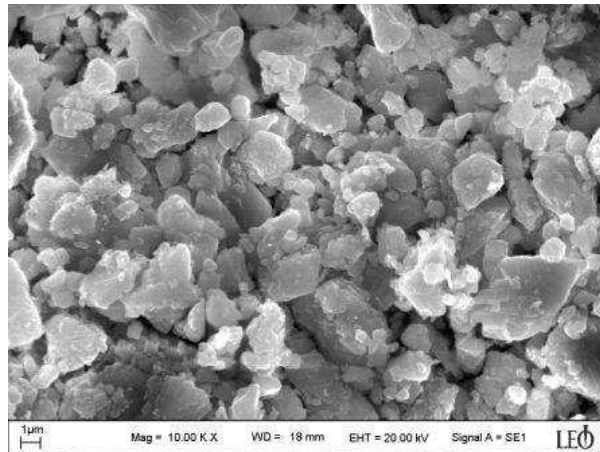
Şekil 2.6. Önemli mermer ve doğaltaş yataklarının bölgelere göre dağılımı (Ersoy, 2010)

Bölgelere göre ülkemizin önemli mermer ve doğaltaş yatakları dağılımı Şekil 2.6'da verilmiştir. Türkiye doğal taş sektörü, 1000 Ocak, 1500 fabrika, 7500 atölyede toplam 250 000 kişilik istihdamıyla dünyada yaklaşık 150 ülkeye doğal taş (mermer, traverten ve granit ürünleri) ihraç eden ve ülke ekonomisine ortalama 1.2 milyar dolarlık katma değer sağlayan bir sektördür. Mermer, doğal taş ve teknolojileri

(doğal taş işleme makine ve sarf malzemeleri) ihracatı toplam maden ihracatımızın yaklaşık % 60'ını tek başına gerçekleştirmektedir. Mermer sektörü kendi hammaddemizi işleyen dışa bağımsız bir sektör olduğu için kazanılan dövizin tamamının yurtiçinde kalması bakımından önemlidir. Dünya doğaltaş pazarı yıllık yaklaşık 60 milyon ton olup doğaltaş kullanımının 2025 yılına kadar yıllık 300 milyon tonu bulacağı tahmin edilmektedir (Ersoy, 2010).

1992 yılı itibariyle dünyanın toplam takribi 14 milyon tonluk mermer üretiminde ilk sırayı 4.8 milyon ton ve % 33'lük payla İtalya, ikinci sırayı 2 milyon ton ve % 14'lük payla İspanya almaktadır. Türkiye ise 650.000 ton ve % 5.6'lık payla dünyada sekizinci sırada, Avrupa'da İtalya, İspanya ve Portekiz'den sonra dördüncü sırada yer almaktadır. Mermer blaokları işleme süreci plakalar halinde kesme, yıkama, silme, cilalama ve plaka güçlendirme gibi diğer aşamalarından oluşur. Son zamanlarda beton içinde alternatif bir dolgu olarak ta kullanılan mermer fabrikalarının yan ürünü mermer tozu katrik ile kesme, biçme, şekillendirme, parlatma işlemleri ile oluşur. Bu sırasında mermer bloğun bir kısmı toz ya da pudra haline dönüşür (Çelik ve Sabah, 2008).

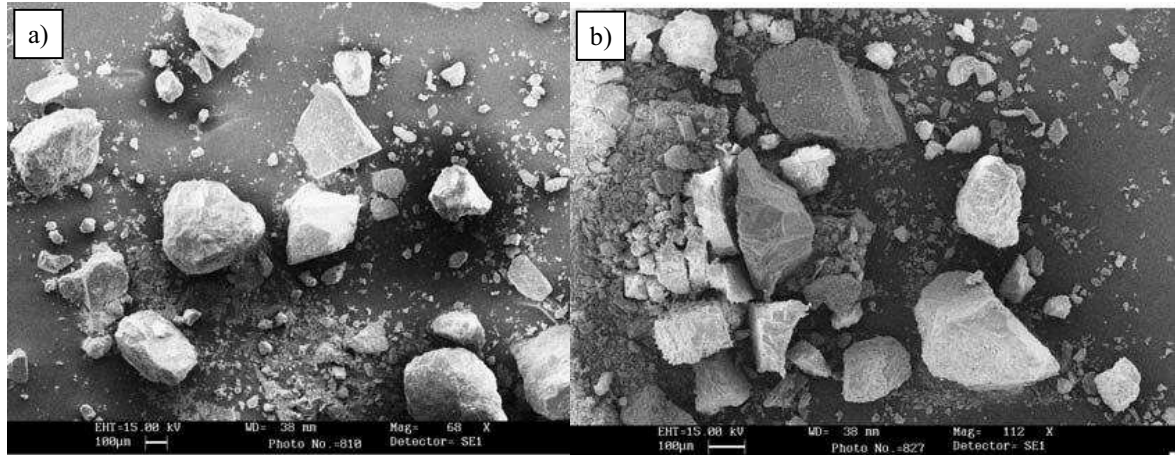
Mermer tozu 1 mm den küçük daneli ve kalker orijinli bir atık malzemedir. Türkiye'de yıllık olarak ortaya çıkan ve depo alanlarında toplanan mermer tozu atık miktarı 1.000.000 tondur (Topçu vd., 2009).



Şekil 2.7. 1-5 μm arasında değişen mermer tozu danecikleri (x10000) (Alyamaç ve İnce, 2010)

Kavaklı'ya (2003) göre dünyadaki uygulamalardan mermer tozu ve mermer atık sularının seramik, çimento, boya, cam ve yapı malzemesi gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu değerlendirilme olanakları yurdumuzda da arttırılmalıdır. Mermer tozu, fabrikalarda mermer bloklarını keserken kullanılan sudan flokülasyonla çökeltilen ince maddedir (Şekil 2.7).

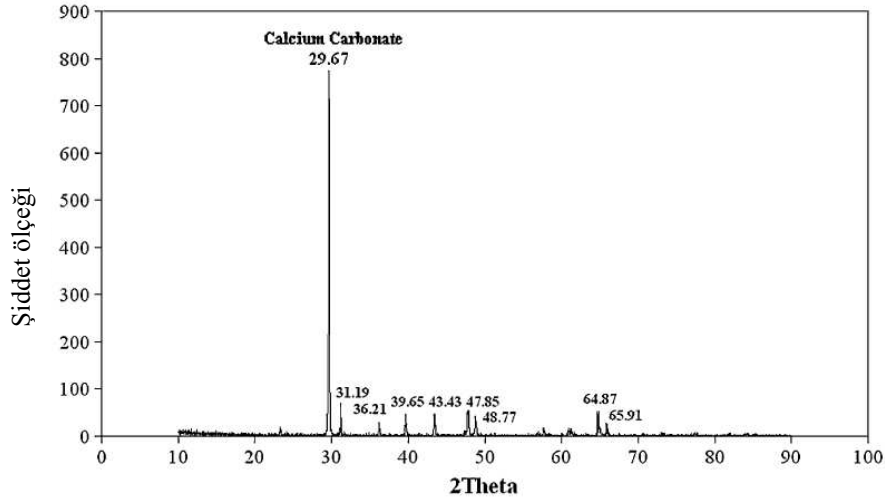
Mermer tozunun portland kompoze çimento üretimi esnasında belirli sınırlara kadar kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. Yapılan bir çalışmada kompoze portland çimentosuna % 3, 6, 9 oranlarında mermer tozu katılmıştır. Bu karışımlar 7. ve 28. gün sonunda basınç deneyine tabi tutulmuş ve dayanımları ölçülmüştür. Basınç gerilmeleri bütün numunelerde standardın üzerinde elde edilmiştir. Çimento imalatında standarda göre kalker kullanımı öngörülmektedir. Ancak, bu standartlarda çimento üretiminde kullanılacak kalkerin içerisindeki kalsiyum karbonat (CaCO_3) miktarı % 75 olarak tanımlanmaktadır. Mermer atıkların CaCO_3 miktarı % 75 in üzerindedir. Dolayısıyla çimento üretiminde kalker yerine mermer atıklarının kullanımı uygundur (Kavas vd., 2001).



Şekil 2.8. 1-300 µm dane çaplı a) Yuvarlak ve kısmen köşeli b) Keskin köşeli mermer tozu danecikleri (x1000) (Güneyisi vd., 2009)

Tipik bir mermer tozu ile yapılan başka bir çalışmada taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınmış bir mermer tozu görüntüsü Şekil 2.8'de verilmiş, burada 1-300 µm büyüklüğündeki mermer tozu danelerinin yuvarlak (Şekil 2.8a) ve genellikle keskin (Şekil 2.8b) köşeli şekillere sahip olduğu gözlenmektedir. Aynı çalışmada Şekil

2.9’da tipik mermer tozunun X-ışınları difraktogramından temel bileşenin kalsit olduğu görülmektedir (Güneyisi vd., 2009).



Şekil 2.9. Mermer tozu tipik XRD difraktogramı (Güneyisi vd., 2009)

Okagbue vd. (1999) yol inşasında kırmızı tropik zeminleri iyileştirmek amacıyla mermer tozu kullanmışlardır. Belirli oranlarda katılan mermer tozu ile elde edilen karışımların dane boyutu analizi, özgül ağırlık, kıvam limitleri, sıkıştırma (kompaksiyon) karakteristikleri, serbest basınç direnci ve CBR oranları belirlenmiştir. Buna ek olarak 28 gün sonrasında dayanım deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda mermer tozu katkısı tropik zeminin plastisitesi % 20-33 oranında azaltılmıştır. Serbest basınç dayanımı ve CBR değeri % 30-46 ve % 27-55 oranında artmıştır. En yüksek CBR değeri % 8 mermer tozu katkısıyla elde edilmiştir. 28 günlük kür sonucunda malzemenin dayanımı % 80 artmıştır. Bu sonuçlara bağlı olarak mermer tozunun hafif trafik hacmine sahip olan yollarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Sabah vd. (2001) mermer ocak ve işletmesinden çıkan mermer parçası ve tozların ‘atık’ değil hammadde özelliği taşıyan ‘artık’ olduklarına dikkat çekilmiş, bunların toplam üretimin % 40-60’ını oluşturduğu belirtilmiştir. İscehisar (Afyon) mermer atıkları üzerine yapılan bu araştırmada mermer tozunun tamamı 1.0 mm’lik elekten geçtiği kalsiyum karbonat (CaCO_3) oranı % 92.35, nem miktarı % 0.11, hidroklorik asit (HCl)’te çözünmeyen kül % 3, magnezyum (Mg) % 0.18, demir (Fe) % 0.03, kurşun (Pb) % 0.005’den az ve arsenik (As) % 0.008’den az olarak bulunmuştur.

Mermer kimyasal bileşimi ile kirece benzerlik göstermesi ve mermer tozu danelerinin 0.2 mm ve daha küçük olması nedeniyle, ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde mermer tozu kullanılabilceği fikri üzerine Zorluer vd. (2001), araştırmalarında Meşelik (Afyon) kiline mermer tozu katmışlar, kilin şişme potansiyelini düşürdüğünü göstermişler böylece zemin iyileştirmede mermer tozu kullanılabilceği sonucuna varmışlardır.

Sabat vd. (2005) şişen bir zemine uçucu kül ve mermer tozu atıklarından değişen oranlı karışımlar ilave etmişlerdir. Zemin-katkı karışımlarının likit limit, optimum su içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlığı, ıslak ve yaş CBR, serbest basınç ve şişme basıncı gibi geoteknik değerlerini tespit etmişlerdir. Karışımlarda uçucu kül-mermer tozu katkı oranı artışıyla kuru birim hacim ağırlığının ve şişme basıncının azaldığını, % 20 uçucu kül ve mermer tozunun tüm oranlarında CBR ve serbest basınç dayanımında en yüksek değerlerin elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Akbulut vd. (2006) yaptıkları çalışma sonuçları mermerden üretilen agregaların mekanik özelliklerinin ve asfalt karışımdaki iyileştirilme ve akma değerlerinin sınır şartlar içinde kaldığını ve bu malzemelerin orta ve düşük trafik hacimli asfalt kaplamaların binder tabakalarında agrega olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Sarkar vd. (2006) çalışmalarında, mermer işleme tesislerinde ortaya çıkan (maksimum dane çapı 200 µm) toz atığı yüksek basınçlı (0.5-1.2 MPa) buhar altında 900° ve 1000°C gibi iki farklı sıcaklıkta bünyedeki bağıl su, CO₂ veya diğer gazların uzaklaştırılmışlar (kalsine uygulamışlar)'dır. Bunları çeşitli oranlarda kil-kuvars karışımına katarak etkilerini araştırmışlardır. Kalsine mermer tozunun ekonomik açıdan doğal kireç taşından üretilen kirece (CaO) alternatif kaynak olabileceğini ve mermer tozu gibi kalsit (CaCO₃) içeren, kirece kıyasla büyük birim yüzey alanlı malzemelerin hidrotermal iyileştirme etkisine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kalsine edilmeden önceki haline kıyasla daha düşük birim hacim ağırlıklı ve yüksek gözeneklilik özelliği nedeniyle binalarda nem ve sıcaklık kontrolü amaçlı yeni yapı malzemelerinde kullanılabilceği belirtilmiştir.

Taşpolat vd. (2006) atık depolama tabakalarında kullanılan Afyon mermer tozlarının donma ve çözülme özelliğine etkisini araştırmışlardır. Kil tabakası olarak % 10 bentonit + % 90 kaolin karışımı kullanmışlardır. Bu kil karışımı üzerine % 5, 10 ve 15 oranında mermer tozu ilave etmişlerdir. Elde edilen bu karışımlar üzerinde donma-çözünme deneyi yapılarak, % 10 ve % 15'lik mermer tozu ilave edilen karışımların kayıp miktarında sırasıyla % 13.5 ve % 12.5 azalma gözlemlenmişler, ayrıca kil tabakalarda çevresel şartlara karşı % 10 ve % 15 mermer tozu ilavesinin mukavemeti arttırdığını belirtmişlerdir.

Çimen vd. (2010) yaptıkları çalışmada yüksek plastisiteli kile No.40 elek altı mermer tozu ilave edilmesi ile likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri % 20 mermer tozu ilavesine kadar azaldığını göstermişlerdir. % 20'nin üzerindeki mermer tozu ilavelerinin likit limitte artma meydana getirdiğini ve bu artmanın plastisite indisinin artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Mermer tozu miktarının artmasıyla kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığının arttığını, optimum su içeriğinin azaldığı ve serbest basınç direncinin % 5'lik mermer tozu ilavesine kadar arttığını, daha yüksek oranlarda ise azaldığını göstermişlerdir.

Başer vd. (2010) yaptıkları çalışmada laboratuvarında kaolin ve bentonit kullanılarak şişen bir zemin hazırlamışlardır. Kireçtaşı tozu atığı ve mermer tozu atığı şişen zemine % 0 - % 30 arasında değişen oranda eklemişlerdir. Numuneler üzerinde dane dağılımı, kıvam limitleri, kimyasal ve mineralojik bileşim, şişme yüzdesi ve şişme hızı deneyleri yapmışlardır. Katkı yüzdesinin artmasıyla şişme yüzdesi düşmüş ve şişme hızının arttığı bildirilmiştir. Ayrıca, kürün şişme üzerindeki etkisini görebilmek için şişme deneylerinden önce numunelere 7 günlük ve 28 günlük kür uygulamışlardır. Kürün numunelerin şişme yüzdesinin düşmesine ve şişme hızının artmasına olumlu yönde katkısı olduğunu göstermişlerdir.

Hindistan'ın, mermer fabrikalarının % 95'ini barındıran Rajasthan bölgesi mermer yatakları bakımından en zengin bölgedir. Ülkenin 4000 mermer ocağı ve 1100 fabrikası, yöredeki 16 bölgeye dağılmıştır. Burada çok büyük miktarlarda mermer çamuru üretilmektedir. Başlıklar altında toplamak gerekirse mermer atıkları;

- Rastgele araziye, doğaya atılması,
- Kurduğunda hava, su etkileriyle dağılması,
- Sağlık sorunlarına sebep oluşu,
- Yağmur mevsiminde dağılmasının engellenememesi,
- İçerdiği kirecin uzun süre vahşi depolandığında yer altı sularına sızıp tıkararak su rejimine (havzasına) zarar vermesi sorunlarını oluşturmaktadır.

Bu tespitlerinden sonra Misra vd. (2008) atıkların zararsız hale getirilmesi için çeşitli kullanım imkânları üzerine çalışmışlar boya, kâğıt, gübre, hayvan yemi üretimine kadar birçok yerde kullanmak gibi çözümler tavsiye etmişlerdir. Mermer tozu bunların dışında klinkere ilave ederek çimento üretiminde, beton harcına katarak ve zemin iyileştirmesinde kullanılabilir. Birçok yöntem yanında bu son üçünün en fazla kullanımı sağlayacak alanlar olduğu bildirilmiştir.

Mermer tozu dünyada ekonomik değeri yüksek işlenmiş mermerin üretimi sırasında ortaya çıkan ve hacmi büyük rakamlara ulaşan, bu nedenle değerlendirilmesi gereken bir atıktır. Araştırmaların çok az olmasına rağmen çalışmalardan elde edilen sonuçlara bakarak mermer tozu ile zemin iyileştirmesi kullanım potansiyeli yüksek ve çevre açısından gelecek vadeden bir yöntemdir. Bu yöntemin yol altyapısındaki zeminde kullanımı yeniden dönüşümün sürekli ve neredeyse üretim kadar olmasında da etkili olacaktır.

2.4. Endüstriyel Atık Kum

Endüstriyel atık kum, cam hammaddesi olarak kullanılan kalker tozundan ayrılan atık kısmıdır. Kalker taşı 500 mikrona kadar öğütülür ve cam üretiminde hammaddelerden biri olarak kullanılır. Öğütülmüş bu tozda 106 mikrondan küçük çaplı danelerin en fazla % 5 oranında bulunması istenir. Camiş A.Ş. cevher işleme tesisinde 106 mikron altına geçen danelerden oluşan kuma Standart Dışı Kum adı verilmektedir. Önceki çalışmaların taranmasında bu malzeme ile yapılmış bir çalışmaya rastlanmamış ancak buna benzeyen taşocağı tozu, kalker taşı tozu ve kaya tozu gibi malzemelerle yapılmış az sayıda iyileştirme çalışması mevcuttur.

Kunes vd. (1983) Kalıp endüstrisinde kullanılan kalıp kumunun atık haline geldikten sonra yapı sektöründe yol dolgu ve kaplama malzemesi olarak değerlendirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Birçok numune üzerinde dane çapı dağılımı, sıkıştırma, geçirgenlik deneyleri yapmışlar, geri dönüşümün sağlanması halinde elde edilecek ekonomik faydayı araştırmışlardır. Deney metotları hakkında çok az detay vermişler fakat sıkıştırılmış kalıp kumu geçirgenlik katsayılarını 1.3×10^{-6} ile 6.1×10^{-6} cm/s aralığında tespit etmişlerdir.

Kleven vd. (1998) kalıp kumunun yol alt yapısında kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla Wisconsin-Madison üniversitesinde laboratuvar çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada 12 farklı kalıp kumu numunesi kullanılmış, bu numunelerin plastisite indisi, non-plastik ile 11 arasında değişmiştir. Yine Kleven vd. (1998) kalıp kumunun düşük plastisiteli ve AASHTO Sınıflandırma sistemine göre A-2-4 ya da A-3 sınıfına girdiğini belirlemişlerdir. Bunun dışında kalıp kumunun mekanik özelliklerinin de yol alt yapısına uygunluğunu deneylerle belirlemişlerdir. Bu amaçla CBR ve M_R deneylerini yapmışlar, yapılan deneyler sonucunda yüksek su muhtevasında kalıp kumunun düşük dayanım gösterdiği, bu nedenle kalıp kumunun optimum su içeriğinin altında sıkıştırılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Abichou vd. (1999) Kalıp kumu atıklarının yeniden kullanımı üzerinde çalışmışlardır. Kalıp kumunun büyük hacimlerde tekrar değerlendirilmesi amacıyla, dolgu malzemesi, karayolu dolgu malzemesi ve alt temel malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bunun dışında, kalıp kumunun portland çimentosunda ve asfalt betonunda kullanımı, çöp depolama alanlarında ayraç malzemesi olarak kullanımı da araştırılmıştır.

Abichou vd. (2000) Kalıp kumu atıklarının yeniden kullanımı üzerinde yaptıkları bir başka çalışma ile hidrolik bariyer katmanlarında 12 değişik kalıp kumu araştırılmış, indeks özellikleri, bentonit içeriği, sıkışma parametreleri ve bunlarla permeabilite arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Donma-çözülme ve ıslanma-kuruma döngüleriyle geçirgenlik direncinin etkileşimi araştırılmıştır. Kalıp kumu ile normal killerin sıkışma özelliklerinin aynı olduğu tespit edilmiştir.

Soosan vd. (2005) biri kırmızı ve ikisi ince daneli (kaolin ve deniz çökeli) üç zemine kattıkları taş ocağı tozunun etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar zeminlere katılan toz miktarının artmasıyla sıkıştırma ve CBR özelliklerinin iyileştiğini göstermiştir. Zeminlerde olduğu gibi deniz çökeli gibi sorunlu zeminlere de taş ocağı tozu katılarak mühendislik özelliklerinin iyileştiğini tespit etmişlerdir. Çalışma toz ilavesi ile karışımlarda likit limit ve plastisitenin azaldığını, maksimum kuru birim hacim ağırlığın arttığını, optimum su içeriğinin azaldığını, kuru ve yaş CBR yüzdesinin arttığını göstermiştir.

Sridharan vd. (2006) yaptıkları çalışmaya göre, ince taneli ve plastik olmayan (non-plastic) taş ocağı tozunun (TOT) sıkıştırılmış kayma açısı doğal kumdan bir miktar yüksektir. Buda potansiyel olarak, konkasör ürünü olan TOT atığının çok zayıf malzemeye katılarak yol alttemel ve dolgu katmanlarında, yaslanma duvarı dolguları ve benzeri yerlerde kullanılabilceğini göstermektedir. Kuma ikame olarak umut verici bir malzeme olduğu ispatlanmış TOT'un avantajlarıyla inşaat yapılarında kullanılan zeminlerin iyileştirmesinde kullanılabilceği görülmüştür. % 60 TOT ilavesinin zeminin kuru birim hacim ağırlığında ve optimum su içeriğinde ortalama olarak sırasıyla % 21 artma ve % 39 azalmaya sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Bunların da inşaatın yapıldığı bölgedeki yerel zeminin atıkla iyileştirerek dolguda veya yol altyapısında kullanılmasına yardım edeceği belirtilmiştir.

Saghafi vd. (2008) toz atıkların granüler yol malzemesine büyük miktarda katılması durumunda malzemenin özgül yüzey ve su ihtiyacı arttırması, yük altında bu danelerin birbiri üzerinden kaymasını kolaylaştırmakta olduğunu ve dayanımı düşürdüğünü, kayma açısının azalmasıyla karışım iyileştirilmesinin azalacağını belirtmişlerdir. Benzeri şekilde, Thom vd. (1987) yüksek miktarda atık toz ilavesinin yol malzemelerinin mekanik özellikleri kötüleştirdiği gibi yüksek miktarda kalker tozu ilavesinde de yol temel tabakasında dayanım azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu araştırmacılar yaptıkları deneylerdeki, kalker tozu katılmış granüler zeminlere sönmüş kireç katılınca meydana gelen dayanım artışının kalker tozunun sönmüş kireç ile bir reaksiyon oluşması nedeniyle olduğunu tahmin etmişlerdir. Bu fikir üzerine Saghafi vd. (2008) granüler ve killi granüler iki yol temel ve alttemel malzemelerine farklı oranlı kalker tozu, uçucu kül ve kalsine kireç

karışımı katarak M_R deneyleri yapmışlardır. Esneklik modülünün % 20 kalker tozu, % 4-9 uçucu kül ve % 2 kalsine kireç katılan zeminde % 420 arttığını tespit etmişlerdir.

Saghafi vd. (2009) yol temel tabakası olarak kullanılabilir dane çapı dağılımına sahip bir granüler malzemeye % 10, 20, 30 oranında kalker tozu katılmış ve optimum su içeriği (w_{opt}) üzerinde (% +1) ve altında (% -2 ve -1) ile sıkıştırılmış numunelere M_R deneyleri uygulanmıştır. Deneyler hemen ve 7 ay bekletildikten sonra yapılmıştır. Deney neticelerine göre uzun süre beklemiş % 10 katkılı ve w_{opt} % -1 karışımların M_R değerinde çok büyük artışlar gözlenmiştir. Bunun sebebinin kalker tozunun içerdiği sönmüş kireç olabileceği belirtilmiştir. 7 ay sonunda karışımların hazırlandığı optimum su içerik yüzdelerinin altında veya üzerinde oluşunun M_R değerlerinde daha önemli farklar yarattığına işaret edilmiştir.

Saghafi vd. (2010) yol granüler temel malzemesine farklı oranda kalker tozu uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ilave edilen karışımlara hemen, 3, 7, 14 ve 28 gün sonra M_R deneyleri yapmışlardır. Çalışmanın ikinci yarısında % 20 kalker tozu, % 5 uçucu kül ve % 5 termik santral yanma dumanından filtre edilerek elde edilen % 25 kireç tarzı maddelerden oluşan zararlı bir toz atık olan hava temizleme birikintisi ilaveli karışımlarda en yüksek M_R dayanımları elde edilmiştir. Hava temizleme birikintisinin, uçucu külü kireçten daha fazla aktifleştirdiği belirtilmiştir.

Mühendislik özellikleri zayıf olan zemine katılarak yapılan iyileştirmelerde kullanılabilen maden ve ocak tozu gibi miktarı fazla kumlu-silt atıklar yol altyapısında kullanılarak ekonomiye katkı ve atığın tarım alanı gibi faydalı alanları kaplamasının önlenmesi ile de çevreye zararsız hale getirilmesi sağlanmış olur.

BÖLÜM 3. MATERYAL ve METOT

Katı atıkların yol dolgusu iyileştirmesinde (stabilizasyonda) kullanılabilirliğinin araştırılması için bu çalışmada Bilecik bölgesinden iki farklı zemin ile Bilecik ilinden mermer tozu ve endüstriyel atık kum, Nallıhan ilçesinden uçucu kül olmak üzere üç farklı atık malzeme kullanılmıştır.

Malzemelere ait numuneler bir seri malzeme hazırlama işleminden geçirildikten sonra harmanlanıp Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksekokulu İnşaat Laboratuvarında saklanmıştır. Deneylein hepsi bu numunelerle yapılmış ve numuneler her deneyden önce 110 ± 10 °C’lik etüvde en az 24 saat bekletilip kuru halde kullanılmıştır.

3.1. Zemin Numuneler

Bu çalışmada iyileştirmesi yapılacak zemin malzemesi Bozüyük-Mekece karayolu inşaatından alınmıştır. 85 kilometrelik yol inşaatında aktif kullanılan depolardaki zeminlerden, yol üst yapı tabanı (dolgu) malzemesi olarak kullanılan birçok zemin numunesi alınmıştır. Zeminlere başta zemin özgül ağırlık, dane çapı dağılımı, kıvam limitleri gibi sınıflandırma ve CBR deneyleri uygulanmıştır. Bunların sonuçları değerlendirilerek çalışmada kullanılmak üzere iki zemin seçilmiştir. Alınma yerleri, renkleri ve bu çalışmadaki kodları gibi özellikleri Tablo 3.1’de verilen, “T” zemini Bozüyük’ten, kırmızı renkli “K” zemini Osmaneli’den alınmıştır. Seçilen zeminler Tablo 3.1’de belirtilen yerden çuvallarla TS 1901/1975’e göre örselenmiş numune alma yöntemiyle alınmıştır. Zemin numuneleri malzeme hazırlama işlemleri ayrıntıları “3.3.1. Malzeme hazırlama” başlığı altında verilen kurutma ve eleme işlemlerinden geçirilip harmanlanarak saklanmıştır.

Tablo 3.1. Zemin numune alındığı tarih, yer, malzeme rengi ve kodu

Zemin Numunenin Alındığı				Alınan Malzemenin	
Tarih	km	GPS	Mevkii	Rengi	Kodu
10 Ocak 2009	2+000	39°53'36"N 30°05'09"E	Bozüyük, Kütahya kavşağı, Bilecik	Sarı	T
10 Ocak 2009	79+411	40°24'48"N 30°02'02"E	Osmaneli, içmeler mevki, Bilecik	Kırmızı	K

km: Bozüyük ilçesi İstanbul çıkışındaki 0+000 başlangıç kilometresine uzaklık, GPS: (Global Positioning System); Küresel Konumlama Sistemi koordinatları

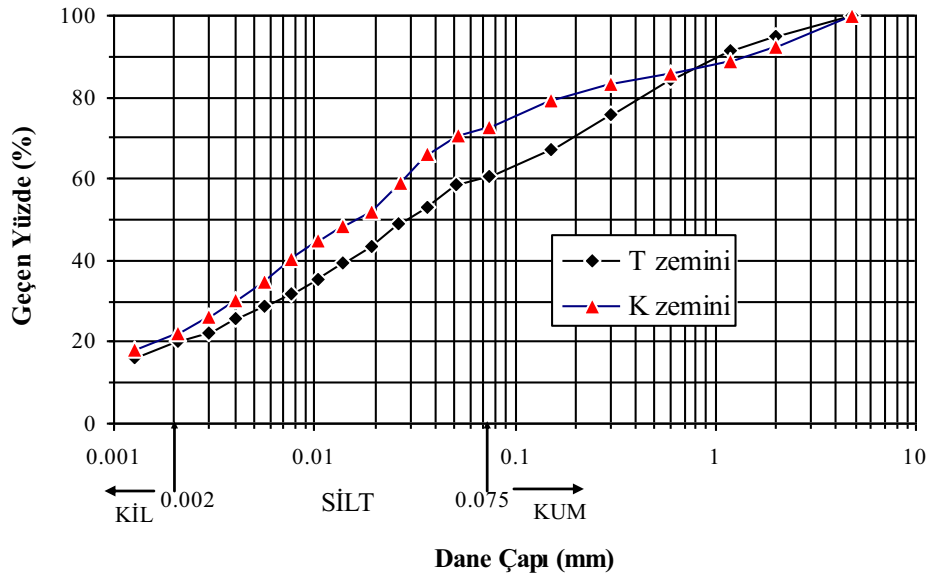
3.1.1. Zeminlerin özgül ağırlığı (Gs)

T ve K zeminlerin özgül ağırlık deneyi TS 1900-1/2006'ya göre yapılmış sonuçlar Tablo 3.2'de verilmiştir. T ve K zeminin sırasıyla özgül ağırlıkları 2.73 ve 2.71 bulunmuştur. Özgül ağırlık değerlerinin yüksekliği zeminin demir içeren mineral oranının fazla olduğunu göstermektedir (Okagbue ve Onyeobi, 1999). İki zeminin kimyasal analizinde demir oksit içeriği sırasıyla % 6.2 ve % 4.8 olarak bulunmuştur (Tablo 3.3).

3.1.2. Zeminlerin dane çapı dağılımı

Laboratuvarda yapılan dane çapı dağılımı analizi TS 1900-1/2006 standardına uygun yapılmıştır. Zeminlerin kil, silt ve kum yüzdeleri Tablo 3.2'de, granülometrik eğrileri Şekil 3.1'de verilmiştir. Eğrilere göre iki zemin örneği de iyi derecelenmiş zeminlerdir ve K zemininin ince içeriği T zemine göre biraz daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

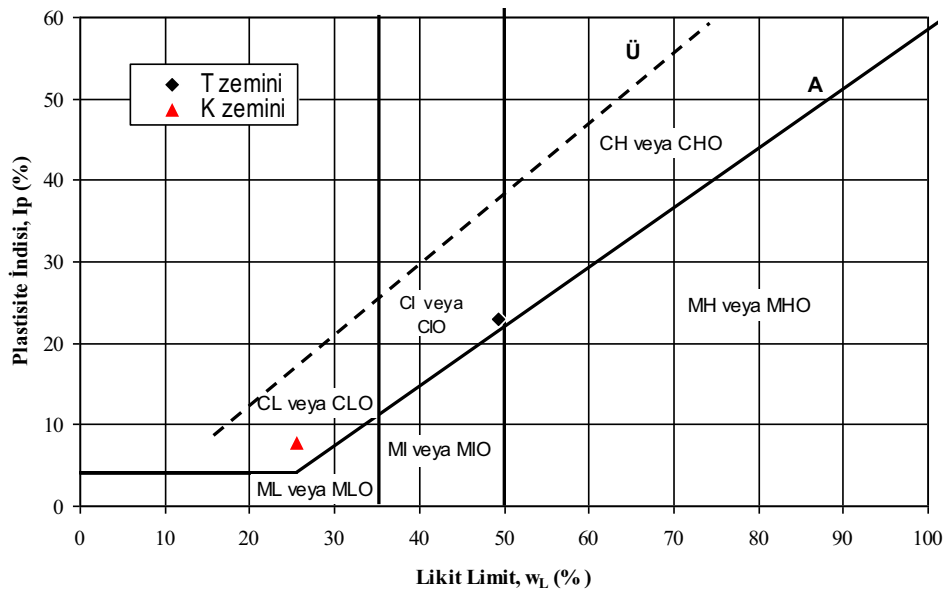
İyi derecelenmiş granülometri eğrisine sahip zeminler yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaktadır. İnce dane yapısına sahip zeminler ise, genellikle iyi işlenebilir özelliklerine sahiptir. Bu tür zeminlerde, kimyasal iyileştirme iyi netice verir. Ancak ince dane yapısı nedeniyle, düşük mukavemet gibi bazı problemler oluştururlar (Cullinane ve Jones, 1989).



Şekil 3.1. Zeminlerin granülometri eğrileri

3.1.3. Zeminlerin kıvam limitleri

Laboratuvarda yapılan likit ve plastik limit deneyleri için TS 1900-1/2006 standardı uygulanmıştır. Kil yüzdesi % 13'ten az olan numunelerin likit limit değerleri Casagrande cihazı ile belirlenemez (Ural, 2008).



Şekil 3.2. Zeminlerin TS 1500/2000 plastisite kartındaki yeri (Likit limit deneyi koni düşürme cihazı ile yapılmıştır)

Benzer çalışmalarda yapıldığı gibi bu çalışmada da kullanılacak atıkların kil içeriklerinin azlığı nedeniyle tüm zemin ve atık numunelerin likit limit ölçümü koni düşürme cihazı ile yapılmıştır. Bulunan likit limit (w_L), plastik limit (w_P) ve hesaplanmış plastisite indisleri (I_p) Tablo 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.2’de kullanılan zeminlerin TS 1500/2000 plastisite kartında yerleri gösterilmektedir.

Tespit edilen kıvam limitlerine göre plastisite kartında T zemini yüksek plastisite sınırına yakın orta plastisiteli, K zemini düşük plastisiteli killer kısmında yer aldığı görülmektedir (Şekil 3.2).

Tablo 3.2. Zeminlerin fiziksel özellikleri

Zeminler	w_L (%)	w_P (%)	I_p (%)	Kil	Silt	Kum	G _s	TS 1500/2000
T	49.3	26.3	23.0	20	41	39	2.73	CI (Orta plastisiteli kil)
K	25.6	17.8	7.8	22	51	27	2.71	CL (Düşük plastisiteli kil)

3.1.4. Zeminlerin alındığı bölgelerin jeolojik özellikleri

Bozüyük ve Pamukova bölgesinin jeolojik özellikleri şöyledir. Bozüyük bölgesinde Paleozoik, Mezozoik ve Senozoik (zaman) yaşlı oluşumlar vardır ve en geniş yayılım gösteren birimdir. Paleozoik yaşlı, 545 myö - 251 myö (milyon yıl önce), Bozüyük metamorfileri olarak adlandırılmaktadır (Ayaroğlu, 1979). Bu formasyonu temsil eden fillit, mikaşist, yeşilşist, glokofanlı şist, ortognays, kuvarsit, yarı mermerleşmiş kireçtaşı, serpantin, peridotit, gabro ile metadiyaz ve metabazalttır. Kaya birimleri içeren bölgenin yapısal unsurlarının başında bölgesel ölçekteki kıvrımlar, uyumsuzluklar ve faylar gelmektedir. Formasyon içi küçük boyutlu faylar, kıvrımlar, çizgisel yapılar, yapraklanma ve eklem sistemleri diğer yapısal süreksizlikleri oluşturmaktadır (Yılmaz ve Özsoy, 2003).

Pamukova bölgesi Paleozoik zamanda (545 myö - 251 myö) oluşmuş Sakarya zonu ve Armutlu-Ovacık zonu kayaçları arasında oluşmuştur Sakarya zonu içinde Fanerozoik devir (545 myö - günümüze kadar) tortulları ve Paleozoik zaman kayaçları görülür (Elmas ve Gürer, 2004).

Pamukova kuzeyi kuvarsit ve granit çakıllı metakırıntılar içeren bir istif niteliğindedir. Bu kayaların yüksek dereceli metamorfizma (değişim) geçirmesi ve diğer düşük dereceli metamorfik kayaları kesmeyen granitlerle kesilmesi, temeli oluşturan en alt istif olmalarını düşündürür. Armutlu yarımadasını oluşturan kayalardan, diğer istiflere göre yüksek dereceli değişim gösterenler Pamukova Metamorfikleri adı altında toplanmıştır. Bu birim Pamukova kuzeyindeki yamaçlarda, Geyve boğazının doğu ve batı yamaçlarında görülür. Yüksek dereceli değişim göstermesi ve granitik Plüton ve dayklarla kesilmesi yüzünden yarımadaanın en yaşlı kaya birimi olarak ele alınmıştır. Pamukova'nın yüzey şekilleri ise Neojen dönemde (24 myö - 1.81 myö) Marmara denizi, Gemlik ve İznik çöküntüsünün devamı olarak meydana gelmiştir. Yaklaşık 2.5 myö moloz depoları ile dolmuş, Geyve boğazının yarılmasıyla boşalarak gençleşmiştir (www.mta.gov.tr/v1.0/bolgeler/kocaeli/kocaeli/jeolojisi.doc).

Zeminlerin jeolojik özellikleri ve demir içeren minerallerden olan granit gibi özgül ağırlığı yüksek derinlik kayaçlarının doğal taş kırıntıları içermesi T ve K zeminlerin özgül ağırlıklarının (sırasıyla 2.73 ve 2.71) yüksek çıkışını açıklamaktadır.

3.1.5. Zeminlerin kimyasal özellikleri (XRF)

Zeminlerin X-ışınları Floresanı (XRF) ile belirlenmiş kimyasal içerikleri Tablo 3.3'te, verilmiştir.

Tablo 3.3. Zeminlerin kimyasal bileşimi (XRF)

Zeminler	Bileşenler (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	KK
T	54.6	13.3	6.2	0.4	7.0	6.0	0.2	<0.1	1.7	10.6
K	38.9	9.8	4.8	0.5	21.9	1.6	<0.1	<0.1	1.6	20.9

KK: Kızdırma kaybı

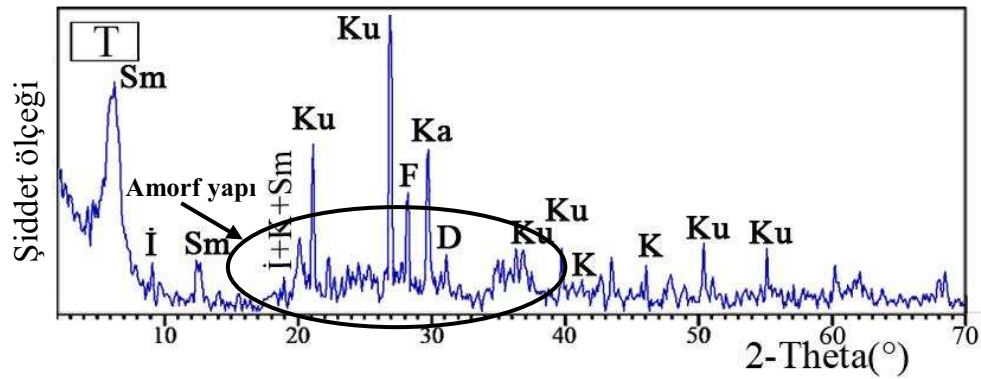
XRF analizi ile Bozüyük'ten alınan T zemini kimyasal bileşiminde % 55 SiO₂ içerdiği bulunmuştur (Tablo 3.1). T zemini X-ışınları Difraktogram (XRD) analizinde amorf yapıyı gösteren arka plan yükseltisine sahiptir (Şekil 3.3). Bu

arkaplan görüntüsü, amorf yapıya sahip uçucu küllerde veya kuvars (SiO_2) içeren malzemelerde görülür. Bu iki bulgu birbirini doğrulamaktadır.

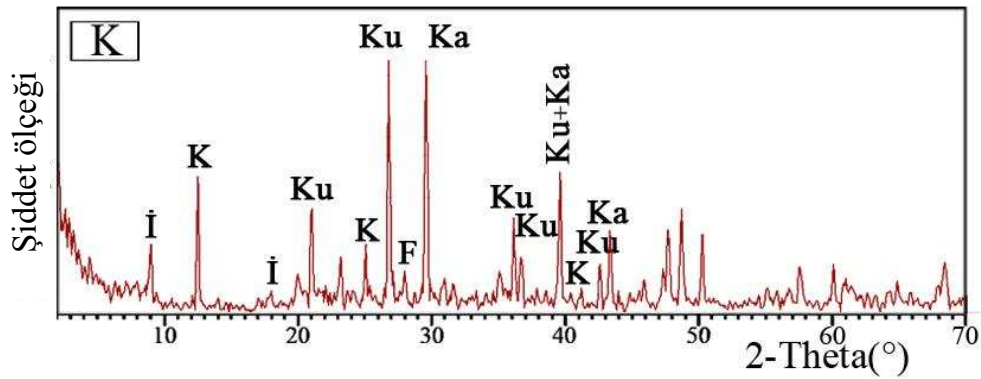
XRF analizi ile K zemininin % 22 kireç içerdiği tespit edilmiştir. Bu kireç içeriği zeminin iyileştirilmesinde kullanılması durumunda dayanım artışı sağlayabileceğini göstermektedir.

3.1.6. Zeminlerin mineral özellikleri (XRD ve SEM)

Malzemelerin Maden Tetkik Arama (MTA) Enstitüsünde Cu X-ışını tüplü Bruker D8 Advance cihazı ile X-ışınları Difraktometre (XRD) analizi yapılmıştır. T ve K zemin numunelerinin çekilen XRD difraktogramları Şekil 3.3a ve b'de verilmiştir. İlave olarak kil içerdiği tespit edilen T ve K zeminlerine yukarıda adı geçen cihazla etilen glikol'lü, 300 °C ısıt ve 550 °C ısıt işlem sonrası XRD çekimleri yapılmıştır.



a) T zeminini



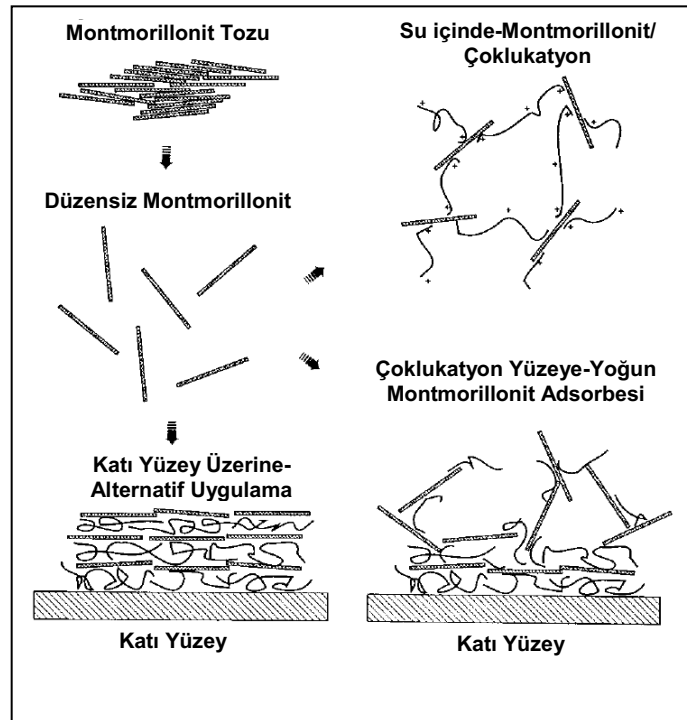
b) K zeminini

Şekil 3.3. Zeminlerin X-ışınları difraktogramları, a) T zeminini, b) K zeminini (D: dolomit, F: feldispat, İ: illit, K: kaolin, Ka: kalsit, Ku: kuvars, Sm: simektit)

XRD difraktogramların değerlendirilmesinde T zemin $d=14.15 \text{ \AA}$ piki ısı işlem sonrası (fırınlı) çekimde yerinde kalmış, etilen glikollü çekimde $d=17.25 \text{ \AA}$ 'a şişmiştir.

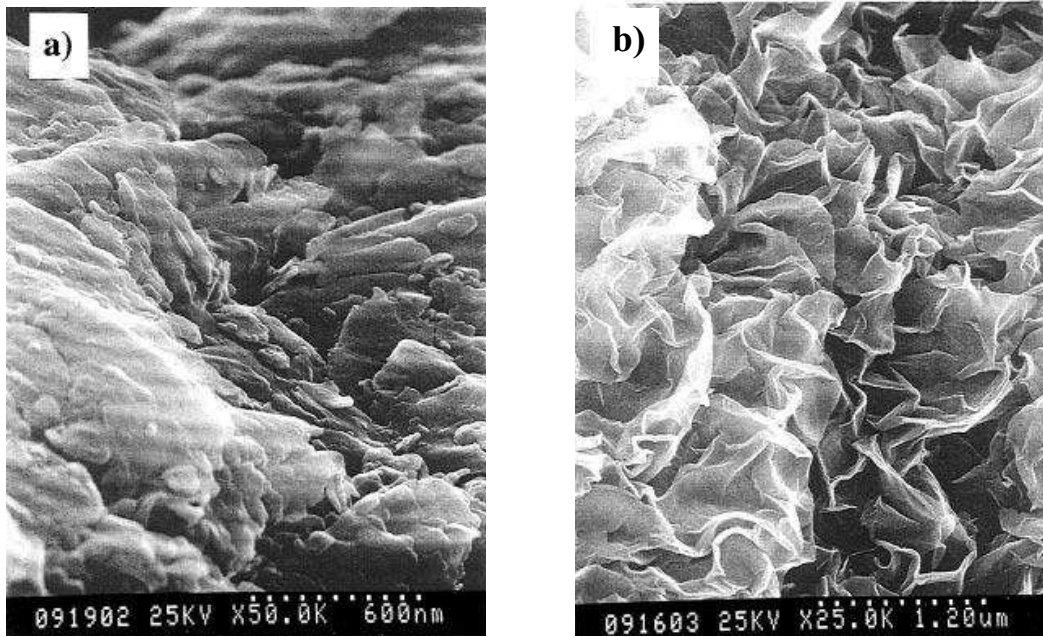
Killerde simektit içeriği etilen glikollü numunesinin XRD difraktogramında net bir şekilde 17.2 \AA pikindeki yansıması ile doğrulanır. Simektitler yüksek kation değişim kapasitesi, şişme kapasitesi ve yüksek birim yüzey alanları sonucu güçlü adsorpsiyon/absorpsiyon kapasiteleri, nedeniyle birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şişen killer arasında en yaygın bilinen dioktahedral simektit, bir oktahedral alüminyum levha ve iki tetrahedral silikon levha sandviçi olan montmorillonittir (Xi vd., 2005).

Bu sebeple simektitler 2:1 katmanlı kil olarak ta tanımlanır ve su içinde şişerler. Su içinde şişme kation (yüzey yükü) değişimi kapasitesi ile ölçülebilir. Şişme ile simektitlerin artan yüzey yükü, sulu çözeltideki tetrahedral silikat tabakasından ayrılan hidroksil guruplarının proton adsorpsiyon-desorpsiyon reaksiyonları sırasında, oktahedral alüminyum tabaka yük değiştirmeleri ile oluşan katmana ilavelerinden meydana gelir (Avena vd., 1998).



Şekil 3.4. Montmorillonit/çoklukatyon karışımının tipik davranışının şematik görünümü (Lvov vd., 1996)

Şekil 3.4 montmorillonit kili (mont) ve çoklu katyonun karışım davranışı şematik olarak vermektedir. Simektit tanelerinin birbirine göre konumu karışım hazırlandığı gibi sabit kalır ve bir diğer şekle dönüşmez. Çok katmanlı ince tabakalar suda çözünmez ve mekanik bir yöntemle katı yüzey üzerine ince bir jel tabakası şeklinde yaymak imkânsızdır. Hacim içinde su dolu boşluklar yardımı ile serbest simektit plakları benzer şekilde davranarak mont/çoklukatyon jeli kendiliğinden rastgele yönelimli olarak yüzeye dağılır. Diğer taraftan iki bileşenin katı bir yüzeye yoğun çok katmanlı paketlenmiş olarak alternatif bağlanması, katı yüzeyin mont/çoklukatyon sıvısına daldırılmasıdır (Lvov vd., 1996). Şekil 3.4'te su içinde montmorillonitin katyonların etkisi ile şiştiği görülmektedir. Katı yüzeye uygulanmış simektit katı yüzeyin olmadığı serbest yüzey zamanla su etkisiyle şişer. Simektit şiştiği ve kurutulduğu zaman Spektral Elektron Mikroskop (SEM) görüntüleri Şekil 3.5'tekine benzer bir görüntü verir. Buradan mikro resimlerdeki kıvrımlı yaprakların simektit yüzeyindeki çoklu katyona ait olduğu ortaya çıkmaktadır.

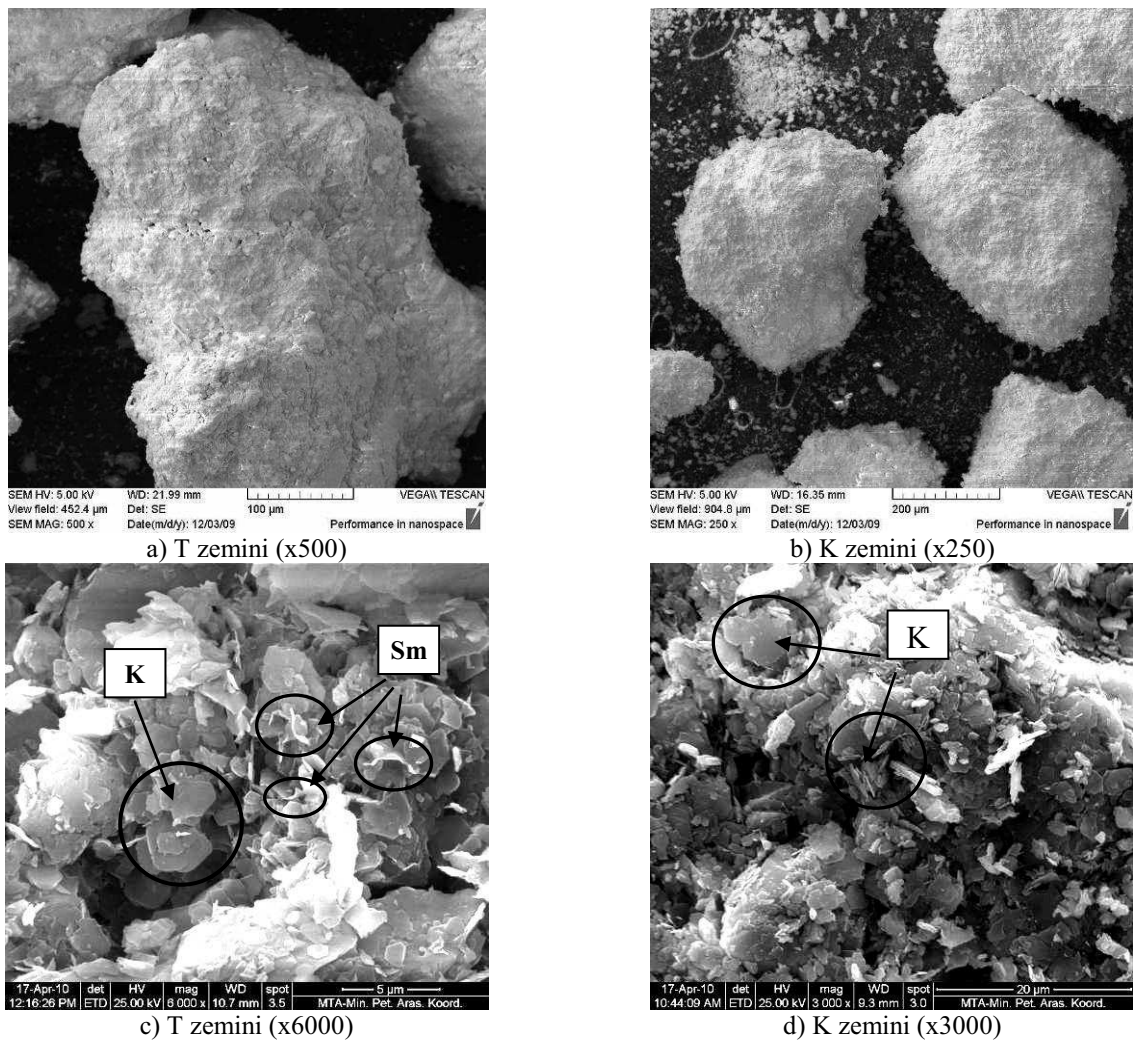


Şekil 3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) montmorillonit mikro resimleri, a) Toz montmorillonit (x50000), b) Islandıktan sonra birkaç gün havada kurutulmuş montmorillonit eğri yaprakçıkları (x25000) (Lvov vd., 1996).

MTA'dan alınan XRD analizleri sonucu T zemini içerisinde simektit (Ca-Montmorillonit), illit, kaolin, kuvars (SiO_2), feldispat, kalsit (CaCO_3), dolomit minerali ve mika grubu mineraller bulunduğu (Şekil 3.3a), K zemini içerisinde illit,

kaolin, kuvars, feldispat, kalsit minerali ve mika gurubu mineraller bulunduğu rapor edilmiştir (Şekil 3.3b). Bu sonuçlar zeminlerin Tablo 3.3'te verilen kimyasal bileşimiyle de uyum sağlamaktadır.

Zeminlerin Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ile alınan genel görüntülerine ait mikro resimleri Şekil 3.6a ve b'de verilmiştir. Resimlerde yaklaşık 300µm ebadında T ve K zeminlerin daha küçük danelerin birbirine yapışarak bir araya gelmesinden oluşan daha büyük dane kümelerinden oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.6. Farklı büyütme (x) a) T zemini (x500) ve b) K zemini (x250) c) T zemini (x6000) ve b) K zemini (x3000) SEM görüntüleri (K: kaolin, Sm: simektit)

Bakış derinliği arttıkça Şekil 3.6c'de T zemin kaolin (altıgen plaklar), illit (kısmen kıvrık yapraklar) ve simektit (kıvrık yapraklar) içerdiği, Şekil 3.6d'de K zemininin ise daha keskin köşeli kaolin (altıgen plaklar), az miktarda illit (kısmen kıvrık

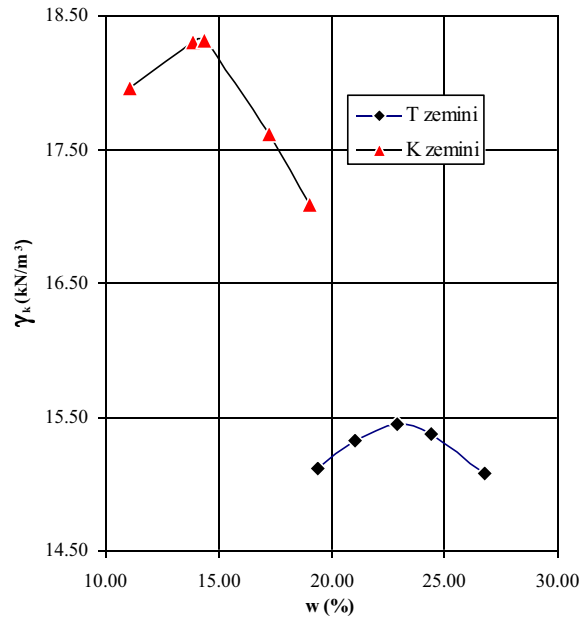
yapraklı) danelerden oluştuğu görülmektedir. Halloysit silindirik, montmorillonit ve illit yapraklı, kaolinit ise levhamsı şekildedir (Karakaya, 2006, Özer ve Orhan, 2006).

3.1.7. Zeminlerin sıkıştırma (kompaksiyon) özellikleri

Zeminlerin kompaksiyon (sıkıştırma) deneyleri TS 1900-2/2006'ya göre yapılmıştır. Standart (Proktor) enerjide tespit edilen optimum su içerikleri (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmax}) Tablo 3.4'te verilmiş Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Zeminlerin kompaksiyon ve geçirimsizlik özellikleri

Özellikler	Zeminler	
	T	K
Optimum su içeriği (w_{opt}) (%)	22.9	14.4
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) (kN/m^3)	15.45	18.31
Permeabilite katsayısı (k) (cm/s)	4.3×10^{-7}	4.5×10^{-7}



Şekil 3.7. Zeminlerin sıkıştırma eğrileri

γ_{kmax} değerleri Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006 (KTŞ)'ya göre (Standart Proktor enerjisinde, $\gamma_{kmax} \geq 14.23 \text{ kN/m}^3$) bu zeminlerin yol dolgusunda kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

3.1.8. Zeminlerin geçirimsizlik (permeabilite) özellikleri

Zeminlerin geçirimsizliği TS 1900-2/T1/2007'ye uygun olarak tespit edilmiştir. T ve K zemin geçirimsizlik katsayısı (k) sırasıyla 4.3×10^{-7} ve 4.5×10^{-7} cm/s olarak tespit edilmiştir (Tablo 3.4). Bu değerlere göre iki zeminde teorik olarak geçirimsizdir (Casagrande ve Fadum, 1940; Uzuner, 2007). Geçirim özellikleri zemini oluşturan danelerin aralıkları, birbirlerine göre konumları, dolayısıyla karışımın doluluğu hakkında bize bilgi verir.

3.1.9. Zeminlerin taşıma gücü (CBR) özellikleri

Bu çalışmada kullanılan zeminlere laboratuvarında uygulanan serbest basınç dayanımı, ıslak ve kuru CBR deneyleri TS 1900-2/2006'ya göre yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları ve CBR şişme yüzdeleri Tablo 3.5'te verilmiştir. KTŞ (2006) "Dolgular" kısmında dolguda kullanılacak zeminin ıslak (yaş) CBR oranının alt sınırı % 8 olarak verilmiş, "Kireç ile Zemin Stabilizasyonu" kısmında yaş CBR % < 10 veya CBR şişme % si ≥ 3 olan zemin veya dolgu malzemesi için iyileştirme yapılması gerektiği belirtilmektedir.

Tablo 3.5. Zeminlerin mekanik özellikleri

Özellikler	Zeminler			
	T		K	
	Batma		Batma	
	(2.5mm)	(5.0mm)	(2.5mm)	(5.0mm)
CBR (%)	22	20	35	35
Yaş CBR (%)	9	8	13	15
CBR şişmesi (%)	1.40		0.10	
Serbest basınç (qu) (kPa)	398		302	

K ve T zeminlerin yaş CBR değeri için deney öncesi 96 saat sürdürülen su emdirme sırasında şişme miktarları ölçülmüştür. Bunlardan hesaplanan şişme yüzdelerinde

KTŞ (2006) dolguda kullanılabilir şişme sınırı olan % 2 aşılmamıştır. Simektit minerali bulduran T zemin şişme yüzdesi de K zemine göre daha yüksek bulunmuştur ve şişme açısından iki zemininde dolguda kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

KTŞ “Kireç ile Zemin Stabilizasyonu” kısmında dolguda kullanılacak iyileştirilmiş zeminin yaş CBR % ≥ 15 olması istenmiştir. Buna göre yaş CBR’ı 9 ve 8 olan T zemininin dolguda kullanılmayacağına ve K zemininin de CBR’ı 13 ve 15 olan değerlerinden sadece birinin sınıra uyması nedeniyle kullanılmamasının daha uygun olacağına karar verilmiştir. Bu nedenle K ve T zeminlerinin iyileştirilerek taşıma gücü arttırılmalıdır.

3.1.10.Zeminlerin serbest basınç (SB) dayanımları

Serbest basınç deneyi, zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek için TS 1900-2/2006’da anlatıldığı gibi yapılmıştır. Deneyde üç eksenli deney düzeneği kullanılmış, serbest basınç düzeneğine uygun olması için yanal basınç kullanılmamıştır (Şekil 3.23).

3.1.11.Zeminlerin dinamik (M_R) özellikleri

Zeminlere uygulanan esneklik modülü deneyi Karayolları Genel Müdürlüğü (Ankara) Merkez Laboratuvarlarında, AASHTO T307 (2007)’ye göre yaptırılmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) M_R deney raporlarında sadece Pezo (1993)’nun modeline göre geliştirilen esneklik modülü formülü verilmektedir. Bu çalışmada sonuçları karşılaştırmak amacıyla T ve K zeminlere ait M_R formülü üretilirken Uzan (1985) modeline göre geliştirilmiş formül de istenmiştir (Tablo 3.6). Deney sırasında yüklemeleri kontrol eden ve verilerini toplayan bilgisayar programı, toplanan bu verilerden geliştirdiği T ve K zemine ait M_R formülleri Tablo 3.6’da verilmiştir. Tabloda deneyi yapılan malzemenin formülünü hesaplamak için kullanılan Pezo (1993) ve Uzan (1985)’nin geliştirdiği modeller de görülmektedir (Özay ve Güngör, 2008).

Deney yapılamadığı durumlar için M_R 'nin ampirik olarak hesaplanma yolları araştırılmıştır. AASHTO ve NCHRP 1-37A tarafından geliştirilen CBR değeri kullanılarak M_R hesaplandığı dönüşüm formülleri (5.1), (5.2) ve KGM'nin yapılan bir çalışma sonrası istatistiksel yöntemler kullanılarak geliştirdiği dönüşüm formülü (5.3)'te dördüncü bölümde verilmiştir.

Tablo 3.6. Zeminlerin dinamik deneyle geliştirilen (M_R) formülleri ve modeller

Malzeme	M_R Formülleri	
	Pezo (1993) *	Uzan (1985) *
	$M_R = k_1 S_d^{k_2} S_3^{k_3} **$	$M_R = k_1 Pa(B/Pa)^{k_2} (S_d/Pa)^{k_3} **$
T zemin	$M_R = 46443 S_d^{0.0188} S_3^{0.197}$	$M_R = 820.03 Pa(B/Pa)^{0.307} S_d/Pa^{-0.0728}$
K zemin	$M_R = 79924 S_d^{-0.268} S_3^{0.342}$	$M_R = 549.91 Pa(B/Pa)^{0.492} S_d/Pa^{-0.414}$

Not: k_1, k_2, k_3 : Katsayı S_d : Deviatör gerilme, S_3 : Yatay gerilme, Pa: Atmosfer basıncı, B: Toplam (bulk) gerilme ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$). * Modeli geliştiren, **Geliştirdiği model (Özay ve Güngör, 2008).

Solanki vd., (2009) çalışmasında bütün numunelerde ölçülebilen en küçük yatay gerilme (S_3) ve deviatör gerilme (S_d) değerleri ile M_R 'leri hesaplamış ve bunları Pezo (1993) modeline göre karşılaştırmıştır. Arora vd., (2005) M_R hesabında toplam (bulk) gerilme olarak granüler zemin tabakalarının ortasında oluşan 137.9 kPa değeri ve Uzan (1985) modelini kullanmıştır. Karşılaştırmanın diğer bir yolu da deneyden uygulanan değerlerden belirli bir gerilme değerini esas alıp ortalama değerleri karşılaştırmaktır (Solanki, 2010). Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) LTPP protokolü P-46 (1989) dolguda kullanılacak zeminleri için deviatör gerilme (S_d) olarak 28 kPa ve düşey gerilme (S_3) olarak 41 kPa değerini karşılaştırma değeri olarak tavsiye etmektedir (Pezo ve Hudson, 1994; Solanki, 2010). T ve K zeminlerin esneklik modüllerini karşılaştırmak için LTPP protokolü P-46'da belirtildiği gibi deney ile bulunan değerlerden yatay gerilme (S_3) = 42 kPa ve deviatör gerilme (S_d) = 28 kPa değerlerindeki M_R 'ler alınmıştır. Zeminlerin Pezo (1993) ve Uzan (1985) modellerine uygun M_R formülleri deney sonuçlarından elde edilmiş ve Tablo 3.6'da verilmiştir. Zeminlerin (T, K) deneyden elde edilen ve ampirik dönüşüm formülleri (5.1), (5.2) ve (5.3) kullanılarak hesaplanan M_R değerleri toplu olarak Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7'deki sonuçlarda dönüşüm formülü ile bulunmuş zeminlere ait M_R değerleri birbirinden ve dinamik üçeksenli M_R deneyi ile bulunan değerlerden çok farklı

olduğu görülmektedir. Elde edilen en farklı sonuç KGM formülü ile elde edilen olmuştur. Bu sonuçlara göre isabetli bir projelendirme için dinamik deney yapılarak bulunan denklemler ile hesaplanmış M_R değerleri kullanılmalıdır. Üç eksenli dinamik deney imkânı bulunmadığında bu tür zeminler için AASHTO dönüşüm formülü deney sonuçlarına en yakın değeri vermiştir.

Tablo 3.7. Zeminlerin dinamik özellikleri (M_R)

Hesaplama Yöntemi	M_R Değerleri (MPa)	
	T zemini	K zemini
AASHTO Dönüşüm Formülü	83	134
NCHRP 1-37A Dönüşüm Formülü	67	91
KGM M_R Dönüşüm Formülü	39	54
M_R Deneyi ile	93	151

Witczak, (2004) ince daneli zeminlerde 69 MPa M_R değeri ile zeminleri iki kısma ayırmıştır. M_R 'si bu değer üzerindeki zeminleri katı (stiff), altındaki zeminleri yumuşak (soft) zeminler olarak sınıflandırmıştır. Bu sınıra ve Pezo (1993) modeline göre M_R değerlerine bakılarak T ve K zeminleri katı zemin olarak sınıflandırılır. Plastisite indisleri ile karşılaştırdığımızda M_R 'si 93 MPa olan T zemini orta plastisiteli ve M_R 'si 151 MPa olan K zemini düşük plastisiteli bulunmuştur. Bu da T ve K zeminlerinin katı kıvamlı zemin özelliği gösterdiğini doğrulamaktadır. T zemini K'ya göre daha fazla plastik bir zemindir. M_R arttıkça plastisite azalmaktadır, bu da esneklik modülünün plastisite ile ters orantılı olduğunu göstermektedir (Pezo vd., 1994).

3.2. Atık Numuneler

Bu çalışmada dolguda kullanılacak zeminin iyileştirmesi için üç atık kullanılmıştır. Uçucu kül, mermer tozu ve endüstriyel atık kumdan oluşan bu atıkların alınma yeri ve çalışmadaki isimleri (kodları) Tablo 3.8'de verilmiştir. Uçucu kül (UK) Çayırhan termik santralinden (Nallıhan) dökme olarak temin edilmiştir. Mermer tozu (M) numunesi bir mermer işletmesinin (Bilecik) atık sahasından alınmıştır. Endüstriyel

atık kum (AK) Cam Sanayisine hammadde sağlayan Camiş Maden zenginleştirme işletmesinden alınmıştır.

Tablo 3.8. Atık numunelerin alındığı yer, renk ve atıklara verilen kodlar

Malzeme	Numune Alınan		Alınan Malzeme	
	şirket	Mevki	Renk	Kod
Uçucu kül	Park Termik	Çayırhan termik santrali	Gri-siyah	UK
Mermer tozu	Somtaş	şirketin atık depolama alanı	Krem	M
Endüstriyel atık kum	Camiş	şirketin atık depolama alanı	Sarı	AK

Bu çalışmada kullanılacak atık malzemelerin ortak özelliği, yıllık 100.000 ton veya daha fazla üretilen atıklar oluşu ve fiziksel özellikleri bakımından % 50 ve daha fazla silt boyutlu ince daneler içermesidir (Tablo 3.11). Atık numuneleri malzeme hazırlama (Bölüm 4.1) kısmında da ayrıntıları verilen işlemlerden, No.16 (1.18 mm) elekten geçirilip harmanlanarak saklanmıştır.

3.2.1. Atıkların kimyasal özellikleri (XRF)

Atıkların X-ışınları Floresanı (XRF) ile tespit edilmiş kimyasal bileşimleri Tablo 3.9’da verilmiştir. Uçucu kül (UK) Çayırhan termik santrali işleyen Park Termik Elektrik San. ve Tic. A.ř. idaresinden temin edilmiştir. Puzolanik madde olan uçucu küller yaygın kullanımı beton içine karıştırmak şeklindedir. Betonda kullanılabilirlik değerlendirmesi TS 639, TS EN 450-1 veya ASTM C618’e göre yapılır. Dünyada kabul görmüş ASTM C618’e göre UK’nın içerdiği silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksit ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) toplamı % 50’ten fazla ise C sınıfı ismini alır, eğer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (SAF) içeriği % 70’ten fazla ise F sınıfı olarak isimlendirilir. UK’nın sınıflandırılmasındaki amaç külün reaktiflik özelliklerini belirlemek ve kullanıcıya UK’nın kimyasal bileşimi hakkında ön fikir vermektir. Tablo 3.10’da UK sınıflandırma sistemleri verilmiştir. Kullanıldığı yere göre dayanımında değişimlere neden olan UK’nın önemli bir özelliği de CaO (serbest kireç) içeriğidir. ASTM 618’de sınır miktarı % 10 olan UK CaO içeriği bu sınır üzerinde ise yüksek kireçli yani C sınıfı, altında ise düşük kireçli yani F sınıfı olarak adlandırılmaktadır. Çayırhan UK SAF toplamı % 65.5, CaO içeriği % 14.8’dir (Tablo 3.9). Kimyasal analiz sonuçlarına göre ve SAF limiti bakımından Çayırhan termik santralinden

alınan uçucu kül numunesinin TS 639 ve TS EN 450-1 standartlarına göre betonda kullanılma şartlarını sağlamadığı, ASTM 618 standardına göre yüksek kireçli C sınıfı bir uçucu kül olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.10). Türkiye’de ortaya çıkan UK miktarı yaklaşık 13 milyon tondur (Cömert vd. 2010)

Tablo 3.9. Atıkların kimyasal bileşimi (XRF)

Atıklar	Bileşenler (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	KK
Uçucu kül	45.5	12.3	7.7	0.7	14.8	8.3	2.7	4.7	2.5	0.4
Mermer tozu	0.6	0.4	0.1	0.01	55.0	2.5	<0.1	0.1	0.0	41.4
Atık kum	86.7	7.9	0.6	0.1	0.7	0.1	<0.1	0.0	1.0	2.9

KK: Kızdırma kaybı

Tablo 3.10. Uçucu külleri sınıflandırma sistemleri

Elementler	Limitler (%)			
	ASTM C618/2005		TS 639-T1/1998	TS EN 450-1/2008
	F Sınıfı	C Sınıfı		
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	En az 70.0	En az 50.0	En az 70.0	En az 70.0
CaO	-	-	-	En fazla 10.0*
MgO	En fazla 5.0	En fazla 5.0	En fazla 5.0	En fazla 4.0
K ₂ O	En fazla 5.0	En fazla 5.0	-	-
Na ₂ O	En fazla 1.5	En fazla 1.5	-	En fazla 5.0
SO ₃	En fazla 5.0	En fazla 5.0	En fazla 5.0	En fazla 3.0
K.K.(Kızdırma Kaybı)	En fazla 12.0	En fazla 6.0	En fazla 10.0	En fazla 5.0

* Reaktif kireç (CaO)

Bu çalışmada mermer tozu elde edilen ve çamur keki olarak da adlandırılan mermer çamuru şirketin atık sahasından alınmıştır.

Mermer tozu (M) mermer işletmelerinde katrik veya S/T gibi makinelerle blok mermer kesiminden, yan kesme ve baş kesme makinelerinin kullanımından ve bunun yanında silme ve cilalama işlemlerinden ortaya çıkmaktadır (Ersoy, 2003). Mermer tozu çamuru işletmede kullanılan suda flokülasyonla çökeltilir. Filtre preslerde sıkılarak 40x45 cm ebatlı balçık kek şeklini alır. Su içeriği yaklaşık % 20-22’ye düşen bu kekler her gün kamyonla atık sahasına atılır. Bilecik’te bulunan irili ufaklı 200 civarında işletme atık sahalarına hergün en az yarısı mermer tozu çamuru olan 1-2 ton mermer atığı atmaktadır (Ural vd., 2010). Su içeriği % 20 olan bu atıkların her işletmeden atılan kuru mermer tozu atık miktarın 0.8 ton olduğu düşünülürse Bilecik’in yıllık mermer tozu atığı yaklaşık 60.000 ton olarak hesaplanır. Bu miktar iyimser bir yaklaşımdır gerçek rakkamın bu rakkamın üzerinde olacağı tahmin

edilmektedir. Türkiye'nin yıllık mermer tozu atığı yaklaşık 5 milyon tondur (Cömert vd., 2010)

Sahadan alınan mermer çamuru 110 ± 10 °C etüvde kurutulmuş toprakları dağıtmak için lastik başlı tokmakla ezilmiş ve tamamı No.16 (1.18 mm) elekten geçirilmiştir. Mermer tozu numunesi alırken, tesisin sürekli aynı tip mermer kestiğine ve sahaya atılmış numunelerin üzerine yağmur yağmadan numune alınmasına dikkat edilmiştir. Mermer tozu (M) bu çalışmada % 55.0 ile en yüksek CaO ve % 41.4 ile en yüksek kızdırma kaybına sahip atıktır (Tablo 3.9). Yüksek kireç içeriğinin zemin iyileştirilmede dayanımı arttırıcı etkisi olacağı düşünülmüştür.

Endüstriyel atık kum cam üretiminde kullanılacak hammadde imalatı sırasında Kalkerin 500 µm'a kadar öğütülmesi sırasında elde edilir. İmalatta kullanılacak öğütülmüş kalker tozu içinde % 5'ten fazla 106 µm'dan küçük çaplı kısım istenmez. Öğütme sonunda sulu atık olarak ayrılan bu yan ürün miktarı sadece Bilecik işletmesinde yıllık 200.000 tona ulaşmaktadır. Atık % 1'den daha az kireç ve % 85 silis (SiO₂) içeriğine sahiptir (Tablo 3.9).

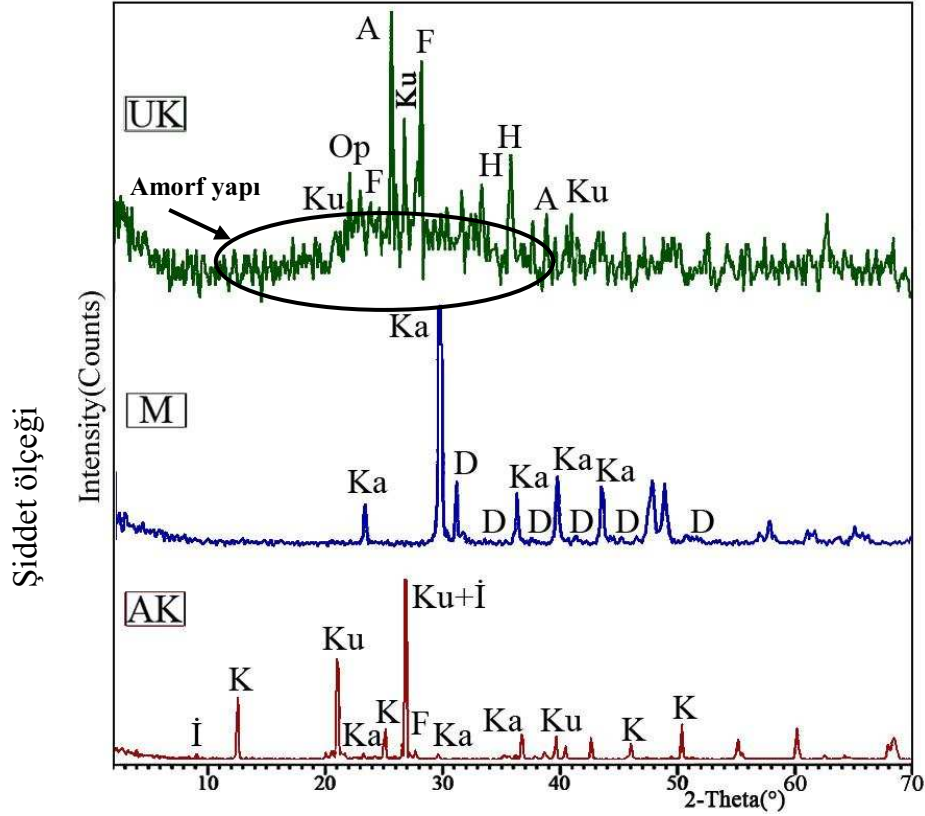
Doğada oluşmuş kum ve siltlerin büyük bir bölümü kuvarstan (SiO₂) oldukça küçük bir bölümü jips ve mika gibi parçalardan oluşur. Killer ise, kil minerallerinden (kaolin, illit, simektit vb.) meydana gelirler. Diğer mineraller, doğal şartlar ile bu boyuta küçülemediklerinden, saf killerde kuvars düşük oranda bulunmaktadır (Yücel vd., 2004).

Bu atık, granülometri eğrisinde görüldüğü gibi (Şekil 3.12) % 61 silt ve % 25 kum içermesi nedeniyle silt veya düşük plastisiteli kil (CL) şeklinde sınıflandırılmış olmasına rağmen kimyasal bileşiminde bulunan % 85 gibi yüksek oranda silis içermesi nedeniyle "Atık Kum" olarak isimlendirilmiştir. Atık Kum (AK) numunesi Bilecik Camiş işletmesinin atık sahasından alınmıştır.

AK kimyasal bir kirletici değildir ve çevreyi kimyasal olarak kirletmez ama ortaya çıkan atık miktarının çok oluşu doğal dengeyi bozabilir. Bununla beraber yaz ve bahar aylarında rüzgâr ile havaya karışan bu tozlar astım ve kanser gibi ciddi sağlık problemlerine sebep olabilmektedir (Turgut ve Algın, 2006; Felekoğlu, 2007).

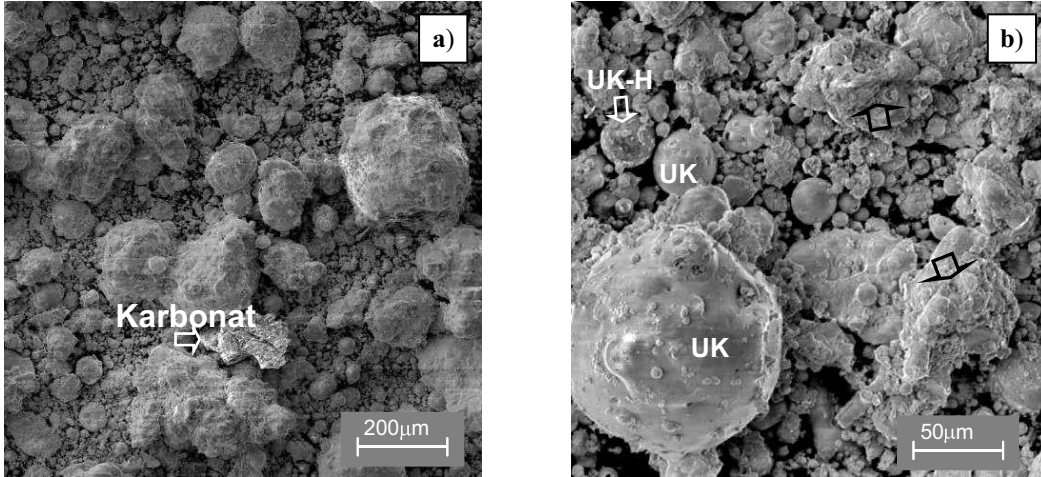
3.2.2. Atıkların mineral özellikleri (XRD ve SEM)

XRD analizi ile mineral içerikleri tespit edilen atık malzemelerin XRD difraktogramları Şekil 3.8’de verilmiştir.

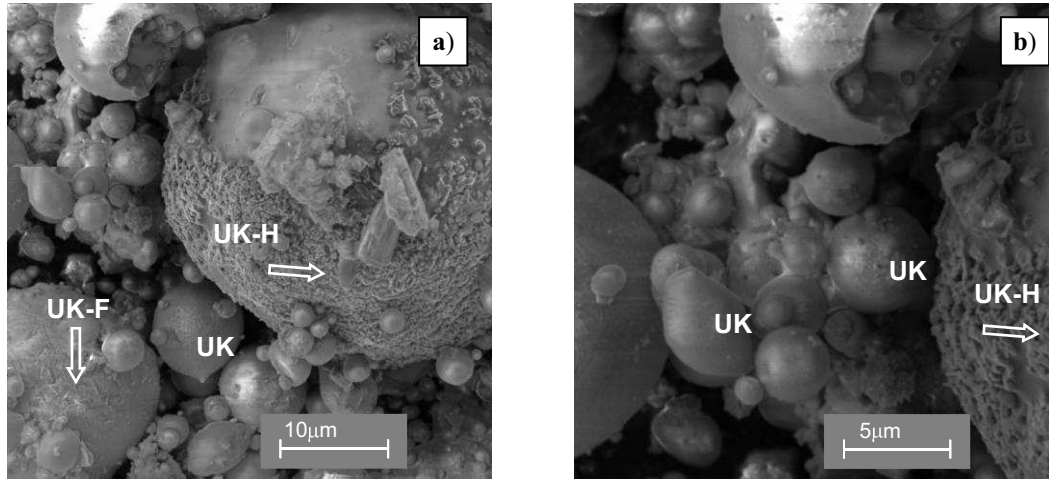


Şekil 3.8. Atık malzemelerin XRD difraktogramları (UK: uçucu kül, M: mermer tozu, AK: endüstriyel atık kum, A: anhidrit, D: dolomit, F: feldispat, H: hematit, İ:illit, K: kaolin, Ka: kalsit, Ku: kuvars, Op: opal-CT)

Buna göre, Çayırhan uçucu külü kuvars, opal-CT, feldispat, anhidrit, hematit mineralleri içermektedir. Şekilde uçucu küllerin tipik amorf yapı arka planı Çayırhan uçucu külünde de görülmektedir. Puzolanik malzemenin aktive olması için ince taneli olması, yeterli miktarda silis, alümin ve demir oksit içermesi ve amorf yapıya sahip olması gereklidir (Erdoğan, 2003). XRD analizine göre, mermer tozu (M) kalsit ve dolomit, atık kum (AK) illit, kaolin, kuvars, kalsit, feldispat minerallerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.9. Çayırhan uçucu külü SEM mikro resimleri a) Uçucu kül genel görünümü içinde karbonat kümesi (beyaz ok), b) Küreler şeklinde uçucu kül plerosfer ve senosferler (UK), hematit kaplı uçucu kül (UK-H) (beyaz ok) ve Karbonat-UK kümeleri (siyah oklar)

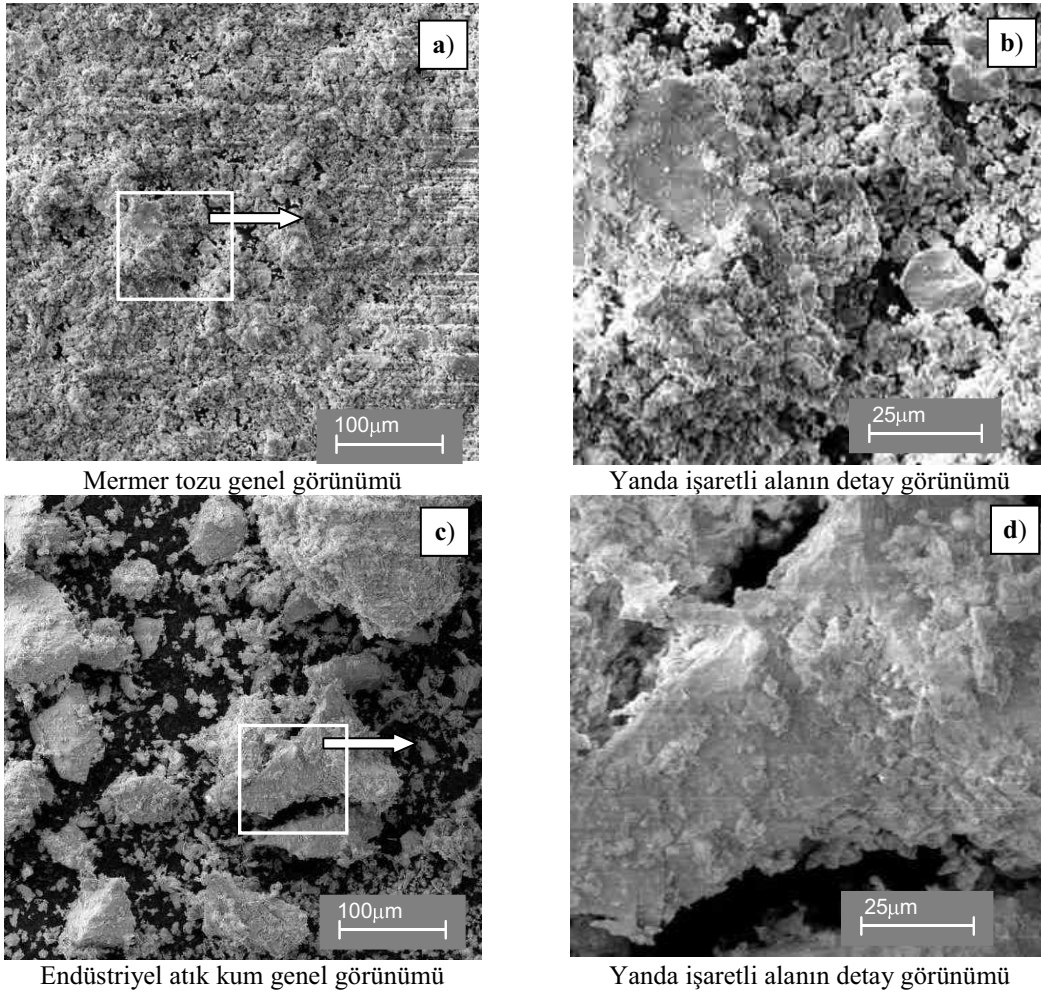


Şekil 3.10. Çayırhan uçucu külü SEM mikro resimleri Küreler şeklinde uçucu kül (UK), hematit kaplı (UK-H) ve alkali feldispat kaplı (UK-F) uçucu kül (beyaz ok) a) x5000, b) x100000 büyütme

Çayırhan uçucu külün SEM mikro resimleri genel görünümü Şekil 3.9’da verilmiştir. Şekil 3.9a’da Çayırhan uçucu külü (UK) genel görünümü içinde “karbonat” kümesi (beyaz ok) görülmektedir. Şekil 3.9b’de ani soğuma neticesi oluşan yüzeyleri pürüzlü veya parlak plerosfer ve senosfer küreleri (UK) göstermektedir. Bu küre yüzeylerinin bazıları hematitle (UK-H) kaplı olduğu ve karışıma dağılmış durumda Karbonat-UK kümeleri görülmektedir (siyah oklar). Karbonat-UK kümeleri XRF’le belirlenmiş % 14.8 oranında CaO içeriği ile uyumlu sonuca işaret etmektedir.

Büyütme arttırılarak alınmış Çayırhan uçucu kül SEM resimleri Şekil 3.10’da görülmektedir. Resimlerde plerosfer ve senosferlerin cam yüzeylerinin parlak veya değişik dokulu şekillerde farklı minerallerle kaplı olduğu net bir şekilde

görülmektedir. UK'yı oluşturan cam (opal-CT) yüzeyli küreler, UK XRD difraktogramını oluşturan piklerin tabanını oluşturan yatay çizginin yay şeklinde yükselip alçalmasına neden olur. Bu da malzemenin amorf içeriğe sahip olduğuna işaret eder. Bunun yanında UK XRF analizi SiO_2 içeriği ve XRD analizindeki opal-CT minerali içeriği de amorf yapıyı destekler. UK-H portakal yüzeyi dokulu hematit, UK-F küçük iğneler alkali feldispat kaplı küreleri göstermektedir (Şekil 3.10a ve b).



Şekil 3.11. Mermer tozu ve endüstriyel atık kum SEM mikro resimleri a) Mermer tozu genel görünümü, c) Endüstriyel atık kum genel görünümü b) ve d) Genel görünümde işaretli alanların detay görüntüleri

Üzerine yağmur yağmadan sahadan alınan AK numuneleri 110 ± 10 °C etüvde 24 saat kurutulur. Topakları ufalanıp No.16 elekten geçen toz haline getirilir. M ve AK toz numuneler karbon bant üzerinde sabitlenerek SEM resimleri alınmıştır. Pudra görünüşlü mermer tozunun genel görünümü Şekil 3.11a'da, daha büyük ve ayrık danelere sahip atık kumun genel görünümü Şekil 3.11c'de verilmiştir. Genel

görünümde işaretli karelerin detay görünüşleri (sağda) Şekil 3.11b ve d'de verilmiştir. Burada M'nin daha çok yuvarlak köşeli plakalar şeklinde, AK'nın keskin köşeli kama şeklinde danelerden oluştuğu görülmektedir.

3.2.3. Atıkların özgül ağırlığı (Gs)

Deneylerde kullanılan atıkların özgül ağırlığı TS 1900-1/2006'ya göre tespit edilmiş sonuçlar Tablo 3.11'de verilmiştir. Özgül ağırlıklar tipik uçucu küllerde beklendiği gibi ve diğer atıklardan düşük (2.47) bulunmuştur. M kalker orijinli bir malzeme oluşu ve AK'nın kalkerin öğütülmesi ile elde edilişi nedeniyle yakın değerler vermiştir (Kavaklı, 2003). M ve AK özgül ağırlıkları sırasıyla 2.66 ve 2.65 bulunmuştur.

3.2.4. Atıkların dane çapı dağılımı

Laboratuvarda yapılan dane boyutu analizi, TS 1900-1/2006 standardına uygun yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 3.11'de granülometrik eğriler Şekil 3.12'de verilmiştir.

Kalıp kumu gibi atıkların dane çapı dağılımı, atıkların iyileştirme tekniklerinin seçimini etkilemektedir. Bunun dışında iyileştirme sonrası yeniden kullanılabilirlik alternatiflerinin belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır (Cullinane ve Jones, 1989).

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi UK kum içeriği fazla ve iyi derecelenmiştir. M silt ve kil içerik toplamı % 95'ten fazladır ve % 72'si silt olan bir atıktır. AK % 25 kum ve % 61 silt içeriği ile dane çapı dağılımı açısından UK ve M atık eğrileri arasından geçen bir granülometri eğrisi vermektedir.

3.2.5. Atıkların kıvam limitleri

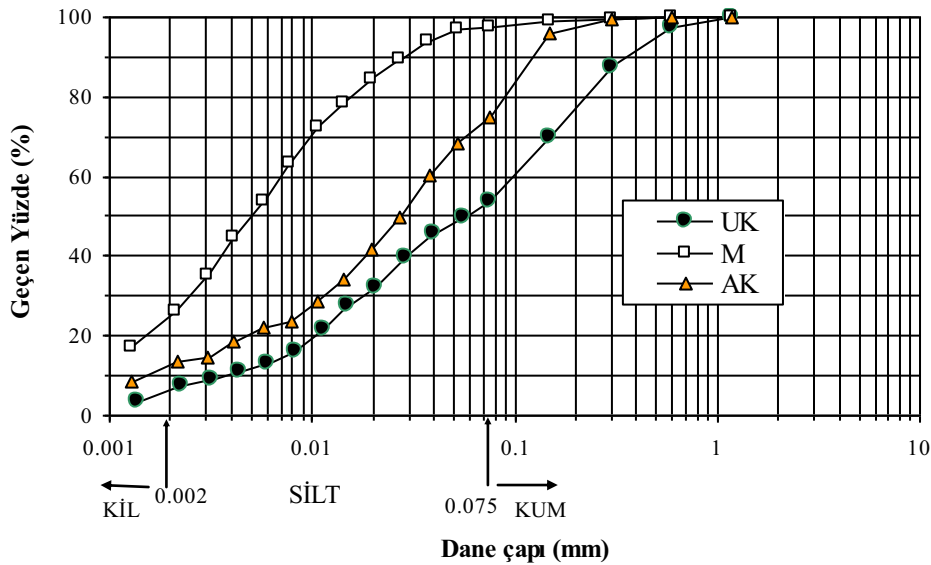
Laboratuvarda yapılan likit ve plastik limit deneyleri için TS 1900-1/2006 standardı uygulanmıştır. Kil içeriği % 13'ten az olan numunelerin likit limit değerleri düşen koni cihazı ile belirlenir (Ural, 2008). Benzer çalışmalar likit limit için Casegrande

cihazında kil zemine oluk açma güçlüğü ile karşılaşılan veya cihaz kabında akıp duramayan düşük plastisiteli zemin ile çalışırken de düşen koni cihazı kullanılmıştır (Soosan vd., 2005).

Tablo 3.11. Atıkların fiziksel özellikleri

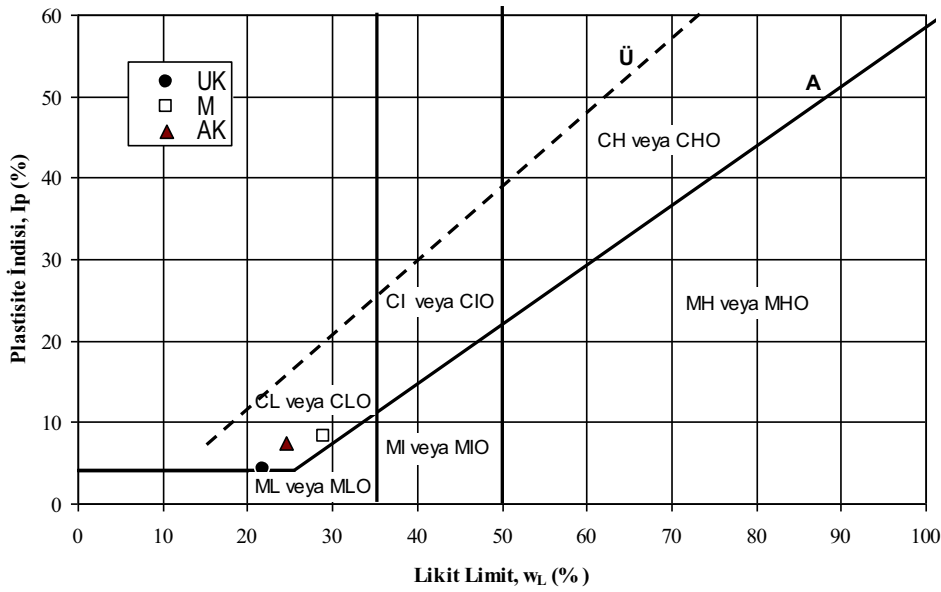
Atıklar	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	Kil	Silt	Kum	G_s	TS 1500/2000
UK	21.8	17.5	4.3	7	47	46	2.47	CL (Kumlu düşük plastisiteli kil)
M	29.1	20.8	8.3	25	72	3	2.66	CL (Düşük plastisiteli kil)
AK	24.5	17.0	7.5	14	61	25	2.65	CL (Düşük plastisiteli kil)

UK: Uçucu kül, M: Mermer tozu, AK: Endüstriyel atık kum



Şekil 3.12. Atıkların dane çapı dağılım eğrileri (UK: Uçucu kül, M: Mermer tozu, AK: Atık kum)

AK atığı kil yüzdesi sınırda (% 14) ve UK kil yüzdesi % 7 olduğundan kıyaslamayı doğru yapabilmek için bu çalışmada kullanılan zeminler gibi atıkların da likit limit ölçümü koni düşürme cihazı ile yapılmıştır. Bulunan likit limit (w_L), plastik limit (w_P) ve hesaplanmış plastisite indisleri (I_P) Tablo 3.11’de verilmiştir. Şekil 3.13’te kullanılan atıkların TS 1500/2000 plastisite kartında yerleri gösterilmektedir. Buna göre atıklar düşük plastisiteli kil olarak sınıflanmıştır. UK, M ve AK’nın sırasıyla silt yüzdeleri 47, 72 ve 61 oluşu bu sonuçla tutarlıdır.



Şekil 3.13. Atıkların TS 1500 plastisite kartındaki yeri (UK: Uçucu kül, M: Mermer tozu, AK: Atık kum)

3.3. Metot

Bu çalışmada, malzeme ve karışımların özelliklerini konu alan iki laboratuvar programı ile yol inşaatı dolgusunda kullanılacak zemin veya zemin-atık malzemesinin uygunluğu tespiti için esas olan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), serbest basınç (SB) ve esneklik modülü (M_R) deneyleri kullanılmıştır. Birinci laboratuvar programında malzeme özellikleri tespit edilirken karışımların hazırlanabilmesi için öncelikle kompaksiyon (sıkıştırma) deneyleri yapılmıştır. Sonra, mekanik dayanım deneyleri sürerken zemin ve atık karışımlarının fiziksel özelliklerinin belirlendiği (özellikler, dane çapı dağılımı, kıvam limitleri, permeabilite vb.) deneyler ve mineralojik özelliklerinin belirlendiği XRD ve SEM analizleri yapılmıştır. Çalışmada yapılan deneyler ve karışımlarda kullanılan katkı miktarları Tablo 3.13.te verilmiştir. İkinci laboratuvar programında iki farklı doğal zemine ayrı ayrı ilave edilerek elde edilen zemin-atık karışımlarının özellikleri bekletilmeden ve/veya bekletilerek zamana bağlı değişimleri incelemek için karışımlara değişik kür süreleri sonunda CBR ve SB deneyleri, XRD ve SEM analizleri yapılmıştır. Karışımlara yapılan deneyler ve kür süreleri Tablo 3.14'te verilmiştir.

3.3.1. Malzeme hazırlama

Deneyle uygulandığı süre boyunca malzeme özelliklerinde (fiziksel, kimyasal vb.) süreklilik olmasını sağlamak amacıyla kurutma, ufalama ve eleme işlemlerinden geçirilip aynı cins malzemenin tümü harmanlanmış çeyrekleme metoduyla ayrılıp çuvalarda saklanmıştır. Karışıma katılacak malzeme miktarları kuru ağırlıkça hesaplanıp karışımlara katılacağından zemin ve atık numuneleri 110±10 °C'lik etüvde en az 24 saat bekletilerek değişmez kuru ağırlığa getirilmiştir (Şekil 3.14). Topakları dağıtmak için lastik başlı tokmakla ufalanmış sonra zemin malzemeleri No.4 (4.75 mm), atıklar No.16 (1.18 mm) elekten geçirilmiştir. Elekten geçirme işlemi malzemelerin etkileşime girmeleri durumunda her deney numunesinde aynı özelliği göstermesi için standart bir uygulama haline getirilmiştir.

Tablo 3.12. Sıkıştırma deneyi için kullanılması gereken kalıp ve eleklerin seçim kuralları (TS 1900-1/2006)

Grup	Kullanım şartı	Kullanılan malzeme	Kalıp (iç boyutları)	Tabaka sayısı	Her tabakaya vuruş sayısı
A	% 20 ve daha az malzeme 4.75 mm'lik elek üzerinde kalıyor ise	4.75 mm'lik elekten geçen	Çapı: 105.0 mm Boy: 115.5 mm	Üç	25
B	% 20 ve daha fazla malzeme 4.75 mm'lik elekte kalıyor ve % 20 ve daha az malzeme 9.5 mm'lik elek üzerinde kalıyor ise	9.5 mm'lik elekten geçen	Çapı: 105.0 mm Boy: 115.5 mm	Üç	25
C	% 20'den daha fazla malzeme 9.5 mm'lik elekte kalıyor ve % 30 ve daha az malzeme 20 mm'lik elek üzerinde kalıyor ise	20 mm'lik elekten geçen	Çapı: 152.4 mm Boy: 115.5 mm	Üç	56

Tablo 3.12'de görüldüğü gibi TS 1900-1/2006'ya göre sıkıştırma deneyinde T ve K zemini A grubuna girmektedir. Bu nedenle sıkıştırma deneyinde zeminlerin No.4 elekten geçen kısmı kullanılmıştır. Atıklar No.16 elekten geçirilmiştir. Bunun nedeni bu eleğin atıkların içerdiği en büyük dane çapına uygun olması dolayısıyla atıkların bu elekten % 100 oranında geçmesi (Şekil 3.12) dolayısıyla yapışık toz danelerinin bu elekten geçerken örselenmeden ayrılmasıdır. Kurutulmuş ve topakları dağıtılmış atığın eğer kaldıysa eleme sırasında küçük çaplı topakları da dağıtılmış olur. Böylece

toz haline getirilmiş atığın zemine homojen dağıtılması ve iyileştirme etkisinin daha iyi görülmesi sağlanmış olur. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneylerindeki karışımlarda 20 mm elekten geçen zemin malzemesi kullanılmıştır (TS 1900-2/2006).



Şekil 3.14. Malzemelerin etüvde kurutulması

3.3.2. Karışım oran hesabı

Önceki benzer çalışmalarda karışım oranı hesaplanırken değişik yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan biri; iyileştirilmiş zeminde katkı miktarı % 1, 3, 8 gibi, % 10'un altında kalan oranlarda hidrolik bağlayıcı (çimento, kireç vb.) katılarak yapılan çalışmalardır. Bu yöntemde iyileştirilecek zemin malzemesi % 100 kabul edilmiştir. Katkı ikame (yerine koyma) edilmeden, zemin üzerine ilave yapılarak hazırlanmış karışımlarla zemin iyileştirmiştir (Bahar vd., 2004; Al-Rawas vd., 2005; Güney vd., 2007; Cömert vd., 2008; Papageorgiou ve Hytiris, 2009). Bu yöntemde katkı ilavesi şantiye uygulamaları için kolaylık sağlamakta ancak zemin-katkı karışım toplamı bu durumda % 100'den fazla çıkmaktadır. Kullanılmış ikinci bir yöntem ise iyileştirilecek zemin ile katkının orantılanmasıdır. Katkı/zemin (K/Z) oranı bir rakama (0.50, 3.0 vb.) veya bir kesre (1/4, 2/3 vb.) eşitlenmesi ile yapılmıştır (Chen ve Lin, 2009). Bu iki yöntemde sonuçların daha önceki çalışmalarla karşılaştırılmasında güçlük çekilmektedir. Yaygın kullanılan diğer bir yöntem katkı miktarının zeminin belli bir yüzdesi ile ikame edilmesidir. Bu yöntemde karışımın tamamı, zemin ve katkı oranları toplamı % 100, ve bundan dolayı da sonuçların diğer çalışmalara karşılaştırması kolay olmaktadır (Misra vd., 2005a; Başer, 2009; Çimen vd., 2010; Cömert vd., 2010).

Bu çalışmada karışım miktarları kuru ağırlıkça hesaplanmış zemin ile atık oranı toplamının % 100 olma esası, karışım isimleri için kodlar kullanılmıştır. Kodlarda ilk harf zemin türüne, rakam karışıma katılan atık oranına ve ikinci harf grubu karışımdaki atık cinsine karşılık gelmektedir. Örneğin, K-10UK isimli karışımın açılımı % 90 K + % 10 UK'dır. Bu karışımdaki kuru madde miktarları ağırlıkça % 90 K zemine % 10 UK atık ilavesi şeklinde hesaplanmıştır. Katılan malzeme cinsi ve miktarlarına göre karışım isimleri farklılık göstermektedir.

Karışıma girecek katkı yüzdesine göre zemin ve katkı ağırlığı bağıntı (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Bulunmak istenen diğer malzeme ağırlığı ise aşağıdaki (3.1) bağıntısından çekilerek elde edilmiştir.

$$KY = \frac{M_k}{M_z + M_k} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada;

KY: Katkı yüzdesi, %,

M_k : Katkı miktarı, g,

M_z : Zemin miktarı, g.

Kompaksiyon ve diğer deneylerde kullanılan atık (katkı) miktarları Tablo 3.13'te belirtilmiştir.

Tablo 3.13. Zemnlere ilave edilen katkı miktarları ve uygulanan deneyler

Deneyler	Katkı miktarı (%)						
	0	5**	10	15	20	30	40
1. Özgül ağırlık, (Gs)	5*x2			6x2	6x2		
2. Dane çapı dağılımı	5x2			6x2	6x2		
3. Kıvam limitleri, (w_L , w_p ve I_p)	5						
4. Zemin ve atıkların sınıflandırması	5						
5. Kimyasal analiz, (XRF)	5						
6. Mineral içerik, (XRD)	5			6x3			
7. Mikro yapı, (SEM)	5x4			6x3			
8. Sıkıştırma (kompaksiyon), (w_{opt} , γ_{kmax})	2	6	6	6	6	6	6
9. Düşen düzeyli geçirimsizlik	2		6		6		
10. Kaliforniya Taşıma Oranı, (Islak CBR)	2	6	6	6	6		
11. Serbest Basınç, (SB)	2	6x2	6x2	6x2	6x2		
12. Esneklik modülü, (M_R)	2			6			

Not: Gri renkli kutu içindeki rakamlar başarılı deney sayısını, x: Deney tekrar sayısını göstermektedir. w_{opt} : Optimum su içeriği, γ_{kmax} : Maksimum kuru birim hacim ağırlık. *Katkısız numune sayısı: (2 zemin + 3 atık =) 2+3= 5, **Katkılı karışım sayısı: (2 zemin x 3 atık =) 2x3= 6

3.3.3. Karışımların kürlenmesi

Katkı ile zemin iyileştirmede, karışımları oluşturan katı maddelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre su ilave edilince, bileşenlerinin birbirleri ile çeşitli reaksiyonlara (3.2, 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6) girmesinden sonra karışımın fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde değişimler olur. Bu değişimlerin oluşabilmesi için zemin-katkı karışımlarının sabit nem ve sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmesi gerekebilir. Bu bekletme işlemine kürlenme veya kr, işlemin oluşabilmesi için gerekli olan kısa veya uzun zamana da kr süresi denilmektedir.

Zemin iyileştirme çalışmalarında karışımlar hazırlanırken önce zemin ve katkı maddesinden oluşacak numunelerde en iyi sıkışmanın sağlandığı su içeriği (w_{opt}) belirlenir. Karışım numuneleri hazırlanırken kullanılacak w_{opt} zemin ve katkı özelliklerine bağlı olarak kimyasal reaksiyonlara sebep olup daneler arası bağlar oluşturabilir. Bu oluşum “imentolanma” reaksiyonudur (3.6) ve zemin-atık karışımlarında mukavemet artışları olarak kendini gösterir.

Kr süresi ve kr sırasında kullanılacak sıcaklık için literatüre bakıldığında hidrolitik bağlayıcı ve puzolanik madde katkılı zeminlerde en yüksek dayanımın sağlandığı uygun kr süresi ve/veya sıcaklığı bulmak için birçok çalışma yapılmıştır (Lee vd., 1993; Misra vd., 2005a; Cömert vd., 2008). Banks vd. (2001) imento ile derinde bulunan yumuşak bir zemini iyileştirmişlerdir. Çalışmada numuneler 112 güne kadar saf (destil) suda kürlenmiştir. Sonuçta dayanımlarda (q_u) artışım en yüksek 7 gün ile 28 günde olduğunu gsermişler. Ancak su içinde krlenirken zaman içinde serbest basınc (SB) numunelerinin yumuşamasına neden olduğunu bildirmişlerdir.

Baykal vd. (2006) bir çeşit donmuş su olan kar ile zemin iyileştirmede hazırladıkları karışımlar içinde daha fazla su tutulabildiğini göstermiştir. Kar malzemesi puzolanik uçucu külün hidrasyon süreci için ihtiyaç duyduğu suyu yavaş yavaş ortama bırakmıştır. Buna bağlı olarak puzolanik reaksiyon için daha fazla su barındıran karışımın dayanımı beklenenden daha fazla olmuştur. Misra vd. (2003) 7 ve 28 gün süreyle, 36 °C sıcaklıkta naylon torba içinde, ayrıca 27 °C ve % 80 nispi nemde ve atmosferik ortamda tutarak kr uygulanan kl-bentonit-kil karışımıyla çalışmalar

yapmıştır. Sonunda bu konuda yapılmış diğer çalışmalarda olduğu gibi, karakter olarak zemin iyileştirmenin kür süresine, kür şartlarına ve kil mineralojisine bağlı olduğu sonucuna varmıştır.

Kürün baştan w_{opt} 'a ilave yüzde 2-5 su ile yapıldığı çalışmalar (Trzebiatowski vd., 2004) olduğu gibi kür sırasında dışardan numuneye nispi nem şeklinde buhar (Ghosh, 2006) veya tabandan emdirme (Banks vd., 2001) şeklinde su ilaveleri de denenmiştir. Bu çalışmalarda genellikle sıcaklık ve nispi nem kontrollü kür sandıkları (environmental chamber, moisture chamber) kullanılmıştır. Bekleme süresince sabit sıcaklık ve nem sağlayan sandık içindeki raflara dizili numuneler ya serbest su düzeyinin 1-2 cm üzerinde tutularak nispi nem şeklinde buhar ile kürlenmiş ya da 1-2 mm suya batırılarak kapasiteleri ölçüsünde su emerek kürlenmiştir.

Arazide uygulama sırasında, kalınlığı 1.5-2 m, daha kalın veya kütle şeklindeki dolgu tabakalarına iyileştirme amacıyla sonradan su ilave edilmesi oldukça zordur. Zemin-atık karışımlarına katkı olarak katılan bağlayıcıların sonraki günlerde reaksiyon için ihtiyaç duyacağı su karıştırma anında katılan w_{opt} ile sınırlı kalacaktır. Bu nedenle dolguyu temsil eden deney numunelerinin herhangi bir şekilde su ilave edilmeyen ortamda bekletilmesi gerçeğe daha yakın bir modelleme olacaktır (Trzebiatowski vd., 2004). Ayrıca dolgu iyileştirilmesinin başarısı da sıkıştırmada kullanılan suyun kür süresince kaybedilmemesine bağlıdır. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada kür sırasında numunelere w_{opt} 'dan fazla su ilave edilmemiş bununla beraber mevcut su içeriğinin kaybedilmemesi için azami özen gösterilmiştir.

Sıkıştırma deneyi ile elde edilen kuru birim hacim ağırlığının maksimum (γ_{kmax}) olduğu noktada w_{opt} bulunur. Bu nokta karışım (dolgu zemin) boşluk hacminin en az olduğu aynı zamanda kayma dayanımının en yüksek ve yapı yüklerini taşımak için dolgu taşıma kapasitesinin en yüksek olduğu noktadır (Mollamahmutoğlu, ve Kayabalı, 2006). Sonuç olarak sıkıştırma (kompaksiyon) zeminin CBR ve SB dayanımını fiziksel yöntemle arttırılmasıdır.

Diğer bir yöntem zemin malzemelerine puzolanik ve hidrolik bağlayıcılar katılarak mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Kuru zemin-katkı karışımına katılan

suyla reaksiyona girmesi neticesi oluşur. Baştan bağlayıcı özelliği olan veya sonradan bağlayıcılık özelliği kazanan katkılar, suyunda yardımı ile çeşitli reaksiyonlar sonucu zemin danelerini birbirine bağlar. Böylece dane çapları büyüyen zeminin kayma dayanımı artar ve dolayısıyla mekanik özellikleri iyileşir. Bu nedenle kür süresince karışımların suyunu kaybetmemesi çok önemlidir (Cömert ve Fırat, 2008).

Kür sürecinde karışımlarda oluşan reaksiyonlar polimerizasyona benzer. Polimerizasyon monomer birimlerinden başlayarak polimer birimlerinin elde edilmesine yol açan reaksiyonlardır. İyileştirmede uçucu kül bir puzolan olarak kullanılıp kalsiyum içeren malzemelerle reaksiyona girerek polimerizasyon işlemi sonucu kalsiyum silikat ve alüminyum silikat hidratları oluşturmak için kullanılabilir. Bu işlemle jel olarak da tabir edilen hidratları oluştururken puzolan aynen portland çimentosu hidrasyon mekanizması gibi çalışır ve ikisinin de (uçucu kül ve portland çimentosu) sonuçları benzer kimyasal etkilerle oluşur. Puzolanik reaksiyonun kimyasal formülleri (3.4) ve (3.5) eşitliklerinde verilmiştir (Chen ve Lin, 2009).

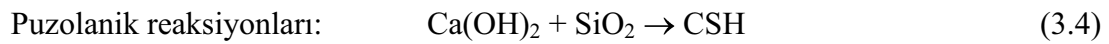
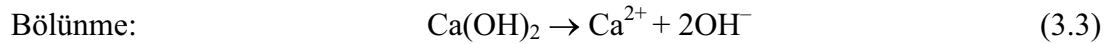
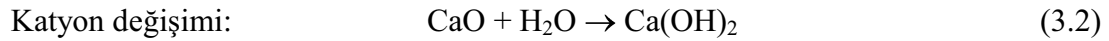
Kezdi (1979) ve Little (1995) çimento ve işlenmemiş zemin karışığında oluşan hidrasyon reaksiyonu sonucu karışımın pH değeri Ca^{2+} ve serbest $Ca(OH)_2$ miktarı azalmasının puzolanik reaksiyona bağlı olduğunu bulmuşlardır.

Chen ve Lin'e (2009) göre Portland çimentosu suyla karıştırılınca, ilk önce hidrasyon reaksiyonu başlar ve zeminde bulunan kalsiyumun hızla topaklanması ile sonuçlanır. Sonra killi zemin, karışımdan serbest bırakılmış kalsiyum iyonlarını (Ca^{2+}) etkili biçimde bağlar. 12 saat içinde (katılaşma) zemin içinde yerleşen çimento kalsiyum miktarını azaltır. Bu nedenle (3.2) ve (3.4) eşitliklerinde görüldüğü gibi $Ca(OH)_2$ ve CSH hidratları oluşurken kalsiyum ve su miktarı azalır. Bu da çimento ve puzolan gibi bağlayıcılarla zemin iyileştirilmesinde kalsiyumun temel ihtiyaç olduğunu gösterir. Çimento bu şekillenme (sertleşme) sürecini bağlanmamış (serbest) kalsiyum tamamen bitene kadar sürdürür.

Ene ve Okagbue (2009) piroklastik (Volkanik aktiviteler sırasında ortaya çıkan kül, kum, çakıl gibi taneli malzeme) tozu ile zemin iyileştirmesi yapmışlardır. Deney

sonuçlarına göre zemine katılan toz miktarı arttıkça tozlar kil parçacıkları üzerinde tabaka oluşturmuş, kil parçalarını bir araya getirip bağlamış ve kil matrisini doldurmuş olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumun, boşluk hacminin ve w_{opt} 'da arttırmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda plastikliğin azalması ve matrisin daha gevrek olmasına sebep olduğuna işaret etmişlerdir.

Kireç-zemin karışımları ile yapılan çalışmalarda w_{opt} artması gözlenir (Bell, 1989; Little, 1995; Al-Rawas vd., 2005; Cömert, vd., 2005a; Güney vd., 2007). Kür sırasında oluşan mekanizma Bell (1989), Ene ve Okagbue (2009) tarafından katyon değişimi ve kil plaklarının flokülasyonu (suda çözünebilir taneciklerin, yüksek molekül ağırlıklı organik polimerlerle bir araya getirilmesi), aglomerasyon (bütünleşme) ve puzolanik reaksiyonları ile açıklanmıştır. Kireç ve su ile işlem görmüş, kalsiyum oksit ve silika (SiO_2) içeren killi zeminlerin iyileşirken oluşan fiziko-kimyasal mekanizmalar büyük çoğunluğunun aşağıdaki reaksiyonlardan oluştuğu belirtilmektedir (Kinuthia, 1997; Muntohar ve Hantoro, 2000; Ene ve Okagbue, 2009).



Burada: S = SiO_2 , H = H_2O , A = Al_2O_3 , C = CaO, N = Na_2O , CSH = kalsiyum silika hidrat ($CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$) ve CAH = kalsiyum alümina hidrat ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$), İÜ= indirgenme ürünleri (ısı enerjisi, serbest kalan su vb.).

Bu eşitliklerden katyon değişimi (3.2) ve bölünme (3.3) reaksiyonları hızlı gerçekleşir ve plastisite, işlenebilirlik ve su emme özelliklerini kısa süre içinde değiştirir. Zemin içindeki kum boyutlu daneler ve kil minerallerdeki alterasyonun (mineral yapı değişimi) artması ve su emmenin azalması buna bağlıdır (Ene ve Okagbue, 2009).

Zemin-katkı karışımında iyileştirmedeki amaç dayanımda değişimin artış yönünde olmasıdır. Ancak kür süresince birbiri ile reaksiyona giren zemin ve katkının özelliğine bağlı olarak karışımın dayanımında artma olabileceği gibi azalma da görülebilir (Fırat ve Cömert, 2011).

Önceki çalışmalarında UK ile zemin iyileştirmesi su kaybını önlemek için numunelerin naylon poşete konması (Misra, 2003; Kalinski ve Hippley, 2005; Rupnow, vd., 2010), naylonla (streç filmle) sarılması (Trzebiatowski vd., 2004), naylonla sarılmış veya naylonsuz desikatörde bekletilmesi (Bera vd., 2009) uygulanmış yöntemlerdir. Bu çalışmada kür sırasında oluşacak reaksiyon için gerekli su karışıma ilave edilen w_{opt} ile sağlanmıştır. Tanımlama deneyleri sırasında numuneler (SB veya CBR) ebadına göre desikatörde veya dolapta kürlenmiştir (Şekil 3.15a ve b). Numune tanımlama deney sonuçları bekletme yerlerinin desikatör veya dolap içinde olmasının SB dayanımlarını değiştirmedeği görülmüş, tanımlama deneylerinden sonraki süreçte bütün numuneler naylon poşet içine konulduktan sonra ani sıcaklık değişimine uğramayacakları uygun bir dolapta bekletilmiştir (Pezo ve Hudson, 1994) (Şekil 3.15b). Su kaybını önlemek için 3.8 cm çap ve 7.6 cm boyunda serbest basınç numuneleri ağzı bağlı (düğümlü) naylon poşete konup dolap içinde, CBR karışımları paslanmaz CBR kalıpları içinde olduğu halde çift plastik poşete konup ağzı bağlanarak dolapta kür sürelerini tamamlamıştır.



a)



b)

Şekil 3.15. a) Tanımlama deneyleri sırasında serbest basınç numuneleri desikatörde bekletilmesi
b) Üstte serbest basınç numuneleri, altta CBR numunelerin dolap içinde kürlenmesi

Kür süresince numune bulunan dolap ve desikatörler 20 ± 2 °C laboratuvarında tutulmuş, numunelere ilave su veya nispi nem şeklinde buhar uygulanmamış ve direk güneş

ışığı gelmesi önlenmiştir (Şekil 3.15b). Numunelerin naylon poşete konulma yöntemi daha önce bu konuda yapılan çalışmalar doğrultusunda ve iyileştirme konusunda KTŞ (2006)'da verilen tavsiyelerden biri olan “Arazi uygulamasından nemini kaybetmemesi için sıkıştırılan zeminin 7 günlük serbest basınç deney numunesi alınana kadar yol katmanı branda ile örtülmelidir.” tavsiyesinden yola çıkarak geliştirilmiştir. Bu çalışmada karışımlara yapılan tüm deneyler ve uygulanan kür süreleri Tablo 3.14'te gösterilmiştir.

Tablo 3.14. Zemin-atık karışımlarına yapılmış deneyler ve uygulanan kür süreleri

Deneyler	Kür Süresi (gün)						
	Kürsüz	1	7	28	56	90	112
1. Mineral içerik, (XRD)			6	6			6
2. Mikro yapı, (SEM)							6x3
3. Kimyasal analiz, (EDX)							5
4. Sıkıştırma (kompaksiyon), (w_{opt} , γ_{kmax})	36+2**						
5. Özgül ağırlık, (Gs)				12x2			
6. Dane çapı dağılımı				12x2			
7. Düşen düzeyli geçirimsizlik	12+2						
8. Serbest Basınç, (SB)	2	26x2*	26x2	26x2	26x2	26x2	26x2
9. Kaliforniya Taşıma Oranı, (Islak CBR)	26*+2			26			
10. Esneklik modülü, (M_R)	6+2						

Not: Gri renkli kutu içindeki rakamlar başarılı deneylerin sayısını, x: Deney tekrar sayısını, +2: K ve T zemin numunelerine de deneyin uygulandığını göstermektedir. w_{opt} : Optimum su içeriği, γ_{kmax} : Maksimum kuru birim hacim ağırlık. *Katkılı karışım sayısı: (2 zemin x 3 atık x 4 oran =) 2x3x4 = 26, **Sıkıştırılan karışım sayısı: 6x6=36

3.3.4. Sıkıştırma (kompaksiyon) deneyi

Sıkıştırma (kompaksiyon) deneyi, optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının (γ_{kmax}) bulunması için yapılan deneydir.

Yol üstü yapı tabanını oluşturan dolgu malzemesinin sıkışma parametreleri elde edilirken deneyde standart (Proktor) enerjisi kullanılır (KTŞ, 2006). Bu çalışmada zemin sıkıştırma deneyi TS 1900-1/2006'ya göre yapılmış, K ve T zeminleri standarttaki ilgili çizelgede (Tablo 3.12) A grubuna girmiştir. Standart enerji, 30.5 cm yükseklikten 2.5 kg'lık tokmakla her kademeye eşit dağıtılan 25 düşü ve üç kademeli sıkıştırma ile elde edilmiştir. Numuneler bu şartları sağlayan ve istenen düşü sayısı elde edildiğinde otomatik olarak durabilen sıkıştırıcı (kompaktör) ile sıkıştırılmıştır (Şekil 3.16). Yaka takılmış kalıpta numunenin 3 katmanı sıkıştırıldıktan sonra yaka çıkarılır. Sıkıştırılmış haldeki son tabakanın silindirik

kaptan taşan kısmı 0.6 cm olmalıdır. Bu fazlalık keskin kenarlı lamayla kesilir ve eğer varsa spatula ile kesilen yüzeydeki büyük boşluklar doldurularak düzeltilir.

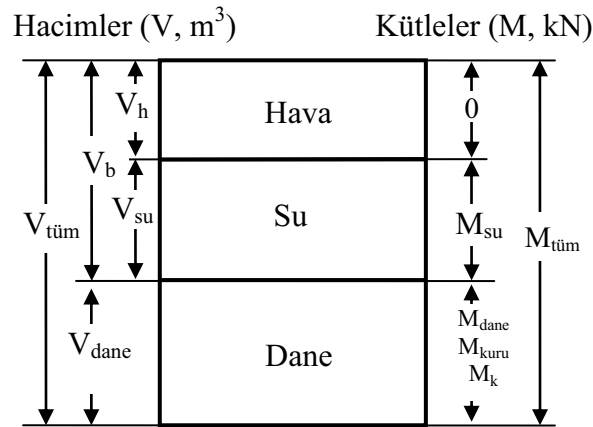


Şekil 3.16. Otomatik sıkıştırıcının genel ve yakından görüntüleri

Karışımların w_{opt} ve γ_{kmax} değerleri TS 1900-1'e göre hesap edilmiştir. Tanımlama deneylerinde % 40'a kadar farklı yüzdelerde atık ilavesiyle deneyler yapılmış, % 15 atık katkılı karışımlarda en yüksek SB dayanım değerleri elde edilince çalışılan atık oranları % 0, 5, 10, 15 ve 20 olarak uygulanmıştır.

3.3.5. Özgül ağırlık deneyi

Şekil 3.17'de katı olarak gösterilen bölüm, zemin iskeletini oluşturan danelerin net toplam kütle hacmidir. Mineral içeriği farklı olduğundan, bu değerler değişebilir. Minerallerin 20 °C sıcaklıkta 1 m³ dane hacmine (V_{dane}) karşılık gelen kN cinsinden net (dane) kütle sine (M_{dane}) dane birim hacim ağırlığı (γ_d) denmektedir (Yücel vd., 2004). Burada: V_{dane} , dane hacmi; V_h , hava hacmi; V_{su} , su hacmi; V_b , boşluk hacmi, V_h+V_{su} ; $V_{tüm}$, tüm zemin hacmi, $V_{dane}+V_b$; M_{su} , suyun kütlesi; M_{dane} , M_{kuru} , M_k , dane kütlesi; $M_{tüm}$, tüm zemin kütlesi, $M_{su}+M_{dane}$ 'dir. TS 1900, (2006) ve TS 1900-1/T1 (2007) ile "Bağıl Yoğunluk" olarak ta ifade edilen özgül ağırlık (Gs), dane birim hacim ağırlığının, suyun birim hacim ağırlığına ($\gamma_{su} = 9.8 \text{ kN/m}^3$) oranı olarak tarif edilir ve boyutsuzdur.



Şekil 3.17. İki boyutlu blok diyagram (Yücel vd., 2004; Uzuner, 2007)

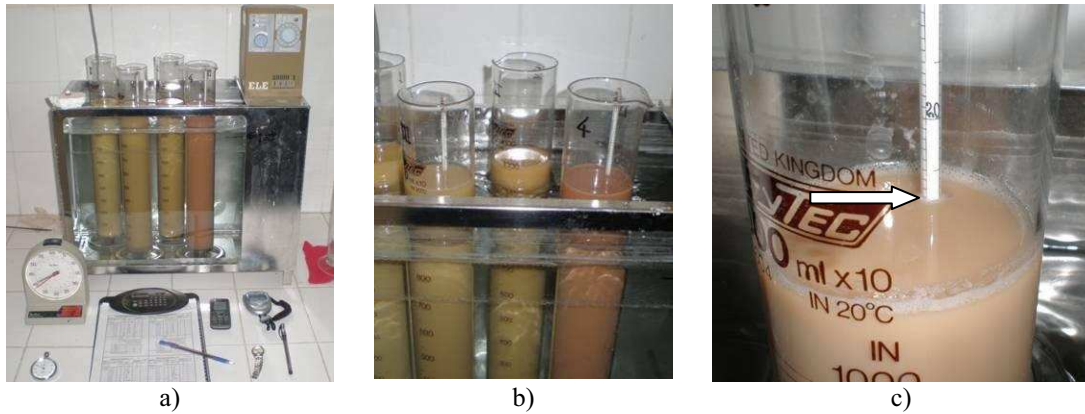


Şekil 3.18. Cam piknometreler ve numunelerin piknometre ile özgül ağırlıklarının tespit aşamaları

Bu çalışmada özgül ağırlık deneyleri 100 ml ve 250 ml cam piknometreler ile TS 1900-1/2006'ya göre yapılmıştır (Şekil 3.18). Numunelerdeki havanın alınması için piknometreler desikatöre dizilip vakumlanmıştır.

3.3.6. Elek analizi ve hidrometre deneyi

Bir zemin ve toz atık malzemenin dane çapı dağılımı, elek analizi ve hidrometre deneyleri ile saptanabilir. Bu çalışmada ıslak elek analizi ile 0.075 mm'den daha büyük danelerin dane çapı dağılımı bulunmuş, 0.075 mm'den daha küçük danelerin dane çapı dağılımı ise hidrometre metoduyla saptanmıştır. Laboratuvarında yapılan ıslak eleme ve hidrometre analizi TS 1900-1/2006 standardına göre yapılmıştır. Şekil 3.19.a'da hidrometre deney düzeneği, Şekil 3.19.b'de ölçü silindiri içinde hidrometreler ve Şekil 3.19.c'de hidrometre menüsküs okuması görünmektedir.



Şekil 3.19. a) Sıcaklık kontrollü hidrometre havuz düzeneği, b) Mezürlerin içinde hidrometreler ve c) Hidrometre (menüsküs) okuması

3.3.7. Kıvam limitleri deneyi

Zemin ve atık malzemeleri TS1500/2000'e göre plastisite kartındaki yerini bularak sınıflandırmak için likit limit, plastik limit ve plastisite indisi tespit edilmiştir.

Killer ve kil içeren kuru karışımlar, suyla yoğrulduklarında toz görünümünden çamura, su miktarı daha da arttırılırsa, sıvıya dönüşebilirler. Bu özellik değişimine kıvam denmektedir. Bu kıvamların limitlerdeki su muhtevasını belirlemek amacıyla kıvam limiti deneyleri yapılır. Atterberg limitleri olarak da anılan bu özellik malzemenin plastiklik ve likitlik kıvamları arasındaki su muhtevalarını belirleyen deneylerdir. Kıvam limitleri, ince daneli malzeme içeriğinin sınıflandırılmasında, şişme karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır (Yücel vd., 2004).

Karışım likit limit (w_L) ve plastik limitleri (w_P) TS 1900-1/2006'ya göre bulunmuştur. Bu çalışmada kullanılan atıkların silt içeriğinin fazla oluşu nedeniyle karışımlara ait w_L değeri TS 1900-1/2006'da yedek metot olarak verilen düşen koni cihazının kullanıldığı deney yöntemi ile bulunmuştur.



Şekil 3.20. Düşen koni aleti ile likit limitin bulunması, a) Malzemenin su ile karıştırılıp deney kabına konulması, b) Batma miktarının ölçümü, c) Üç batma sonrası numune görünümü

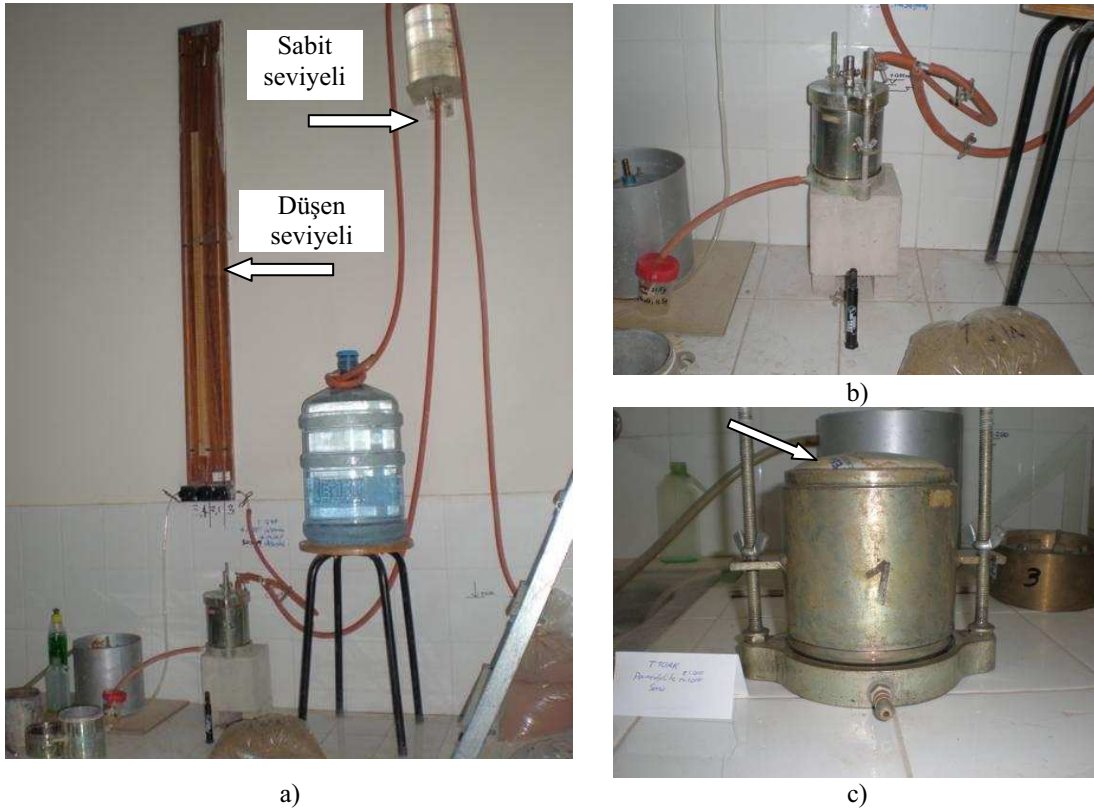
Şekil 3.20a,b,c'de likit limit deneyi numune hazırlama işlem basamakları ve kullanılan düşen koni aleti görülmektedir. Çalışma prensibi, kap içine konulan zemine/malzemeye bir koninin 5 saniye süre ile batmasına izin verilmesidir. Bu şekilde yüzeyde farklı üç noktadan ölçülen batma miktarının ortalaması likit limit değerini verir. Bu yöntem kişisel hataların en aza indirildiği likit limit deneylerinden biridir. Bulunan w_L ve hesaplanan plastisite indisi (I_P) değer sonuçları plastisite kartına işlenerek malzemelerin ve zemin-atık karışımının sınıflandırılması yapılmıştır.

3.3.8. Geçirimsizlik (Permeabilite) deneyi

Geçirimsizlik deneyleri ile zemin ve zemin-atık numunelerinin suyu geçirme karakterini gösteren geçirimsizlik katsayıları bulunmuştur. Geçirimsizlik (permeabilite) deneyleri TS 1900-2/T1/2007'e uygun olarak yapılmıştır. Numuneler otomatik sıkıştırma (kompaksiyon) makinesi ile standart Proktor kalıplarına sıkıştırılarak hazırlanmıştır.

Şekil 3.21a'da görülen düzeneğe yerleştirildikten sonra su deney numunesine üstten verilmiştir. Atıkların her biri ile hazırlanan zemin-atık karışımları ile yapılan ön geçirimsizlik deneylerinden önce numuneler doymun hale getirilmiştir. Doymun hale geldiklerini anlamak için numunelerden birim zamanda geçen su miktarının (debinin)

sabitleşmesi beklenmiştir. Tüm karışım numunelerinin doymun hale gelmesi en fazla 4 gün sürmüştür. Bu nedenle doymunlaştırma tüm numunelerde 4 gün uygulanmıştır. Numuneler düzeneğin sabit seviyeli geçirimlilik kısmında ve bu kısımda kullanılan su basıncı altında doymun hale getirilmiştir (Şekil 3.21b).



Şekil 3.21. a) Permeabilite düzeneği, b) Numunenin doymun hale getirilmesi, c) Deney sonunda T zeminin belirgin şişme görünüşü

Doymun hale gelen numune üzerinde düzeneğin düşen seviyeli kısmı devreye alınarak farklı zaman aralıklarında düşen su düzeyi mm cinsinden ölçülmüştür. Standarttaki (TS 1900-2/T1/2007) (3.7) eşitliği kullanılarak geçirgenlik katsayısı hesaplanmış, yapılan deneylerin ortalaması alınarak karışımın geçirimlilik katsayısı (k) bulunmuştur. Permeabilite deneyleri % 0, 10 ve 20 atık katılmış karışımlara uygulanmıştır.

$$k=2.3 \frac{aL}{At} \log_{10} \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H} \right) \quad (3.7)$$

Burada;

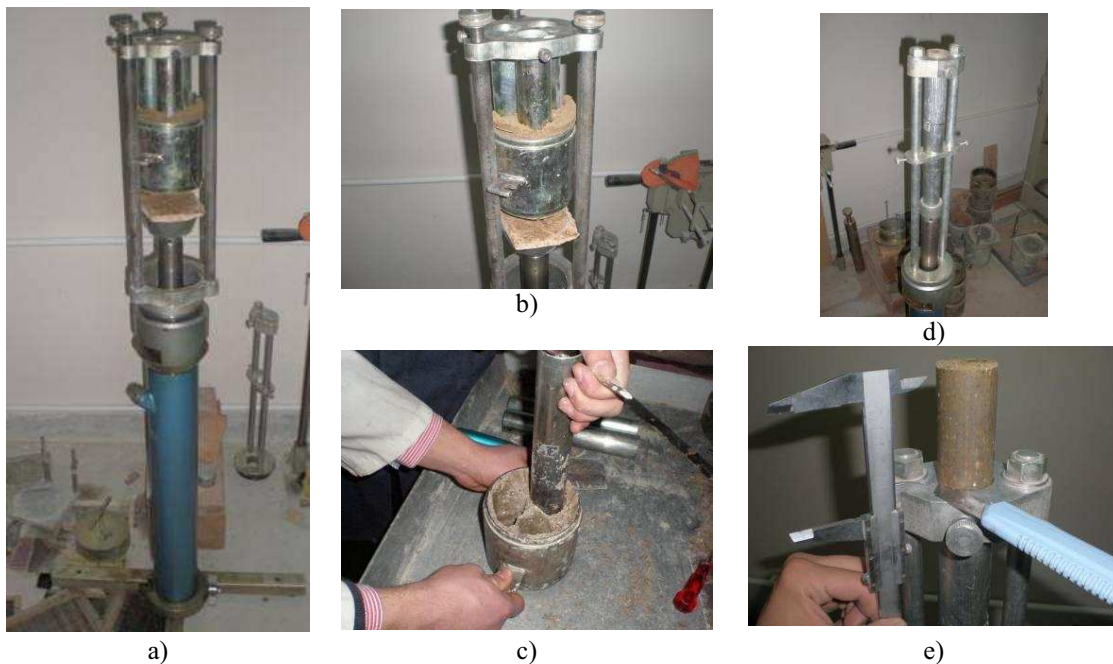
- a: Su seviyesi düşüşünün izlendiği cam tüpün kesit alanı, cm^2 ,
L: Sıkıştırılan numune yüksekliği, cm,

- A: Silindirik kalıbın kesit alanı, cm^2 ,
 t: Deney süresi, sn,
 H_0 : Kalıbın altındaki su çıkış deliği ile su seviye göstergesinin sıfır noktası arasındaki düşey mesafe, cm,
 ΔH : t deney süresi sonunda cam tüpteki düşüş miktarıdır.

3.3.9. Serbest basınç (SB) deneyi

Yolun temel ve alt temel tabakalarında olduğu gibi dolguda da kullanılacak zeminlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde mukavemet ve taşıma gücü tespiti önemlidir.

Bu çalışmada numunelere serbest basınç dayanımı hızlı test de denilen serbest basınç (SB) deneyi ile ölçülmüştür. Deney TS 1900-2/2006'ya uygun olarak zemin ve zemin-atık karışımlarına yapılmıştır. Numune hazırlık aşamaları şunlardır: w_{opt} kadar su katılmış zemin veya zemin-atık karışımı sıkıştırma kalıbında standart enerji ile sıkıştırılmıştır. Kriko ve üç numune silindirini (CU tüpü) tutan başlık kullanılarak üç adet numune silindiri sıkıştırma kalıbındaki karışıma saplanmıştır. Numune silindirleri kalıptan ayrılmıştır. Silindir içinden 3.8 cm çapında numuneler kriko ucundaki pistonla itilmiş boyları en az 7.6 cm olacak şekilde kesilmiştir (Şekil 3.22).

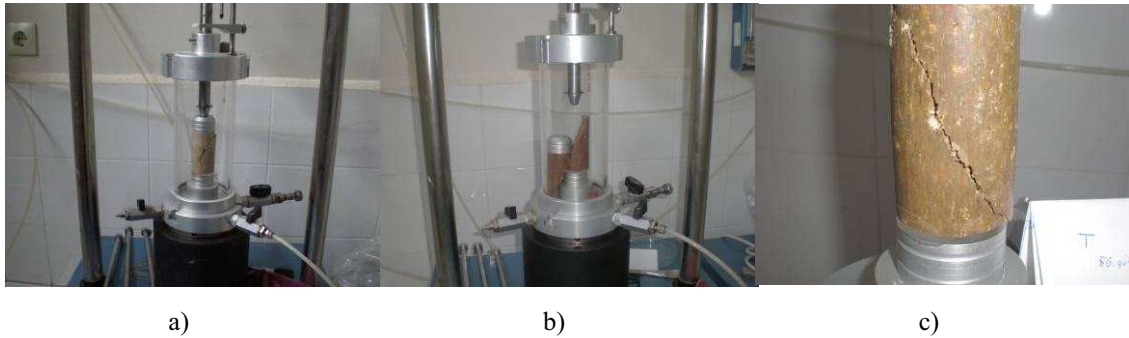


Şekil 3.22. Serbest basınç numunelerinin standart Proktor kalıbından çıkartılması, a) Numune çıkarıcı (kriko), b) Üç numune silindirinin karışıma saplanması, c) Numune silindirlerinin kalıptan ayrılması,

d) Numune çıkarıcı ile numune silindirinden numune çıkartma, e) Pistonla itilen numunenin ölçüsünde kesilmesi

Serbest basınç deneyi hazırlanmış silindir numuneler üzerine sadece düşey yönde yük uygulanarak yapılır (Şekil 3.23a). Numune kırılıncaya kadar düzenli düşey kısalma aralıklarında düşey kuvvet halkası okumaları alınır (Şekil 3.23b). Yenilme anındaki kesit alanın kuvvet halka katsayısı ile okumalar yüke (kN) çevrilmiş değere bölünmesi ile dayanım (kPa) hesaplanmıştır. Kırılma anına kadar yanal şişme ve kaymalar meydana gelmiş, yenilme anındaki en büyük dayanım karışımın maksimum serbest basınç dayanımı olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.23a, b ve c).

Serbest basınç deneyi, desteksiz olarak kendini tutabilen zeminlerde uygulandığından dolayı killi zeminler için uygundur. Deneyde tek eksenli, hızlı yükleme ile drenajsız kayma mukavemeti bulunur. Bu kısıtlayıcı yönüne karşın, serbest basınç deneyi drenajsız kayma mukavemetini belirlemede yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemidir (Yücel vd., 2004).



Şekil 3.23 Serbest basınç numunelerinin kesilmesi a) Yenilmiş numune, b) Tam kesilmiş yenilmiş numune, c) Kesilme düzlemi

Çeşitli oranlarda kil içeriğine sahip kalıp kumu ile yapılan bir çalışmada, ilave malzemelerle karıştırılarak sıkıştırılmış kalıp kumu numunelerinin serbest basınç direncinin; su içeriği, boşluk suyunun kimyasal bileşenleri ve danelerin birbirlerine dokunması ile oluşan içsel kuvvetlerin bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. İyileştirme karışımın dayanımı için serbest basınç dayanımının önemli bir gösterge olduğu ve zemin-katkı karışımının kalitesinin, serbest basınç mukavemet değeri ile yorumlanabileceği öne sürülmüştür. Atık malzemelerin yol alt yapısı olarak kullanılabilmesi için serbest basınç değerleri fikir verici nitelikte olduğu ve kür

edilmiş karışımların mukavemet değerleri iyileştirilmiş karışımın kalitesini yansıttığı gözlemlenmiştir (Yücel vd., 2004).

KTŞ (2006)'da eğer dolguda kullanılacak malzeme, zemin ve belli oranda puzolanik bir bağlayıcı veya atık (çimento, kireç, uçucu kül vb.) ile hazırlanacak karışım ise serbest basınç (SB) deneyi 7 gün ve 28 gün kürlenmiş numuneler üzerinde yapılması istenmektedir.

Bu çalışmada serbest basınç dayanımı deneyleri % 0, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında atık katılarak hazırlanmıştır (Tablo 3.13). SB deneyleri her kür süresi için yeterli sayıda numune hazırlanarak 0, 7, 28, 56, 90 ve 112 gün kür sonunda yapılmıştır (Tablo 3.14). SB deneyleri üçeksenli test cihazında hücre basıncı olmadan sadece düşey eksenenden yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.23).

3.3.10. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi

Yolun dolgu katmanlarında kullanılacak zeminlerin taşıma gücü Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi ile tayin edilir. Zemine yapılan CBR ve ıslak CBR deneyleri maliyeti düşük ve yapılması kolay olduğundan pratikte ve araştırmalarda en yaygın kullanılan mekanik deneydir (Şekil 3.24a).



a)



b)

Şekil 3.24 a) CBR deney aleti, b) Numunelerin suda bekletildiği su havuzu ve içindeki numene şişme miktarı ölçülürken, havuzda bekleme süresi bitmiş deneye alınacak bir numune suyu süzülürken görülmektedir

Bir süre suda bekletilerek doygun hale getirilen zeminin ıslak CBR değeri zeminlerin en kötü şartlar altındaki taşıma gücünü temsil eder (Şekil 3.24b). Bu nedenle araştırmalarda ve yürürlükteki karayolu şartnamelerinde mutlaka yapılması istenen bir deneydir.

Bu çalışmada zeminin en kötü durumunu modellediği kabul edildiğinden ıslak CBR deneyi kullanılmıştır. Deney 1900-2/2006'ya uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3.24a). Numune karışımlarına % 0, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında ayrı ayrı üç atık ilave edilmiştir (Tablo 3.13). Karışımlara daha önce tespit edilen w_{opt} kadar su ilave edilmiş mala ile karıştırılmıştır. Numune sıkıştırma işlemi kütlesi 2.5 kg tokmak ile üç kademede ve otomatik sıkıştırıcıda yapılmıştır. Karışımlar CBR kalıbını çeviren makine sayesinde her kademeye düzgün dağıtılan 61 vuruşla sıkıştırılmıştır. CBR numuneleri kendi kalıpları içinde ya hemen ya da 28 gün kürlendikten sonra suda bekletilmiştir (Tablo 3.14). Numunelerin 4 gün su havuzuna bekletilmesi sırasında her gün şişme miktarları kaydedilmiş, bunlar kullanılarak şişme yüzdesi hesaplanmıştır.

3.3.11. Esneklik modülü (M_R) deneyi

Esnek üstyapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için, düşey yükten dolayı oluşan gerilmelerin büyüklüğü ve frekansı (tatbik sıklığı), malzeme gradasyonu ve sıkıştırılma şartları gerçek ortam şartlarına en uygun şekilde dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla Proktor, CBR ve Tek eksenli basınç deneyleri tek başlarına gerçek malzeme davranışını belirlemede yeterli olmamaktadır. Trafikten kaynaklanan dinamik yüklerin de temsil edildiği daha karmaşık deney yöntemlerinin uygulanması burada önem kazanmaktadır. Tekrarlı yüklemeli üç eksenli deney cihazı, granüler malzemeler için gerilme durumuna en yakın modeli oluşturduğu için (kesme gerilmesi hariç) deneysel çalışmalarda tercih edilmektedir (Karaşahin, 1998). Deney % 15 katkılı karışımlar üzerinde kürsüz olarak yapılmıştır (Tablo 3.13 ve Tablo 3.14). Bu deney Bölüm 4'te detayları ile anlatılmıştır.

3.3.12. Kimyasal özelliklerin belirlenmesi (XRF)

X-ışınları Floresanı (XRF) spektroskopisi maddeyi oluşturan elementlerin kompozisyonu belirlemede kullanılan önemli yöntemlerden biridir. Hızlı, duyarlı, kullanım kolaylığı ve malzemeye zarar vermeme özellikleri göz önüne alındığında teknolojik ve bilimsel araştırmadaki önemi daha da artmaktadır.

XRF çalışma prensibi temel olarak eğer atoma yüksek enerjili bir X-ışını fotonu (elektromanyetik dalganın toplam enerjisini oluşturan demetçiklerinden her biri) düşürülecek olursa atomdan fotoelektronlar kopartılacaktır. Bu koşulda atomun yörüngelerinde bir ya da daha fazla elektron boşlukları oluşacak ve kararsız olan atom dış yörüngelerdeki elektronların boşlukları doldurması ile kararlı duruma gelecektir. Fakat her bir elektron boşluğu doldurmada atom orbital enerji farkı ile orantılı bir foton yayınlayacaktır. Atomun element türüne bağlı bu karakteristik foton enerjiler algılanarak kimyasal kompozisyonu nitel ve nicel olarak hesaplanabilir (XRF ve XRD Çalışma Prensibi, 2011).

Temin edilen atık malzemeler ve zemin numunelerin kimyasal analizi XRF analizleri özel bir laboratuvarında yaptırılmıştır.

3.3.13. Zemin-atık karışımlarının mineral özellikleri (XRD ve SEM)

Zemin iyileştirmede katkı ve zemin ile hazırlanan yol dolgu karışımı diğer malzemelerde olduğu gibi küçük yapı taşlarının bir arada durmasından, bir düzende dizilmesinden oluşur. Bilindiği üzere her yapı malzemesinde olduğu gibi zemin de bu dane dizilim ve içerdiği küçük parçaların birbirine olan konumlarına göre dış etkiler tepki gösterir.

Zeminlerin iskeletini oluşturan danelerin dizilimi gibi mineral özellikleri de, mekanik ve dinamik etkiler sonucu oluşabilecek zemin davranışı hakkında önemli ipuçları barındırır. Bu yüzden X-ışınları difraktometresi, XRD (X-Ray Diffraction) analizi ve Tarama elektron mikroskobu SEM (Scanning Electron Microscope) görüntülerinden yararlanılması artık araştırmalarda yaygınlaşan yöntemlerdir. Bu

çalışmada zeminlerin, atıkların ve bunların karışımlarının mineral özelliklerini tespit etmekte bu iki yöntemden de yararlanılmıştır.

XRD x-ışınları tarafından oluşturulan kırınım deseninden (difraktogram) atomik düzeyde bilgi edinmek için kullanılmaktadır. X-ışınları ölçümleri kristale zarar vermeksizin yapısı hakkında bilgi veren bir yöntemdir. X-ışınları difraktometresi günümüzde malzeme karakterinin belirlenmesi için endüstriyel ve bilimsel araştırmalarında; fizik, kimya, metalürji, madencilik, seramik gibi teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (XRF ve XRD Çalışma Prensipleri, 2011).

Bu çalışmada kullanılan zemin ve atıklar ayrı ayrı XRD analizleri yapıldıktan sonra karışım halinde bir araya geldiklerinde zemin ve atıkların mineral yapılarında değişim olup olmadığını görmek amacıyla XRD analizleri MTA Ankara laboratuvarlarında yaptırılmıştır. Numuneler Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi MYO İnşaat laboratuvarında hazırlanmıştır. % 15 katkı içeren karışımlar 7, 28 ve 112 gün kürlenip serbest basınç deneyine tabi tutulduktan sonra XRD analizi için bunlardan, alınan numune parçaları değişmez ağırlığa gelinceye kadar 110 ± 10 °C etüvde kurutulmuş, öğütme işlemi MTA'da yapılmıştır.

SEM günümüzde yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu mikroskopların ayırım gücünün çok yüksek olması nedeniyle minerallerin tanımlanması kolaydır. SEM çalışmaları ile minerallerin biçimi ile ilgili (morfoloji) yanında dokusal ilişkileri ve büyüme özelliklerinin de tanımlanması mümkündür. Bu mikroskoplarda yapılacak görüntü analizlerinde genelde 1000-35000 büyütme kullanılır ve numunelere Au-Pd (altın-paladyum) kaplamaları yapılır. Ayırım gücü olarak tanımlanan iki noktayı birbirinden ayırt edebilme yeteneği insan gözünde, aralarında 2.5 cm olan iki noktayı 100 m den ayrı ayrı görmeye yetecek kadardır. Bu nedenle görüntü sağlayan mercekle daha ince ayrıntıların görülebilmesine olanak sağlayan cihazlar geliştirilmiştir. Elektron-optik ilkeleri bir araya getirerek tasarlanmış SEM, bu cihazlardan biridir. Ayırım gücü, odak derinliği ve de görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği SEM'i araştırma ve incelemelerde geniş çapta kullanılan bir cihaz haline getirmiştir. Bunun yanında mikro işlemci ve

bilgisayarların mikroskopla birlikte kullanılmaları, incelenen numunelerin özellikleri, daha kesin ve ayrıntılı olarak ortaya çıkmaktadır. SEM'in en önemli özelliği odak derinliğidir. Özellikle biçimi ile ilgili ayrıntıların görüntülenmesinde bu özellikten yararlanır. Bu mikroskopta görüntü gözle görülenin büyütülmüş hali olduğundan sonuçların değerlendirilmesi oldukça kolaydır. SEM'de görüntü analog elektrik sinyalleri ile oluşturulduğundan bu sinyallerin ölçümü ve modifikasyonu elektronik devrelerle kolayca yapılır. Görüntüyü oluşturacak sinyallerin dijital (sayısal) hale getirilmesi ile de görüntü üzerindeki ölçüm ve analizlerin bilgisayarda yapılması mümkün olmuştur (Karakaya, 2006).

Bu çalışmada, SEM analizlerinde kür süreleri sonunda en fazla değişim gözleyebilmek amacıyla % 20 katkıli karışım serileri kullanılmıştır. 112 gün kür sonunda serbest basınç dayanımı tespit edilen numuneler etüv kurusu olarak MTA'da numune hazırlama (altın kaplama) işleminden sonra SEM cihaz yuvasına yerleştirilmiştir. Genel ve detay görünüm olmak üzere her numuneden en az iki mikro resim alınmıştır.

BÖLÜM 4. ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ ve KONTROLÜ

4.1. Giriş

Yapılması amaçlanan inşaat veya tesisin y yerdeki zemin her zaman yapıyı taşıyacak (temel) veya yapıyı oluşturacak (yol gövdesi) mühendislik özelliklerini taşımayabilir. Zeminler taşıma gücü zayıf; ileri derecede sıkışabilir nitelikte veya mühendislik ya da ekonomik bakış açısından yüksek derecede geçirgen olabilirler. Bu durumda yapılacak inşaatın yerinin değiştirilmesi düşünülebilir. Fakat yapı veya yolun yerini çoğu zaman geoteknikten başka şartlar belirlemektedir. Bu durumda mühendis yapıyı gösterilen yere yapmak zorunda kalmaktadır. Bunun için yaygın olarak kullanılan iki çözüm vardır. Biri, yapının temelini zemindeki geoteknik şartlara göre seçmek, diğeri, zeminin iyileştirilmesi (stabilizasyon) ile mühendislik özelliklerinin yeterli seviyeye getirilmesi sonra yapının gösterilen yere yapılmasıdır. İkisi arasında en ekonomik olanı genellikle ikinci seçenektir (Kayabalı, 2002).

İyileştirme başarısı ve seçilen yöntemin uygunluğu kontrol ile belirlenir. Kontrol işlemi, geoteknik araştırma ve jeofizik yöntemlerin kullanıldığı bir zemin etüdüdür. Kontrolde kullanılacak yöntem seçimi zeminin iyileştirilen özelliğine, iyileştirmede kullanılmış yöntem, iyileştirme bitmiş zeminin derinliğine, yüzey veya bir hat oluşuna göre değişebilir. Kontrol yönteminin tahribatlı veya tahribatsız olacağına da bu şartlara göre karar verilir. İncelenen özelliğin daha belirgin olduğu bir zemin etüdü olan zemin iyileştirme kontrolü için kullanılacak yöntem bu özelliklerin oluşturacağı amaç ve hedeflere göre seçilir.

4.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri

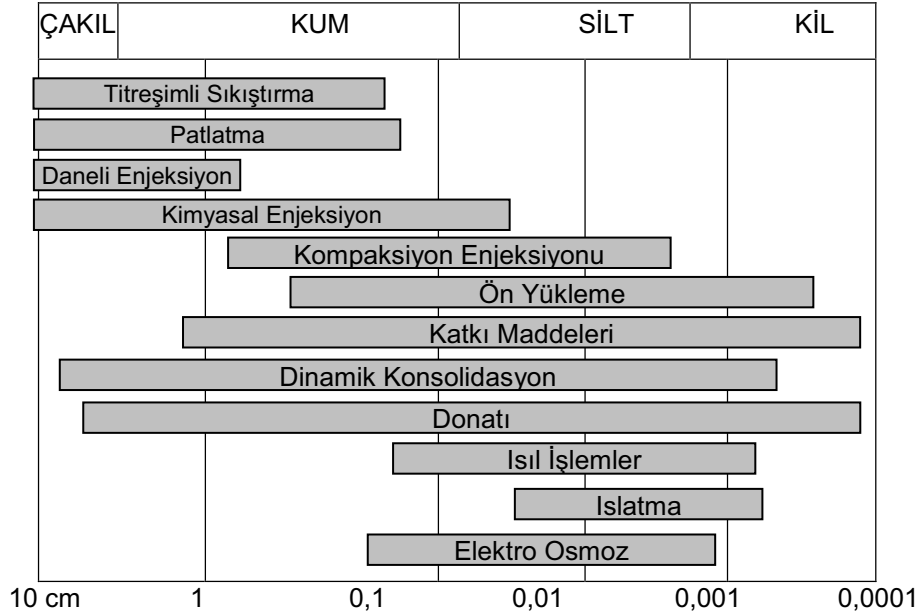
Bunlar genelde zeminin birden fazla özelliğini iyileştirmektedir. Bu nedenle bu yöntemleri belirli tek bir sınıflandırma sistemi içinde ve maddeler altında toplamak

uygun olmayabilir. Ancak en genel haliyle iyileştirme yöntemleri mekanik, ısı ve kimyasal iyileştirme olarak üçe ayrılmaktadır. Bunlardan ekonomik ve uygulaması kolay olan kireç, uçucu kül, çimento gibi katkı malzemeleriyle yapılan kimyasal iyileştirme yöntemleri bütün dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında kimyasal reaksiyon içermeyen sadece dane şekli ve dane boyutu avantajı ile mekanik iyileştirmede ocak ve taş tozların kullanımı da tercih edilmeye başlanmıştır. Karıştırma anında mekanik iyileştirme, bir süre geçtikten sonra da kimyasal iyileştirme özelliği gösterme olasılığı olan mermer tozu gibi, dünyada ortaya çıktığı ülkelerde çevre sorunu yaratan malzemelerin de kullanımı, kolaylığı ve ekonomik sebeplerden artmaktadır.

Zemin iyileştirme yöntemleri üç başlık altında toplanabilir (Conner, 1990; Gilliam ve Wiles, 1996; Yıldırım, 2002; Kayabalı, 2003; Cömert, 2005; Sağlamer, 2010).

1. Mekanik iyileştirme yöntemleri:
 - a) Derin kompaksiyon
 - i) Patlatmayla sıkıştırma
 - ii) Kompaksiyon enjeksiyonu
 - iii) Sondalı titreşim teknikleri
 - iv) Ağır tokmakla sıkıştırma
 - b) Ön yükleme ile iyileştirme
 - i) Ön konsolidasyon
 - ii) Drenaj ve drenlerle konsolidasyon
 - c) Ortamın donatılandırılması
 - i) Taş kolonlar
 - ii) Kompaksiyon kazıkları
 - iii) Ankraj ve çivileme tekniği
 - iv) Kök kazıkları
 - v) Kireç kuyularıyla iyileştirme
 - vi) Donatılı zemin (çelik, alüminyum, plastik vb.)
2. Isıl işlemlerle iyileştirme yöntemleri:
 - a) Dondurma yöntemleri
 - b) Yüksek sıcaklıkta iyileştirme
3. Kimyasal iyileştirme yöntemleri:
 - a) Enjeksiyon teknikleri
 - i) Daneli enjeksiyonu
 - ii) Kimyasal karışım enjeksiyonu
 - iii) Jet enjeksiyonu
 - b) Katkı maddeleri ile iyileştirme
 - i) İnorganik iyileştirme
 - Çimento

- Kireç
 - Bitüm
 - Uçucu kül
 - Alçı
4. Organik iyileştirme
- Organik polimerler
 - Biyolojik yöntemler



Şekil 4.1. İyileştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği (Önalp, 1983; Tunç, 2002; Mitchell ve Soga, 2005; Sağlamer, 2010)

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi dane çapı ile iyileştirme arasında önemli bir ilişki vardır. Çakıl ve kumlar için geçerli teknikler, ince daneli zeminlerde beklenen başarıyı sağlamamaktadır. Bunun en önemli nedeni olarak killerde yüzeysel kuvvetlerin etkin ve permeabilitenin düşük olması gösterilmektedir (Önalp, 1983). İyileştirme yönteminin seçiminde zemin dane çapı çok önemli bir göstergedir. Ayrıca mekanik ve/veya kimyasal etkilerin de göz önünde tutulması önemlidir. Bu çalışmada katkı maddeleriyle mekanik ve/veya kimyasal iyileştirme yöntemi kullanıldığından aşağıda bu yöntemler üzerinde durulmuştur.

4.2.1. Mekanik iyileştirme

Statik, vibrasyonlu ve darbeli aletlerle zeminin mekanik olarak sıkıştırılması, zemin boşluklarındaki havanın atılması ve dolayısıyla zeminin kayma mukavemetinin ve

borulanmaya karşı direncinin artırılması, permeabilitesinin ve sıkışabilirliğinin azaltılması, sıvılaşma riskinin düşürülmesi işlemidir (Sağlamer, 2010).

Mekanik iyileştirme iyileştirilecek zemine çeşitli katkıların uygun oranlarda karıştırılarak istenilen şartları sağlayan bir zemin haline dönüştürülmesidir. Bunda amaç zeminin yük altında ilk sıkışmasında gösterdiği kalıcı deformasyondan sonra tekrar deformasyonlara uğramaması yani oturmuş (stabil) bir zemin elde edilmesidir. İyileştirme katkıları suni veya tabii granüler malzemeler olabileceği gibi bir zemin veya farklı zemin karışımları da olabilir. Sıkıştırma (kompaksiyon) ile yük altında kalıcı deformasyon yapmayan bir zemin elde edilir. Sıkıştırmaya aynı zamanda yoğunlaştırma veya mekanik iyileştirme de denir. Sıkıştırmadan önce zeminin katkıyla karıştırılması yol şantiyesinde yerinde, sabit veya hareketli bir mekanik karıştırıcı (plent) ile veya malzeme ocağında değişik şekillerde yapılabilir. Standart metot olan çeşitli silindirlerle yola serilen karışım sıkıştırılır. Mekanik iyileştirme sonucu zeminde hedeflenenler granülometrinin düzeltilmesi, w_L veya I_p indeksinin azaltılması, drenaj kabiliyetinin artırılması, mukavemet ve dayanımının artırılması, uzun dönemli oturmaların ve don duyarlılığının azaltılması, kapileritenin azaltılması, değişen su içeriği ile taşıma gücünün azalmasının önüne geçilmesi ve uzun süreli dayanım (durabilite)'nin artırılması şeklinde sıralanabilir. Aslında mekanik iyileştirme belli oranda granüler malzeme (agrega) katarak ince daneli zeminin özelliklerini limitleri standartlarda belirlenmiş sınırlara çıkartmaktır. Bu nedenle mekanik iyileştirme granüler iyileştirme olarak da adlandırılabilir. Zemin iri ve ince kısmının miktarı ile sırasıyla gradasyonu (dane çapı dağılımı) ve plastisitesi düzenlenmektedir. Bunlar ise zemin özellikleri iyileştirme aşamaları içinde ve mekanik iyileştirme uygulanabilmesinde ilk sıraları alırlar. Zemindeki maksimum dane boyutunun çok büyük olması veya ince malzemenin fazla olması durumunda karışım hazırlıklarında zorluklar yaşanır. Zeminde kil miktarının fazla olması halinde danelerin birbirine tutunması ve plastisite artmaktadır. İnce içeriği fazla zemine bir başka zemin veya düşük plastiseli bir granüler malzeme karıştırarak uygun zeminler elde edilebilmesi için karışımın homojen olması esastır. Plastisitesi yüksek zeminlerin kuru iken ufalanmalarının zor olması nedeniyle başka zeminle karıştırılması sıkıntı yaratmaktadır. Bu sebeple yolda zeminlerin karıştırılmasında özel araçlar (Disk Tırmık, Disk Pulluk, Pulverizer vb.) ile zemin toprakları ezilerek

parçalanmalıdır. Zemin karıştırmada karışım miktarları için belli bir prosedür ve/veya bir yöntem geliştirilmemiştir. Değişik tip zeminlerin değişik oranlarda katkı veya zeminle deneme karışımları yapılmalı ve laboratuvar deneyleri ile özellikleri inceleyerek katılma miktarlarına karar verilmelidir. Kilin yarıdan fazlasını oluşturduğu zeminlerin mühendislik özelliklerini (taşıma gücü, serbest basınç dayanımı, geçirgenlik vb.) iyileştirmek için mekanik iyileştirme amacıyla kum-çakıl gibi tabii, kırma taş gibi üretilen ve üretim artığı granüler malzemeler de tespit edilen oranda karıştırılarak ıslah edilmektedir. Elde edilen karışımın dane çapı dağılımı ile ince kısmının plastiklik (w_L , I_p) özellikleri mekanik iyileştirmenin başarı seviyesini göstermektedir. Dane çapı dağılımı zeminin yoğunluğu, permeabilitesi, iyileştirilmesi, su tutma yeteneği, vb. üzerinde etkin bir rol oynar. En yoğun (boşluk miktarı az) zemin elde edilebilmesi için granülometri eğrisinin sürekli olması gerekir. Böylece segragasyon (ayrışma) azalmakta, işlenebilirlik artmaktadır (Kayabalı, 2002; Tunç, 2002).

İstenilen gradasyonu elde etmek için iki veya daha fazla zemini veya agregayı karıştırmak gerekir. Granülometrileri farklı zeminlerin karışım oranlarını saptamak için;

- Deneme-yanılma (deneysel) yöntemi,
- Grafik (hesap) yöntemi,
- Denklem çözüm (hesap) yöntemi kullanılabilir.

Bu yol üstyapı malzemelerinde kullanılan agregaların gradasyon ayarlamaları yöntemleri ve beton üretiminde hangi agrega gruplarından hangi oranlarda karıştırılacağı için kullanılan yöntemler ile aynıdır. Deneysel metotlar laboratuvar imkânına bağlı ve maddelerin reaktif olmasının önemi olmayan metotlardır. Hesap yöntemleri sadece reaktif olmayan katkı veya zemin malzemeleri ile ve deney yapmadan elde edilen karışımın dane çapı dağılım eğrisini verir. Mekanik iyileştirme ile ıslah edilen zeminlerin kaba kısmı hacimsel sabitlik ve sürtünmeden sorumludur. İnce kısmı ise karışımın kohezyonundan yani kaba daneleri birbirine bağlayıcı olmasından sorumludur. Bilindiği gibi zeminlerin kayma mukavemeti $\tau=c+\sigma \tan\theta$ ile

belirlenir. Burada kohezyon (c) tamamen ince malzemenin özelliğine bağlıdır. Bağlayıcı gibi çalışan ince kısım kaba danelerin bu daneler arasında köprü görevi görerek ve/veya etrafını sararak zeminin kaba kısmının (granüler malzemenin) rijitliğini, hacim sabitliğini ve oturmamasını (iyileştirilmesini) sağlamaktadır. Ancak bu durum hassas bir denge oluşturur, ince kısım sahip olduğu kohezyon ile bir miktar mukavemet artışına neden olması bir üstünlük getirirken plastiklik özelliği ile de olumsuz etkilerinin olmaması gerekir. Dolayısıyla zemini iyileştirmek için karışımın I_p değeri düşük olmalıdır. Çünkü zeminin ince kısmı granüler daneler arasındaki boşlukları doldurduğu gibi granüler daneler arasında bir bağ görevi görerek karışımı mukavemet artışı sağlayarak iyileştirmektedir. Ancak fiziksel değişmeler sonucu en sık karşılaşılan zeminin kurumması halinde büzülme ve ıslak halde ise şişme (kabarma), aşırı su içeriğinde taşıma gücünde azalmalar, zeminin su tutma (emme) potansiyelinin artması, vb. olumsuz etkiler oluşabilir. Böylece zemin ince kısmının I_p değeri sınırlandırılmalıdır. Bu nedenle mekanik iyileştirme yapılan zeminlerin ince kısmı (No. 200'den geçen kısımları) % 15'den fazla olmamalıdır. Ayrıca I_p ve w_L değerleri için şartnamedeki sınırlara uyulmalıdır. Örneğin Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) dolgularda kullanılacak dolgu malzemesinin $w_L < 60$ ve $I_p < 35$ olma şartını getirmiştir (Tunç, 2002; KTŞ, 2006).

4.2.2. Kimyasal iyileştirme

Zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirmek ya da zayıf zeminin özelliklerini ortadan kaldırmak amacıyla zemine (uçucu kül, cüruf ve tras gibi) puzolanik maddeler, (çimento, kireç ve alçı gibi) hidrolik bağlayıcılar vb. özelliğe sahip iyileştirme maddeleri katarak oluşturulan kimyasal reaksiyon sonucu oluşan zemin ıslahına kimyasal iyileştirme denir. Kimyasal iyileştirme maddeleri olarak ayrıca çimento ve kireç klinkeri, asfalt, kalsiyum klorür, sodyum klorür ve selüloz atıkları da yaygın olarak kullanılmaktadır (Tunç, 2002; Kayabalı, 2002; Peethamparan, 2006). Çimento, kireç, uçucu kül gibi malzemeler, daneler arasındaki bağı kuvvetlendirmek ve aralarındaki boşlukları doldurmak suretiyle zemini iyileştirmektedir. Bu malzemeler zemine enjekte edilebilir veya zeminle karıştırılabilir. Enjeksiyon teknikleri, zeminin dane yapısının sağlam kalmasına yardımcı olmak amacıyla kimyasal maddelerin

zeminin boşluklarına veya zemindeki çatlaklarına, genellikle basınç yarımıyla doldurmayı kapsamaktadır (Mollamahmutoğlu, ve Kayabalı, 2004; Sağlamer, 2010).

Katkı malzemeleriyle iyileştirmede, katkı malzemesi zemine ilave edilmekte ve zeminin parçacık (partikül) yapısı değiştirilmektedir. Karıştırma işlemi ya mekanik olarak zeminle birlikte karıştırma veya hidrolik olarak jet enjeksiyonu şeklinde yapılmaktadır. Katkı maddeleriyle mekanik ve jet enjeksiyon yöntemlerinin ikisinde de üniform bir zemin-katkı karışımı oluşturulmaktadır. Kolonları örtüştürmek suretiyle yeraltında, geçirimsiz veya zeminin akarak kazıya dolmasını önleyen duvarlar veya diyaframlar inşa edilebilmektedir (Yıldırım, 2002; Mollamahmutoğlu, ve Kayabalı, 2004).

Kimyasal iyileştirmede kimyasal maddeler zeminle karıştırılır veya zemin içine enjekte edilir. Toprak barajlar ve karayolu dolguları toprak yapılarında zeminin mühendislik malzemesi olarak kullanılır. Yapının kendisinin zeminden oluşması halinde kompaksiyon ve iyileştirme çok önemlidir. Zeminlerin dolgu inşasında gelişigüzel yığılması halinde dolgu sıkışma miktarı çok düşük, oturmalar da büyük olacaktır. 1930'lara kadar kara ve demiryolu dolguları damperli kamyon veya vagonlardan boşaltma şeklinde inşa edilmiştir. Bu iş makinelerinin ağırlığı ile üretilen dolgular sıkıştırma (kompaksiyon) veya yoğunluğu arttırmada çok az enerji kullanılmaktaydı. Bu sebepten kalın olmayan (15-20 cm) dolgu tabakalarında bile yenilmeler meydana geliyordu. Gölet seddesi gibi toprak yapıların tarihçesi insanlık kadar eskidir. Bu yapılar antik Çin veya Hindistan'da sırtında sepetle toprak taşıyan insanlar tarafından inşa edilmiştir. Boşaltılan toprak malzemesi üzerinde işçilerin yürümleri ile sedde malzemesi sıkışmış ve dayanımı arttırılmıştır. Zeminlerin sıkıştırılmasında bazı ülkelerde fil gibi ağır hayvanlar bile kullanılmışsa da sonucun o kadar da iyi olmadığı gözlenmiştir (Kayabalı, 2002).

Katkılarla kimyasal iyileştirmede en yaygın çalışılan malzeme kireç, çimento ve uçucu küldür. Kireç iyileştirmesi; genelde killi zeminlere uygulanan bir metottur. Kireç orta, ince ve çok ince daneli zeminlerle reaksiyona girerek plastisitenin düşmesine, işlenebilirliğin artmasına, şişmenin azalmasına ve mukavemetin artmasına neden olmaktadır. Zemin sınıfı CH, CL, MH, ML, ML-CL, SC, SM-SC, SM,

GC, GM-GC, GM olan ve silt, kil içeren ince daneli zeminler kireçle iyileştirilmeleri mümkündür. Çimento; genel olarak I_p değeri 30'dan az olan zeminler ile No. 4 elekten (4.76 mm) geçen kısmı % 45 den fazla olan kaba daneli granüler zeminlerde etkili bir iyileştirme katkısı olarak kullanılır. Uçucu kül ve kireç; I_p değeri 25'den fazla olmayan kaba veya orta boyutlu danelere sahip zeminlerde etkilidir. Uçucu kül; kaba danelere sahip GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM, SC veya bunların karışımından oluşan zeminlerde etkin bir iyileştirme maddesi olarak kullanılır. Bunların dışında kireç-çimento, kireç-asfalt ve kireç-çimento-uçucu kül karışımları da iyileştirme katkısı olarak kullanılmaktadır. Zemine katılan kireç işlenebilirliği artırırken plastisiteyi düşürür. Katılan çimento ise çabuk bir şekilde zeminin mukavemetini artırır (Tunç, 2002).

Zemin kimyasal iyileşme mekanizması kimyasal (kireç, çimento, uçucu kül vb.) katkıların içerdiği hidrate olmuş kireç ve kilde bulunan illit plaklarından kaynaklanan, kalsiyum iyonlarının kaolinit yerine illit kil daneleri ile birleşmeyi tercih ettikleri hidrasyon reaksiyonu olan flokülasyondur. Flokülasyon, kireç ve illitin puzolanik reaksiyonu ile oluşan çimento ürünlerinin paralel kil tabakalarının üzerini kaplaması ve boşluklarını doldurması, aynı sırada hareketsiz duran ve kil plakları tarafından sıkıca tutulan su ile çimento ürünlerinin yer değiştirmesidir (Chew vd., 2004).

4.2.3. Enjeksiyon teknikleri

Bu gurubun en çok uygulanan yöntemleri daneli, kimyasal karışım ve jet enjeksiyonudur. Daneli enjeksiyon, zemin yapısını bozmayacak şekilde düşük viskoziteli bir şerbetin zemine verilmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu işlemde, daneli şerbetler (çimento, uçucu kül, bentonit, mikro-çimento gibi) veya kimyasal enjeksiyon maddeleri (silikat, lignin jöleleri, fenolik ve akrilik reçineler gibi) kullanılmaktadır. Daneli enjeksiyonda zemin dane çapı çok önemlidir. Çakıl ve kum gibi iri gözenekli zeminlerde, viskoz çimento şerbetleri de dahil olmak üzere hemen her çeşit enjeksiyon maddesi kullanılabilir. Kimyasal enjeksiyon maddelerinin viskozitesi daneli şerbetlere göre daha düşüktür. Ancak mikro-çimentolu şerbetlerin viskozitesi, kimyasal enjeksiyon maddelerinin viskozitesi kadar düşük olabilir. Bu

nedence ince kumlarda kullanımı daha uygundur. Zeminde kil, silt, gibi ince daneli malzemenin varlığı dane enjeksiyonunu etkilemekte ve tesiri önemli ölçüde azalmaktadır (Önalp, 1983; Mollamahmutoğlu, ve Kayabalı, 2004).

Daneli enjeksiyon, iki ana mekanizma ile zemin iyileştirmesi sağlamaktadır. Birincisi, şerbetin münferit zemin taneleri arasındaki teması güçlendirme eğiliminde olması ve bu şekilde enjeksiyon yapılmayan zemine göre iskelet yapısı daha kuvvetli ve daha rijit olan bir zemin oluşturulmasıdır. Diğeri de, enjeksiyon maddesinin zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurması ve bu şekilde tekrarlı yükleme sırasında oluşacak sıkışma veya aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu azaltılmaktadır. Daneli enjeksiyon ile iyileştirilen zeminlerin kayma dayanımı 345 ile 2070 kPa arasında değişmektedir (Mollamahmutoğlu, ve Kayabalı, 2004).

Kimyasal karışım enjeksiyonu işleminde sıvı enjeksiyon maddesi zeminde çatlak oluşturacak basınç altında kontrollü şekilde zemine uygulanır. Burada amaç, enjeksiyon maddesinin zemin partikülleri arasındaki küçük boşluklarda akmasını sağlamak olmadığından, nispeten viskoz (ve kuvvetli) çimento şerbetleri kullanılabilir. Teorik olarak ilk çatlakların küçük asal gerilme düzlemlerine paralel olması beklenir. Fakat gözlemler bunların daha çok zayıf tabakalanma düzlemlerini takip ettiğini göstermektedir. İyileştirme için ilk şerbetin verilmesinden sonra, tekrarlanan kimyasal karışım enjeksiyonu, zemini değişik düzlemler boyunca çatlattmaktadır. Sonuçta, birbirini kesen enjeksiyon mercceklerinden oluşan üç boyutlu bir ağ ortaya çıkar. Zeminde bir miktar sıkışma meydana gelmektedir. Amaç iyileştirimin ana mekanizmasına uygun olan rijitlik ve mukavemet artışı sağlanmasıdır. Bu da zemin kütlesinde enjeksiyon maddesinin katılmış mercceklerinden ileri gelmektedir (Yıldırım, 2002; Kayabalı, 2003; Mollamahmutoğlu, ve Kayabalı, 2004).

Jet enjeksiyonunda iyileştirme, önceden açılmış bir sondaj deliğinden girilerek, zemin aşağıdan yukarı doğru, yüksek basınç altında yatay olarak enjekte edilen çimento şerbeti ile karıştırılır. şerbetin yatayda değişik yönlere basınçlı sıvı jeti olarak ulaşması için ucunda püskürtme deliği (nozzle) bulunan enjeksiyon silindiri döndürülür. Karıştırma işlemine yardımcı olması bakımından sadece hava veya hava

ile su enjekte edilebilir. Jet enjeksiyonu kuyunun tabanında başlar ve geride nispeten üniform bir zemin-çimento karışımı bırakarak yukarı doğru yavaş yavaş çekilerek zemin içinde kolonlar oluşturulur. Jet enjeksiyonu her türlü inorganik zemine ve istenen derinlikte uygulanabilmektedir (Yıldırım, 2002; Mollamahmutoglu, ve Kayabalı, 2004; Sağlamer, 2010).

4.2.4. Katkı maddeleri ile iyileştirme

Mekanik iyileştirme gurubuna da giren katkı malzemeleri ile zemin iyileştirilmesi yönteminde kireç, çimento, bitüm ve uçucu kül gibi ortama eklenen inorganik veya organik maddeler ile yapılmaktadır. Bu yöntemle zemin içerisinde mikro ve makro daneler arasındaki bağlar oluşturmak ve kuvvetlendirmek yolu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesi esasına dayanmaktadır. Günümüzde biyolojik yöntemlerle de zemin iyileştirilebilmektedir.

Elektrik santrallerinin yan ürünü olan uçucu kül başarılı bir dolgu malzemesi ve kireçle zemin iyileştirilmesinde puzolanik reaksiyonu hızlandıran bir katkı malzemesidir (Cömert vd., 2006). Geçmişte sayılı termik santral bulunması ve taşıma maliyetinin yüksekliği nedeniyle uçucu kül kullanımı tercih edilmiyordu. Günümüzde maliyetlerin azalması ve ülke genelinde termik santrallerin yayılması ile bu kullanım sahası genişlemektedir.

Özellikle ince daneli (kil-silt) zeminlerde kireç gibi bir katkının zemin iyileştirilmesinde olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Kireç, genel olarak zeminin plastisitesini azaltmakta, ortamın pH değerini yükselmekte (bazik hale çevirir) ve oluşan puzolanik reaksiyon sonucu bir çeşit çimentolaşma ile dayanım artmasına yol açmaktadır (Özaydın, 1998). Çimentolu malzemeler de zemine enjekte edilebilir veya zeminle karıştırılabilmektedir. Bu malzemeler dane aralarındaki boşlukları doldurmakta ayrıca bağı kuvvetlendirmek suretiyle zemini iyileştirmektedir.

Kireç katkısıyla kil zeminlerde plastisite indisi düşürülür, kuru birim hacim ağırlığı arttırılır. Çimento organik zeminler hariç tüm zemin cinslerinde uygulanır. Bitüm granüler malzemeye kohezyon verir. Bu iyileştirme yöntemleri ve vb. maddeler

zeminle üniform şekilde karıştırılıp sıkıştırılarak yoğrulmuş zeminin mekanik özellikleri iyileştirmektedir (Sağlamer, 2010).

Tablo 4.1. Zemin iyileştirilmesinde inorganik ve organik katkı maddelerinin karşılaştırılması (Conner, 1990)

Metot	Üstünlük ve Sakıncaları
İnorganik Esaslı (kireç, çimento, uçucu kül, kil vs.)	Malzemeler kolayca temin edilebildiğinden uygulama alanı oldukça geniştir.
	Maliyeti düşüktür.
	İlave edilen malzemeler kimyasal olarak zehirli değildir.
	İyileştirme işlemleri kolaydır ve çok özel aletler ve malzemeler gerekmez.
	Hem fiziksel, hem kimyasal olarak uzun süreli iyileştirmesi (durabilitesi) çok iyidir.
	Ultraviyole ve radyasyon tehlikeleri yoktur.
	İyileştirilmiş malzemenin permeabilitesi düşer, mukavemeti artar.
	İyi bir mekanik ve yapısal karakteristik gösterir.
	15 yıldır yapılan işlemlerde başarı sağlanmış ve iyi bir bilgi birikimi elde edilmiştir.
Organik Esaslı (organik polimerler, biyolojik yöntemler vs.)	Yüksek bir fiyatı vardır.
	Çok düşük bir permeabilite elde edilir.
	Birçok atık için uygulanabilir.
	Ultraviyole ışınlarının önlemede tam başarılı sayılmaz.
	Mikroorganizmalar için elverişli değildir.
	Uzun süreli zemin iyileşmesi sağlayamaz.
	İnorganik sistemlere göre uygulanması çok zor ve özel aletler gerekir.
Bazı sistem bileşenleri için tehlikelidir.	

Tablo 4.1’de iyileştirmede kullanılan inorganik ve organik katkı malzemelerinin üstünlük ve sakıncaları gösterilmektedir. Bu katkı malzemeleri yanında tuz, kalsiyum klorür, fosforik asit, fosfor tuzları, kostik soda, reçine ve lignin de zemin iyileştirmesinde kullanılan ekonomik ve etkili diğer katkı maddelerini oluşturmaktadır (Önalp, 1983; Conner, 1990).

4.3. Zemin İyileştirme Kontrolü

İyileştirmenin uygulanması yanında ne derece başarılı olduğunun kontrolü de önemlidir. Zemin iyileştirmesinin etkinlik derecesinin kontrol edilmesi, zemin iyileştirilme işleminin önemli bir bölümünü oluşturur.

Kontrol yöntemleri şöyle sıralanmaktadır:

- Laboratuvar deneyleri
- Arazi deneyleri
- Jeofizik deney teknikleri

Rijitlik, dayanım ve yoğunluk özelliklerinin iyileştirmeden önce ve sonra doğrudan veya dolaylı olarak ölçümü, zemin iyileştirmesinin etkinlik derecesinin güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine izin verebilir. Bu özellikler laboratuvar, arazi (in situ) ve/veya jeofizik deneyleri ile ölçülebilmektedir. Zemin iyileştirmesinin başarısı, istenen iyileştirmenin oluştuğunun kontrol edilmesi ile gerçekleşir. Belirli bir zemin iyileştirme tekniğinin etkinlik derecesini kontrol etmenin en kısa yolu, iyileştirmeden önce ve sonra, zemin özelliklerinin ölçülmesidir. Laboratuvar deneyleri uzun zamandır zemin iyileştirmesinde kontrol için kullanılsa da, arazi deney tekniklerinde son zamanlardaki gelişmelerle kontrol mekanizmaları arttırılmıştır. Şantiye deneyleri, arazi (in situ) ve jeofizik deney teknikleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Kayabalı, 2003; Mollamahmutoğlu, ve Kayabalı, 2004; Mitchell ve Soga, 2005).

4.3.1. Laboratuvar deney teknikleri

Zemin iyileştirilmesinin kontrolünde laboratuvar deney teknikleri kullanmanın sayısız avantajları vardır. Fakat bu tekniklerin bazı tür zemin iyileştirmede kullanılmayışı bunların sağlamış olduğu faydayı azaltmaktadır. İyileştirilmiş zeminden numune alma gereği laboratuvar deney tekniklerinin kullanımında çok sayıda avantaj sağlamak ve bir o kadar da dezavantajı beraberinde getirmektedir. İyileştirilmiş zeminden numune alma işlemi, iyileştirmenin etkilerini incelemeye izin verir. İyileştirilmiş zeminin incelenebilme kolaylığı, çok sayıdaki iyileştirme tekniği (daneli enjeksiyon, katkı maddeleri ile vb.) için iyileştirmenin etkinlik derecesi hakkında doğrudan ve değerli bulgular sağlamaktadır. Laboratuvar deneyleri gerilme, birim deformasyon ve çevresel şartların kontrolü ve daha sağlıklı ölçülmesi bakımından arazi deneylerine kıyasla daha üstündür. Bu esneklik, bazı durumlarda, iyileştirilmiş zemin özelliklerinin daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesine imkân vermektedir. Diğer taraftan, laboratuvar deneyleri sadece seçilmiş noktalar için

kontrol imkânı vermektedir. Laboratuvar deneyleri ayrıca numune örselenmesinin kaçınılmaz sonuçlarından da etkilenmektedir. Bu tip problemler, iyileştirmenin etkinlik derecesinin değerlendirilmesinde önemli ölçüde belirsizliklere yol açmaktadır (Kayabalı, 2003; Mollamahmutoglu, ve Kayabalı, 2004).

4.3.2. Arazi deney teknikleri

Zemin iyileştirmesinde etkinlik derecesinin laboratuvar deneylerine dayalı yaklaşımlarla kontrol edilmesi konusundaki çoğu kısıtlamalar arazi deneyleriyle ortadan kaldırılmaktadır. Zemin iyileştirmesindeki etkinlik derecesinin kontrol edilmesinde arazi deneylerinin kullanılması son 15-20 yılda önemli ölçüde artmıştır.



Şekil 4.2. a) Arazi CBR deneyi ve deney aleti, b) Nükleer yoğunluk ölçme cihazı

Zemin iyileştirmesinin etkinlik derecesinin kontrolünde arazide yüklü kamyon altına takılan CBR ve karayolu yapımında kontrollüklerin sıkça müteahhitten istedikleri nükleer yoğunluk ölçme ile kalite kontrolü yapılır (Şekil 4.2a, b).

Doğal zemin üzerinde, topraklı agrega ile yapılan dolgularda, temel tabakaları ve çimento-bitüm karışımı kaplamalarda, “optimum rutubet/maks. sıkışma laboratuvar verileri” ile yerinde yoğunluk ve rutubet miktarlarını karşılaştırarak sıkışma oranı nükleer enerji kaynaklı cihazlarla tespit edilmektedir.

Dolgu derinliği fazla olduğunda zemin iyileştirmesinin başarı derecesinin kontrolünde standart penetrasyon (SPT) ve koni penetrasyon (CPT) deneyleri de kullanılabilir. Arazi CBR ve nükleer yoğunluk, SPT ve CPT deneyleri örnekleme ve

laboratuvar deneylerine kıyasla nispeten hızlı ve düşük maliyetli deneylerdir. Derinlikle birlikte devamlı kayıt alınması bakımından CPT deneyi özellikle daha yararlıdır (Lunne vd., 2002; Kayabalı, 2003).

4.3.3. Jeofizik deney teknikleri

Zemin iyileştirme tekniklerinin çoğu, iyileştirme için seçilen zeminin rijitliğini artırarak amacına ulaşır. Sismik jeofizik teknikler kullanılarak zeminin rijitliği ölçülebilmektedir. Böylece uygulanan tekniklerin etkinlik derecesi kontrol edilebilir. Sismik deneyler iyileştirmeden önce ve sonra yapılır. Böylece zeminin ilk durumuyla son durumu arasında karşılaştırma olanağı sağlanır ve kullanılan iyileştirme tekniğinin başarısı ölçülebilir. Kuyudan kuyuya ve kuyu aşağı deneyleri, zemin iyileştirmesinin kontrolünde en çok kullanılan deneylerdir. Bu deneyler sayesinde büyük mesafelerdeki primer ve sekonder dalga hızları ölçülmek suretiyle, rijitliğin alansal bir ortalaması ölçülmüş olmaktadır. Ancak, kuyudan kuyuya ve kuyu aşağı deneylerin her biri için en azından bir sondaj kuyusu açmak gereklidir. Zemin iyileştirmesinin geniş bir sahada yapıldığı alanlarda kontrol amacı bakımından sismik yansıma ve sismik kırılma deneyleri de yararlı olabilir. Bunun yanında sondaj kuyusu açılmasına gerek kalmadan benzer bilgiler sağlayabilen yüzey dalgalarının analizleri kullanılabilir. Rijitliğin iki veya üç boyutta düzensiz olarak değiştiği sahalarda yüzey dalgalarının analiz sonuçlarının yorumlanması zor olabilir. Böyle deneyler ayrıca fon gürültüsünün (devam eden iyileştirme işinden kaynaklanan gürültüler vb.) sonuçları olumsuz şekilde etkilemediği yerlerde gerçekleştirilmelidir. Ortalama dalga hızını ölçen deneyler, ortalamanın alındığı mesafeler çok küçük olmadığı sürece, ince ve gevşek kesimdeki iyileştirmenin derecesini doğru bir şekilde yansıtmayabilir. Sonuç olarak, çoğu zemin iyileştirme tekniğinin etkinlik derecesini belirli bir sahada önceden kestirmek zor olabilir. Alet, yöntem, deneyim ve yüklenicinin zemin iyileştirme yeteneği gibi faktörler zemin iyileştirmesinin başarı derecesini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, üretime başlamadan veya zemin iyileştirme tekniğinin nihai şekline karar vermeden önce, şantiye alanında önceden belirlenmiş deneme noktalarında kullanılması düşünülen yöntem ile denemeler ve küçük uygulamalar yapılması çoğu zaman büyük yarar sağlar. Bu deney alanları, zemin iyileştirmesi etkinlik derecesinin sahaya ve yöneme dayalı

değerlendirmesinin orta düzey maliyette olmasını sağlar. Mümkün olan her durumda deneme noktalarının kullanılmaları tavsiye edilmektedir (Kayabalı, 2003; Mollamahmutoglu, ve Kayabalı, 2004).

BÖLÜM 5. ESNEKLİK (RESILIENT) MODÜLÜ DENEYİ

5.1. Giriş

Karayolu katmanlarını oluşturan malzeme, yol inşaatı maliyetlerini büyük oranda etkileyen yol yapı elemanıdır. Karayolu, yol kullanıcılarının temel isteği olan güvenli ve konforlu sürüşü sağlamalıdır. Her alanda olduğu gibi yol inşaat teknolojisi de sürekli değişime açıktır. Bu gelişmeler takip edilmeli ülke şartlarına uygun hale getirilip şartnamelere eklenmelidir. Önemli nokta gelişmelerin pratiğe aktarılmasıdır.

Başarılı bir karayolu projelendirmesi, malzeme özelliklerinin doğru şekilde tanımlanması ve bu tanımlanan özelliklerin geliştirilen yol performans tahmin modellerine yerleştirildiği şekle uygun malzeme kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Uygulamada yaşanan teknik sıkıntılar ve malzemeyi doğru tanımlama kaygıları, gerçeğe daha uygun modellenmiş deney düzenekleri sağlama ihtiyacı yapılan deneylerin yöntemlerinin kullanıldıkça yenilenmesi gereğini doğurmuştur.

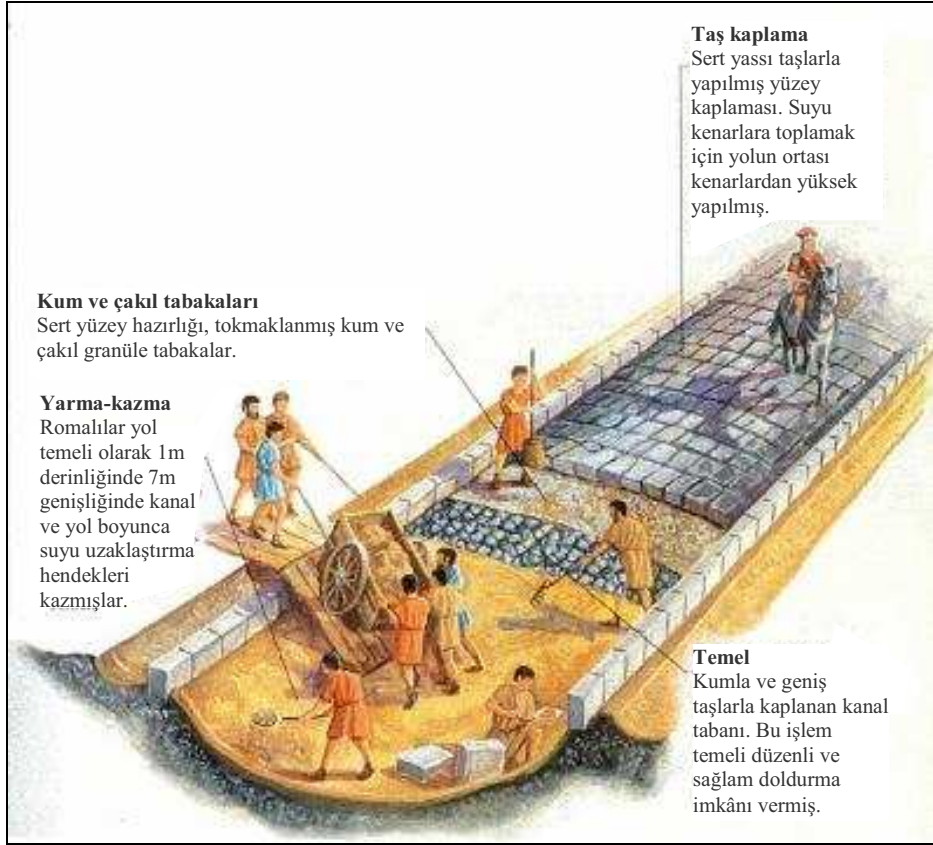
Bu sebeplerden dolayı, yol katmanlarında kullanılan malzemelerin özelliklerini ve davranışlarını gerçeğe yakın modelleyen deney metotları kullanılmalıdır. İnşaat mühendisleri bu deney metotlarından elde edilen verilerin kullanıldığı güncel yol projelendirme metotlarını uygulamalıdır. Bu hedef doğrultusunda zeminlerin mekanik özelliklerinin tespitinde fiziksel özelliklerin deneylerle tespit edildiği dolaylı (ampirik) yöntemler yanında, direk sonuca ulaşılan mekanik deney metotlarından oluşan (mekanistik) yöntemleri de kullanılmalıdır. Mekanistik yöntemlerde yol katmanlarının tekrarlı (dinamik) yükler altındaki davranışı öne çıkmaktadır. Bu süreçte deney metotları geliştirilirken Esneklik Modülü Deneyi ortaya çıkmıştır (Özay ve Güngör, 2008).

Bu bölüm karayolu projelendirilmesi için gerekli, yapılmış önceki çalışmalar ve KGM'nin araştırma projesi sonucunda elde edilen veriler ışığında mekanistik projelendirme metotlarında temel verilerden biri olarak kullanılan üstyapı malzemelerine ait Esneklik Modülü kavramı açıklanmış ve deneyin kısa geçmişine değinilmiş, esneklik modülü deneyinde kullanılan cihaz ile numune hazırlama genel hatlarıyla tanıtılmış ve bu deney metodunun bu çalışmada kullanılan ince daneli malzemelere (Tip-2) numune harılanması açıklanmıştır.

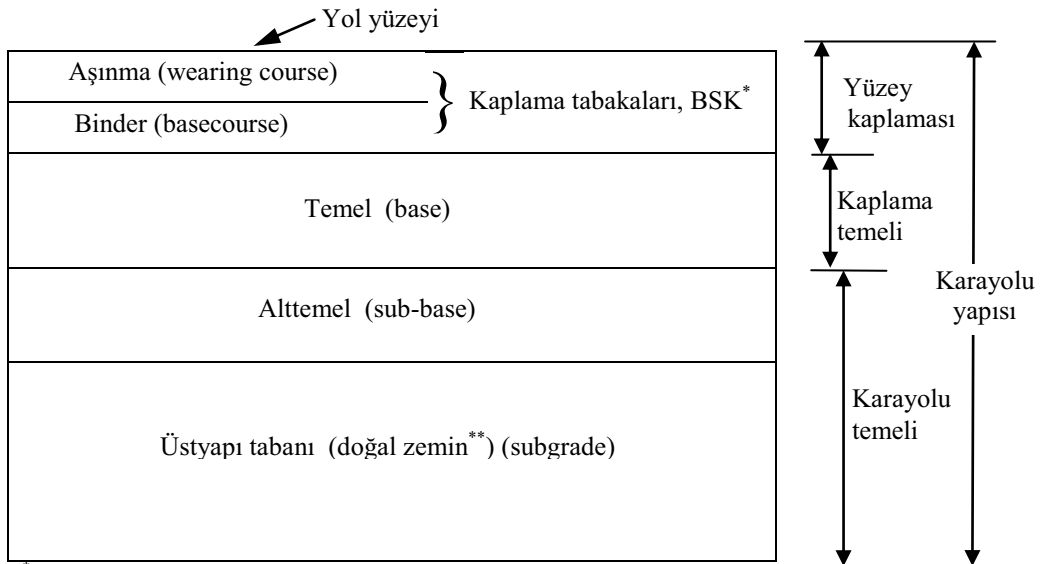
5.2. Karayolu Yapısı

Karayolu yapısı, taşıt tekerlerinin altında serili temel malzemesinden ayıran yapıdır. Yeryüzü üzerindeki yol normalde daha zayıfların aşağıya ve kıyasla daha kuvvetlilerin üste dizildiği çok katmanlı yapıdır (Croney ve Croney, 1998). Bu modern karayolu uygulaması ilk olarak Romalılar tarafından uygulanmıştır. Şekil 5.1'de gösterilen Romalıların kullandığı çok katmanlı yol uygulaması Şekil 5.2'de gösterilen günümüzde uygulanan modern çok katmanlı tipik esnek yol enkesidinden çok farklı değildir. Kaplama malzemesine göre karayolu iki çeşittir. Esnek yol bitüm-agrega, rijit yol ise çimento-agrega karışımından oluşandır (Chio, 2005).

Karayolu yapısı üç ana katman olan yüzey kaplaması, kaplama temeli (temel) ve karayolu temelinden oluşur. Asfalt yollarda genellikle yüzey kaplaması ayrı ayrı serilen aşınma ve binder olmak üzere iki tabakaya ayrılır. Yüzey kaplamasına temel oluşturan temel tabakası karayolu yapısının ana kısmını oluşturur. Karayolu temeli ise iki tabakayı kapsamaktadır. Üst tabaka genellikle iyi kalite granüler malzemeden yapılır alttemel olarak adlandırılır. Alttemel yüklerin aşağıya aktarılabileceği ve üzerinde inşaat yapım trafiğini taşıyabilecek bir kullanım alanı ve sıkıştırma yüzeyi bunun yanında üzerindeki asfalt karışımı malzemelerin serilmesine ve sıkıştırılmasına olanak verecek yapısal bir tabakadır. En alttaki tabaka, üstyapı tabanı doğal zeminden veya yol yapımı sırasında çıkan malzemelerle doldurulmasından oluşabilir (Whiteoak, 1990). Doğal zeminin zayıf olması durumunda seçme malzeme (capping) ile bu alttemel ile üstyapı tabanı arasında kalacak bir tabaka olarak doğal zemin yüzeyi örtülebilir (Croney ve Croney, 1998).



Şekil 5.1. Romalılarda yol yapımı (Chio, 2005)



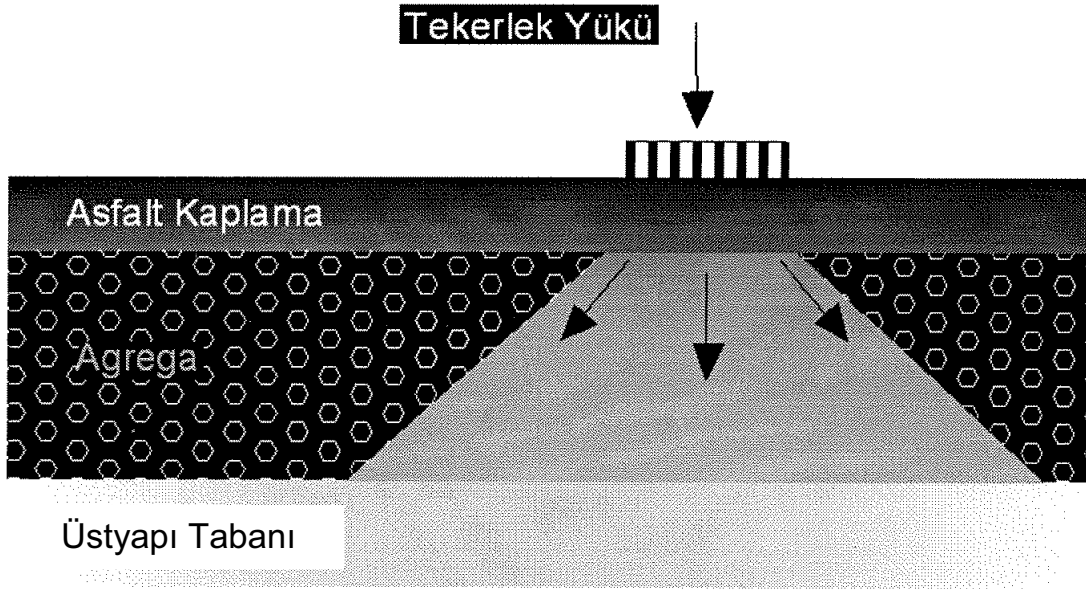
* BSK: Bitümlü Sıcak Karışım,

** Doğal zemin taşıma gücü yetersiz ise kazılır yerine seçme malzeme konulur.

Şekil 5.2. Tipik esnek kaplamalı karayolu tabakaları (Brunton, 1983; Chio, 2005; Sağlık ve Güngör, 2008)

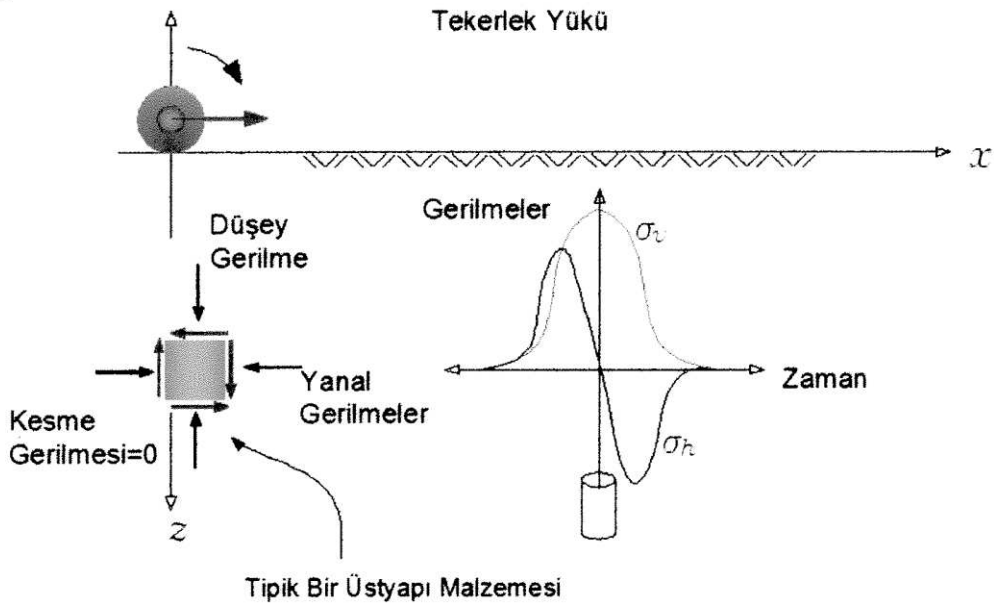
5.3. Üst Yapıya Gelen Yükler

Araç tekerleğinden gelen yükün yolun üstyapısındaki dağılımı Şekil 5.3'te görüldüğü gibidir. Trafik yükleri tekerleğin temas ettiği yüzey olan kaplama tabakası vasıtasıyla alt katmanlara yayılarak inmektedir.



Şekil 5.3. Esnek üstyapıya etkiyen yükün dağılımı (Karaşahin vd., 2007)

Karayolu üstyapısındaki gerilme durumu daha çok malzemenin maruz kaldığı düşey ve yatay gerilmelerle ilgilidir. Üstyapıya etkiyen gerçek gerilmeler; tekrarlı düşey ve yatay gerilmeler ile kesme gerilmesinden oluşur. Bu gerilmeler tekerlek yükü aracılığıyla oluşan σ_1 , σ_2 , σ_3 temel gerilmelerinin bir çeşididir (Durham vd., 2003). Üstyapı içerisindeki tipik bir malzemeye etkiyen yükler ve tekerlek yükü sebebiyle üstyapıya etkiyen gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 5.4'te görülmektedir (Karaşahin vd., 2007).



Şekil 5.4. Tekerlek yükü nedeniyle yol üstyapısında oluşan gerilme durumu (Brown, 1996; Lekarp vd., 2000; Karaşahin vd., 2007; Brito, 2011).

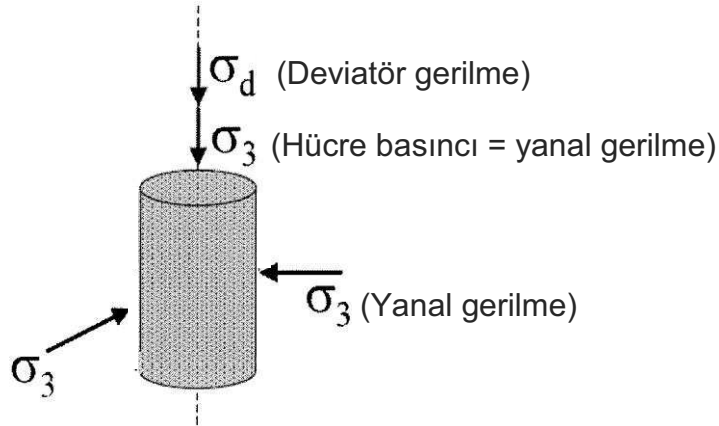
Üstyapının belirli bir kesitinden geçen düşey yük zamana bağlı olarak yarım sinüs dalgası şeklindedir (Şekil 5.4). Trafiğin kompozisyonuna göre de yükleme frekansı değişir (Durham vd., 2003). Üstyapı tasarımında kullanılmak üzere sağlıklı deneysel veriler elde etmek için şekilde görülen gerçek gerilme durumunun laboratuvar koşullarında mümkün olduğunca yakın şekilde oluşturulması gerekmektedir (Karaşahin vd., 2007).

5.4. Dinamik Üç Eksenli Deneyleri

Esnek üstyapıların tekrarlı yüklere gösterdiği dayanımını temel, alttemel ve üstyapı taban malzemelerinin karakterleri ve davranışları etkiler. Şekil 5.2'deki gibi tipik bir esnek kaplamalı karayolu projelendirmesinde kullanılan veriler, malzemelerin trafik yükleri altındaki davranışlarını gerçekçi şekilde modelleyebilmelidir. Dolayısıyla malzemelerin mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için, düşey yükten dolayı oluşan gerilmelerin büyüklüğü ve frekansı, malzeme gradasyonu ve sıkıştırılma şartları gerçek ortam şartlarına en benzer şekilde oluşturulmalıdır. Fakat kullanılan ampirik deney metotlarının çoğu, malzemelerin arazi koşullarındaki

davranışını iyi modelleyememektedir. Tüm dünyada üstyapı projelendirmesinde kullanılan en temel veri Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)'dır.

CBR deneyinin projelendirme amacıyla zemini modelleme şeklinde olduğu gibi başka bazı sakıncaları da bulunduğu bilinmektedir. İlk olarak CBR, üstyapı tabakalarının maruz kaldığı gerilmeleri yeterli şekilde modelleyemeyen statik bir testtir. İkinci olarak, ne test koşulları ne de hazırlanan numune, gerçek arazi koşullarının laboratuvar koşullarında oluşturulmasını sağlayamamaktadır. Dolayısıyla CBR, Proktor ve Serbest (Tek eksenli) basınç deneyleri tek başlarına gerçek malzeme davranışını belirlemede yeterli olmamaktadır. Bu sebeplerden dolayı üstyapı mühendisleri yolda kullanılan malzemelerin gerçek arazi koşullarındaki ve trafik yükleri altındaki davranışlarını gerçekçi şekilde modelleyen yeni dinamik deney metotlarının arayışı içine girmişlerdir. Trafikten kaynaklanan dinamik yüklerin de temsil edildiği daha karmaşık deney yöntemlerinin uygulanması burada önem kazanmıştır. Bunun sonucu olarak da Esneklik Modülü Deneyi ortaya çıkmıştır. Şu anda Esneklik Modülü Deneyi dünyada çok kullanılan ve güvenilir şekilde malzemelerin trafik yükleri altındaki davranışlarını yansıtan dinamik deneydir (Sweere, 1990; Durham vd., 2003; Karaşahin vd., 2007; Özay ve Güngör, 2008).



Şekil 5.5. Üç eksenli numunesine etkiyen gerilmeler (Karaşahin vd., 2007).

Tekrarlı yüklemeli üç eksenli deney cihazı, granüler malzemeler için Şekil 5.4'te belirtilen gerilme durumuna en yakın modeli oluşturduğu için (kesme gerilmesi hariç) deneysel çalışmalarda tercih edilmektedir. Düşey ve yanal gerilmeler, dinamik üç eksenli deneylerinde numuneye Şekil 5.5'te görüldüğü gibi uygulanmaktadır.

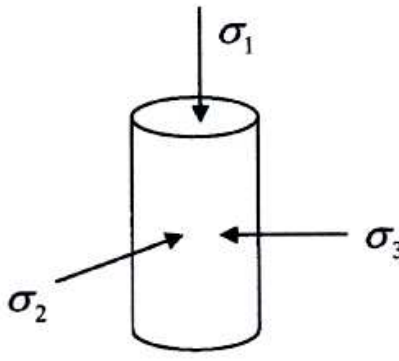
Kesme gerilmesinin tekerlek eksenli altında sıfır olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca dinamik üç eksenli deneyleri ile hem granüler (kohezyonsuz) malzemelerin hem de kohezyonlu zeminlerin “Esneklik Modülü” ve tekrarlı yükler altındaki “Plastik şekil değiştirmesi” ölçülebilmektedir (Durham vd., 2003; Kardeş vd., 2007).

5.5. Dinamik Deneylerin Tarihsel Gelişimi

1955’li yıllarda araştırmacılar karayolu üstü yapı mühendisliği açısından, malzeme deneyleri için daha gelişmiş yöntemlere ihtiyaç olduğunu fark etmişlerdir. Bu şekilde yeni bir test yöntemi belirleme ihtiyacı doğrultusunda, ilk basit dinamik üç eksenli deney düzenineğini oluşturmuşlardır. Düzenek standart üç eksenli deney çerçevesinin üzerine bir yükleme pistonu eklemek ve bunu elektronik bir kontrol sistemi ile kumanda etmekten ibaretti. Önceleri “dinamik elastisite modülü” olarak adlandırılan esneklik modülü, zeminin taşıt yükleriyle yol tabakalarında oluşan yanal ve düşey basınçların pünomatik olarak anlık üretilip modellenilebildiği bir tür üç eksenli kesme deney düzenineğinde elde edilir. Dilimize “Esneklik Modülü” şeklinde çevrilmiş Resilient Modülü kısaca M_R veya M_r ile gösterilmektedir.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Burada;
 σ_d = Deviator Gerilme
 ϵ_r = Elastik Şekil Değişirme
 $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$
 $\sigma_3 = \sigma_2 =$ Yanal Gerilme

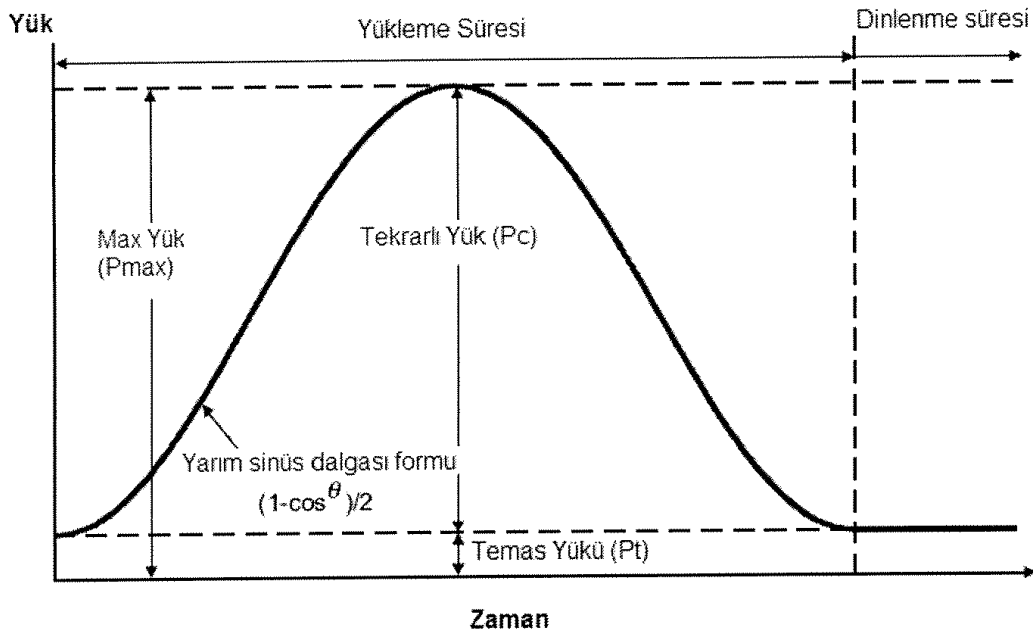


Şekil 5.6. Esneklik modülü genel formülü (Lekarp vd., 2000; Durham vd., 2003; Özyay ve Güngör, 2008; Brito, 2011; Wang, 2011)

Esneklik Modülü kavramı, 1960’lı yıllarda Seed ve ekibi tarafından periyodik yüklemeler altında zeminlerin nonlinear gerilme-deformasyon davranışını belirlemek amacıyla geliştirilmiş bir indekstir. Daha basit olarak ifade edilecek olursa Esneklik

Modülü, standart sinüzoidal (haversine) yük formu altında oluşan dinamik deviator gerilmenin, elastik şekil değiştirmeye oranı olarak tarif edilebilir (Özay ve Güngör, 2008).

Yükleme formu 1 sn yüklemeye, 2 sn bekleme şeklindeydi. 1960'lı yıllarda Seed ve ekibi oluşturdukları sistemde yük uygulama sürelerinin gerçek yol durumuna göre yavaş olduğunu tespit ettiler (Sweere, 1990). Ancak 1974-1975'li yıllarda bilim adamları (Allen ve Thompson; Barkdale) araç trafiğinin yolda oluşturduğu yüklerin daha karmaşık yükler olduğunu ve zamana karşı çizilen yük grafiğinin sinüzoidal formda olması gerektiğini hesaplamışlardır. Hesaplarına göre 70 km/sa'lik normal bir araç hızı için zemine yük uygulama süresi, kaplama üzerinde 0.02 sn üstü yapının 70 cm derinliğinde 0.1 sn'dir (Lekarp vd., 2000; Karaşahin vd., 2007; Özay ve Güngör, 2008).



Şekil 5.7. Dinamik üç eksenli deneyindeki (Haver-sine) yüklemeye formu (Durham vd., 2003; Witczak, 2004; Karaşahin vd., 2007; Özay ve Güngör, 2008)

Bu kadar kısa sürede sinüzoidal formda yük uygulayabilmek için oldukça gelişmiş sistemine ihtiyaç vardır (Şekil 5.8). Bu sistemler sadece sınırlı sayıdaki ileri araştırma merkezlerinde bulunabilmektedir. Dolayısıyla günümüzdeki pek çok dinamik üç eksenli deney sistemi hala 1 sn'lik yüklemeye formunu uygulamaktadır (Witczak, 2004; Karaşahin vd., 2007).

İlk uygulanan dinamik üç eksenli deneylerinde yaklaşık 35.6 mm (1.4") çapa sahip silindir numuneler ile daha çok kendini tutan killi zeminler test edilmiştir. Daha sonraları daha büyük tane çapına sahip numuneler üretilerek iri taneli malzemeler için de deneyler yapılmaya başlamıştır (Durham vd., 2003; Karaşahin vd., 2007).

H.B. Seed'in 1950'li yıllarda başlayan çalışmalarından bu yana dinamik üç eksenli deneyleri yaygınlaşmış ve günümüzde bağlayıcısız (unbounded) granüler malzemelerin esnek ve kalıcı şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesi için en çok kullanılan deney haline gelmiştir. Ancak deneyin kompleks yapısı ve ilgili yükleme sistemlerinin yüksek maliyeti nedeniyle hala araştırma-geliştirme amaçlı yapılmakta ve uygulamada çok yaygın kullanılamamaktadır (Karaşahin vd., 2007).

Deney cihazını her araştırma laboratuvarında bulundurulamadığından M_R değerinin ampirik olarak hesaplanma yolları araştırılmıştır. CBR değeri kullanılan AASHTO ve NCHRP 1-37A tarafından geliştirilen dönüşüm formülleri sırasıyla (5.1) ve (5.2) eşitliklerinde verilmiştir (Durham vd., 2003; Wang, 2011).

$$M_R = 1500(CBR) \quad (5.1)$$

$$M_R = 2555(CBR)^{0.64} \quad (5.2)$$

Esneklik modülü granüler malzemelerde zemin yapısı, su içeriği ve gerilme koşullarına bağlı olduğundan, her üstyapı tabakasında farklılık göstermektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Üstyapı Şubesi Müdürlüğü'nde TÜBİTAK destekli bir proje kapsamında Türkiye'nin bütün bölgelerinden farklı cins malzemeyi temsil edecek şekilde alınan temel, alttemel ve taban zemini numunelerine esneklik modülü deneyleri yapılmıştır. Bu M_R sonuçları kullanılıp istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiş granüler malzemelerin esneklik modülü için bir genel formül elde edilmiştir (Sağlık ve Güngör, 2008). Bir çok zemin parametresi kullanılan formül (5.3) eşitliğinde verilmiştir.

$$M_R = 1750 \cdot (D_{BSK} + k)^{0.436} \cdot CBR^{0.4} \left(\frac{1}{1 + \log(\text{No.200})} \right)^{0.35(w_L \cdot I_P + 1)^{0.06}} \left(\frac{\gamma_{kmax}}{\text{No.4}} \right)^{0.09 \cdot \log(w_{opt})} \quad (5.3)$$

Burada;

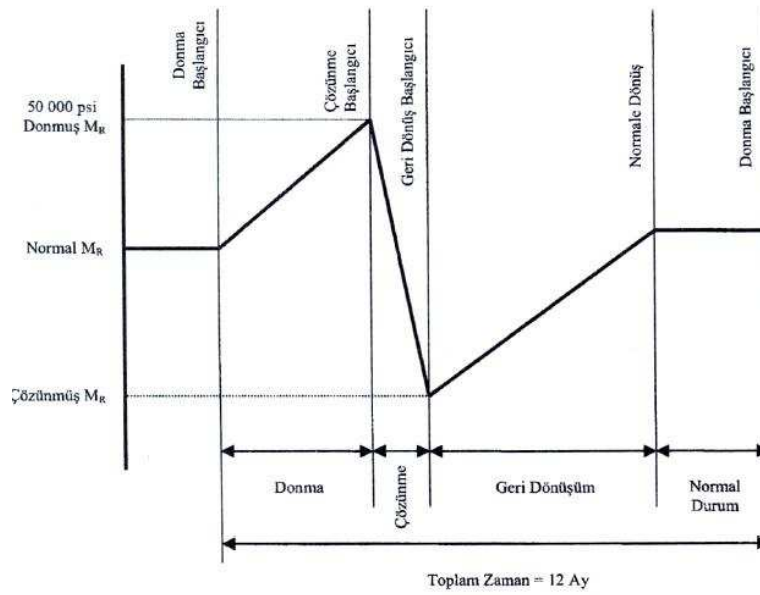
- M_R : Esneklik modülü, kPa,
 D_{BSK} : Bitümlü sıcak karışım tabakalarının toplam kalınlığı, cm,
 CBR : Kaliforniya taşıma oranı, %,
 w_{opt} : Optimum su içeriği, %,
 γ_{kmax} : Maksimum kuru birim ağırlık, kN/m^3 ,
 w_L : Likit limit, %,
 I_P : Plastisite İndeksi, %,
 No.200 : 200 No.lu elekten geçen malzeme yüzdesi, %,
 No.4 : 4 No.lu elekten geçen malzeme yüzdesi, %,
 k : Derinlik düzeltme faktörü, cm.

Esneklik modülü, M_R kullanılarak katman kalınlıkları Mekanistik-Ampirik Dizayn yöntemi ile hesaplanır. Bu konuda AASHTO tarafından 1972 rehberinden sonra 1993 rehberi çıkartılmıştır, günümüzde ise yoğun olarak dizayn yöntemleri üzerine çalışılmaktadır (Sağlık ve Güngör, 2008). KGM'nin kullandığı Mekanistik-Ampirik Dizayn yöntemi AASHTO tarafından çıkarılan 1993 rehberine uygundur.

5.6. Esneklik Modülü (M_R) Deneyi

Bu deneyde, dinamik tekerlek yükleri tekrarlı sinüzoidal aksenal yükü kullanılarak modellenmiştir. Deney numunesine bulunduğu tabaka içerisinde, diğer malzemeler tarafından uygulanan yanal basınç ise numuneye yanal olarak uygulanan hava basıncıyla modellenmiştir.

Esneklik Modülü, yol yapısı içerisinde kullanılan malzemelerin rijitliğini gösteren en uygun değerdir. Her ne kadar Esneklik Modülü değeri, malzemelerin dinamik tekerlek yükleri altındaki davranışlarını en gerçekçi şekilde modelliyor olsa da, daha başarılı performans tahmininin gerçekleştirilebilmesi için malzemelerin, farklı mevsimlerdeki ve farklı inşaat koşullarındaki Esneklik Modülü değerlerinin belirlenmesi gerektiği Şekil 5.8'de görülmektedir (Özay ve Güngör, 2008).

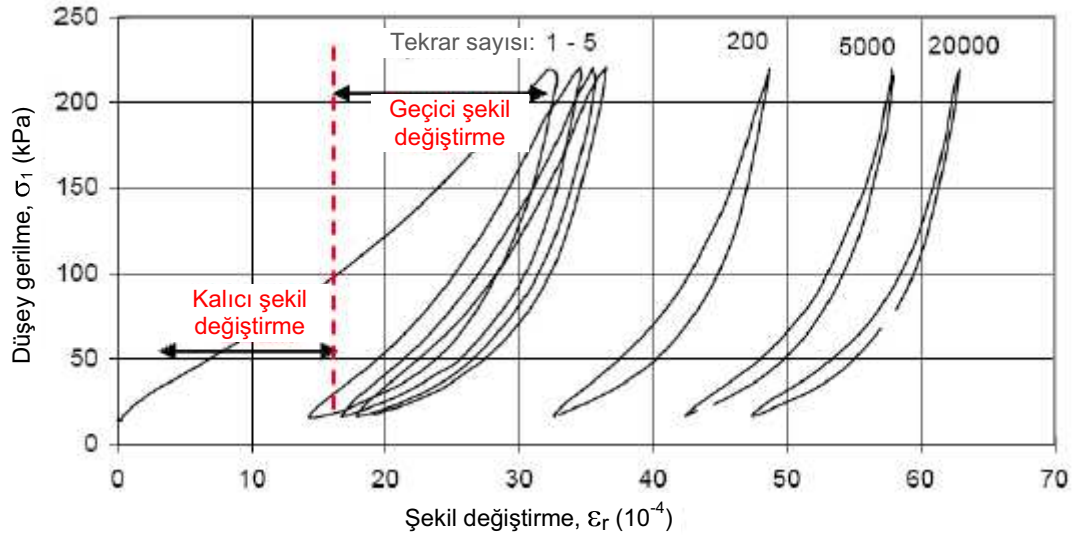


Şekil 5.8. Üstyapı Taban Malzemelerinin Mevsimsel Esneklik Modülü Değişimi (Özay ve Güngör, 2008)

Bu deney yöntemi yol üstyapısının kalınlık hesaplarında (karayolu üstyapı tasarımında) kullanılmaktadır. Üstyapı malzemesinin doğrudan mukavemet yerine üç eksenli deneyi ile tekrarlı yük altında malzemelerin klasik elastisite modülünün tespitinde olduğu gibi esneklik modülü (M_R) tayin edilmektedir. Malzemelerin üç eksenli deney şartlarında tekrarlı yük altındaki gerilme-deformasyon ilişkisi saptanmaktadır (Durham vd., 2003; Karaşahin vd., 2007).

Deneyin en büyük özelliği, malzemenin tekrarlı yük şartları altındaki elastik davranışını tespit etmesidir. Gerçekten de trafik yükleri kaplama vasıtasıyla zemine tekrarlı yük olarak intikal etmekte ve zeminde yarattığı deformasyonların büyük bir kısmı kalıcı olmayan yani elastik deformasyonlar olmaktadır. Bu nedenle üstyapı tasarımında, tabakalarda kullanılan malzeme özelliklerini temsil etmesi açısından esneklik modülünü kullanmak doğrultusundaki yaklaşımlar daha gerçekçi bulunmaktadır (Uzan, 1985; Karaşahin vd., 2007).

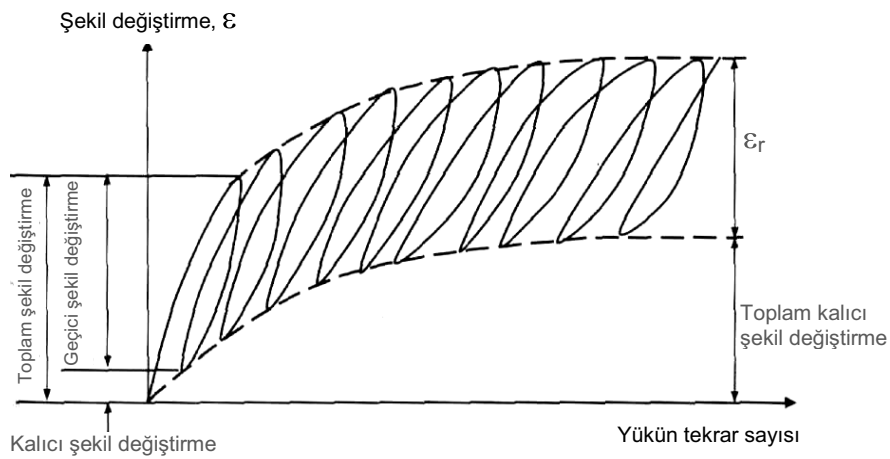
Şekil 5.9'da düşey gerilmeye (σ_1) ve yükün tekrar sayılarına karşılık birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde görünen kalıcı ve esnek şekil değiştirme görülmektedir.



Şekil 5.9. Düşey gerilme (σ_1) ve yükün tekrar sayısına karşılık birim şekil değiştirme (ϵ_r) eğrisi üzerinde kalıcı ve esnek şekil değiştirmeler (Brito, 2011).

Şekil 5.10'da ise tekrarlı yüke maruz kaldıkça malzemenin elastik ve plastik deformasyon (şekil değiştirme) görülmektedir (Sağlık ve Güngör, 2008).

Üstyapı malzemeleri normal olarak elastik değildir ve her yük tekrarından sonra bir miktar plastik (kalıcı) şekil değiştirme gösterirler. Bununla beraber, eğer trafik yükü malzemenin mukavemetine nazaran küçük ise, belirli miktarda yük tekrarından sonra malzeme elastik davranış göstermeye başlar (Sağlık ve Güngör, 2008; Brito, 2011).



Şekil 5.10. Tekrarlı yükler altındaki plastik ve elastik şekil değiştirmeler (Sağlık ve Güngör, 2008).

5.7. Esneklik Modülü Cihazı ve Parçaları

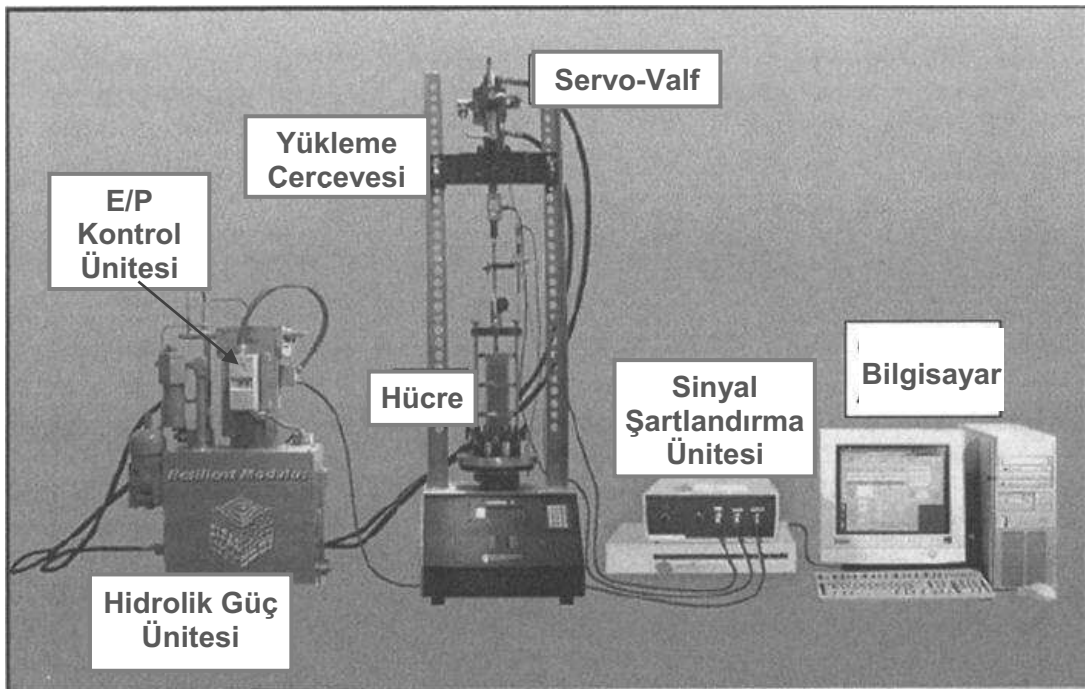
Esneklik Modülü deneyi için kullanılan cihaz AASHTO T 307 standardı ve LTPP P-46 protokolüne uygun olmalıdır (Durham vd., 2003; Sağlık ve Güngör 2008). Bu deney düzeneği oluşturan 7 ayrı bölüm Şekil 5.11’de verilmiştir. KGM laboratuvarlarında cihaz bu özelliklere uygundur.

5.7.1. Yükleme çerçevesi

Bu bölüm çerçevelerin hemen altında yer alan kontrol sistemi, numuneye yük uygulayan elemanlar ve yük-deplasman ölçüm cihazlarından oluşur. Yükleme çerçevesinin kontrolü ön panelde yer alan tuş takımı ve LCD ekran yardımıyla gerçekleştirilir.

5.7.2. Hücre

Teste tabii tutulacak numunenin yerleştirildiği bölümdür. Hücrenin diğer elemanları yük hücresi, yükleme çubuğu ve kullanıcının isteğine bağlı olarak yerleştirilen yanal deplasman (yer değiştirme) ölçerlerdir.



Şekil 5.11. Esneklik modülü cihaz parçaları (Durham vd., 2003)

5.7.3. Hidrolik güç ünitesi

Test sırasında numuneye uygulanacak yükü üreten birimdir. 40000 kPa değerine kadar yağ basıncı üretebilir.

5.7.4. Servo-valf

20000 kPa hidrolik basıncı sinüzoidal (Şekil 5.7) yükün üretilmesi için düzenler.

5.7.5. E/P kontrol ünitesi

Deney esnasında hücre içerisinde oluşturulan yanal basıncın kontrolünü sağlar.

5.7.6. Sinyal şartlandırma ünitesi

Yük hücresi ve deplasman ölçerlerin çalışmasını sağlar ve bu elemanlarla iletişim sağlayan elektronik devreler içerir. Yazılıma girilen veriye göre testin başlatılması için gerekli elektronik sinyalleri üretir. Ayrıca valfler için güç kaynağı ve bir ara yüz kartı içerir.

5.7.7. Bilgisayar

Cihazla iletişimi sağlayan özel bir kart içerir.

Sistem bilgisayar yazılımı testi gerçekleştirir, gerekli veriyi toplar, tek bir dosyada veriyi saklar, gerekli hesaplamaları yapar, sonuç tablolarını ve grafiklerini çizer (Durham vd., 2003; Sağlık ve Güngör 2008).

5.8. Esneklik Modülü Deneyi Numune Hazırlama

AASHTO T 307 standardı deney için hazırlanan numuneleri iri daneli (granüler) ve ince Tip-1 ve Tip-2 malzemeler olarak ikiye ayırmıştır.

5.8.1. Tip-1 ve Tip-2 malzemeler

Tip-1: AASHTO T 307 standardı % 70'ten azı 2 mm (No.10) elekten geçen, % 20'den azı 75 µm (No.200) elekten geçen ve Plastisite İndeksi 10 ve daha az olan temel, alttemel ve dolgu malzemelerini Tip-1 olarak sınıflandırmıştır. Tip-1 numuneler çapı 150 mm, yüksekliği 315 mm olan ve ortadan ayrılabilen silindirik kalıplarda hazırlanır. Tip-1 numuneler için sıkıştırmada Titreşimli Tokmak Metodu önerilir.

Tip-2: AASHTO T 307 standardı Tip-1 sınıfına girmeyen tüm temel, alttemel ve dolgu malzemeleri Tip-2 olarak sınıflandırmıştır. Tip-2 numuneler çapı 100 mm, yüksekliği 210 mm olan ve ortadan ayrılabilen silindirik kalıplarda hazırlanır. Tip-2 numunelerin sıkıştırılmasında statik sıkıştırıcı, titreşimli tokmak veya standart Proktor kullanılabilir.

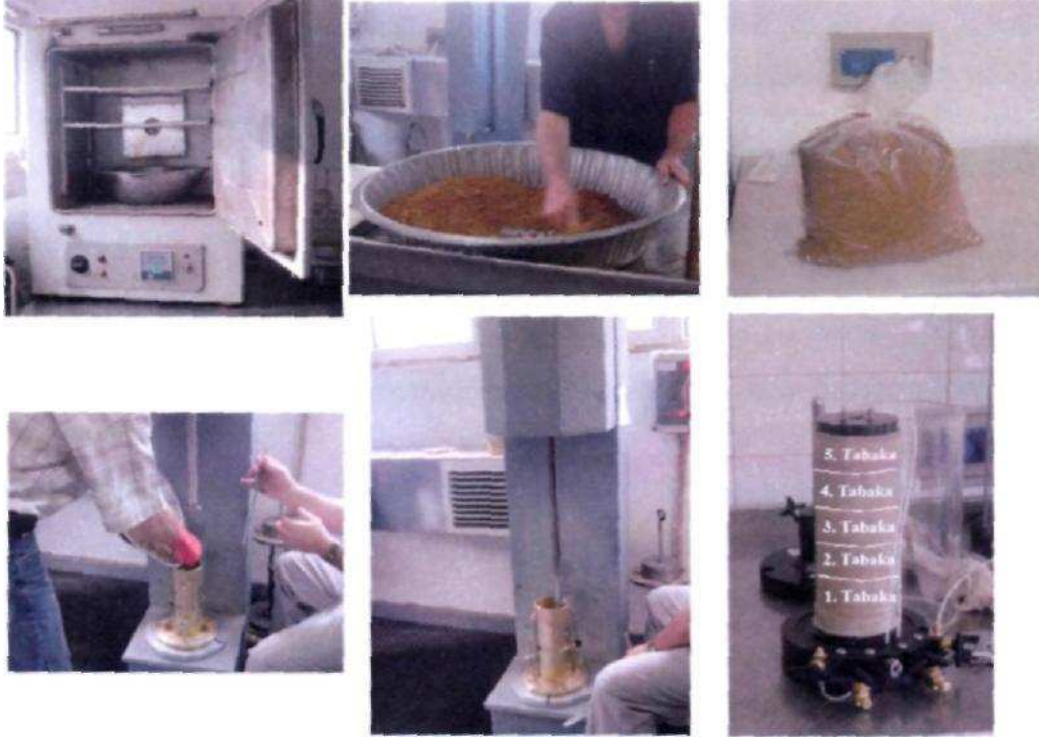


Şekil 5.12. Tip-1 (Sol) ve Tip-2 (Sağ) numune kalıpları (Sağlık ve Güngör 2008)

5.8.2. Tip-1 ve Tip-2 numunelerin hazırlanması

Numune boyutlarının, kohezyon özelliklerinin, dane çapı dağılımı (gradasyon) eğrilerinin ve zemin indeks parametrelerinin birbirinden farklı olmasından dolayı AASHTO T 307 standardı Tip-1 ve Tip-2 numunelerinin hazırlanmasında ve sıkıştırılmasında farklı yöntemler önermiştir. Bu çalışmada ince daneli malzemeler ile çalışıldığından sadece Tip-2 numunesinin hazırlanılışına değinilecektir.

Tip-2 Numunelerin Hazırlanması: İnce daneli zeminler kohezyonlu zeminler olarak tanımlanabilir ve deneyde kullanılacak numune boyutları da Tip-1 numunelere göre daha küçüktür (Şekil 5.12). Dolayısıyla ayırık daneli malzemelere göre kalıptan çıkarma ve taşınma problemleri daha az yaşanır. Ayrıca kalıp yağlanması, numune hazırlanmada dikkatli ve özenli çalışıldığında membran kullanılmayabilir.



Şekil 5.13. İnce daneli zeminlerde (Tip-2) numune hazırlama basamakları (Sağlık ve Güngör 2008)

Tip-2 numunesi hazırlama basamakları Şekil 5.13'te verilmiştir. İnce daneli zeminler bünyesindeki fazla suyun uzaklaşması için laboratuvara geldiğinde öncelikle havalandırılır. Tip-2 malzemeler, hedef su muhtevasına getirildikten sonra 14-16 saat arası ağzı bağlı plastik torbalarda dinlendirilmelidir. Bu işlem, hedef su muhtevasına getirilen malzemenin sıkıştırmadan önce su içeriğinin homojen yayılması için gereklidir. Ardından malzeme AASHTO T 307 standardında istendiği gibi 5 tabaka halinde sıkıştırılır. Maksimum dane çapı küçük olduğu için segregasyon beklenmeyen malzeme her tabaka içine girecek malzemenin ayrı ayrı hazırlanması Tip-2 malzemelerde gerekli değildir. Tip-2 malzemelerin sıkıştırılmasında Karayolları Genel Müdürlüğü laboratuvarında Standart Proctor yöntemi kullanılmaktadır. Tip-2 numuneleri hazırlanırken su içeriğinin hedef su içeriğinden maksimum $\% \pm 0.5$, sıkıştırılmış numunenin yaş birim hacim ağırlığı, hedef yaş birim

hacim ağırlığından maksimum % ± 3 farklı olmasına dikkat edilir (Durham vd., 2003; Sağlık ve Güngör 2008).

5.9. Esneklik Modülü Deneyin Yapılışı

Kalıptan çıkarılan sıkıştırılmış Tip-2 numunesi hücre tabanına konan poroz diskin üzerine yerleştirilir. Numune membransız sıkıştırılmışsa, aparatı yardımıyla membran geçirilir. Numunenin üst kısmına poroz disk ve onun üzerine de yükün numuneye aktarılmasını sağlayacak üst plaka konur. Sızdırmazlığını da sağlamak için membran üzerine, numuneyi hücre tabanına ve üst yükleme plakasına sabitleyen iki lastik conta (o-ring) geçirilir. Esneklik Modülü drenajlı gerçekleştirilen bir deneydir. Drenaj hortumlarının bağlı ve tıkanmamış olması önemlidir. Hücrenin şeffaf üst kısmı numune üzerinden geçirilip taban plakası üzerindeki yerine oturtulur ve sabitlenir. İçindeki numune ile birlikte hücre Esneklik Modülü cihazına bağlanır. Bu sırada yükleme pistonun aksel olarak hücrenin yükleme plakasının merkezine gelmesi sağlanmalıdır. Eksenlerin çakıştırılması üretilen yükün numuneye aktarılmasında büyük önem taşır. Hücredeki numuneye yanal basınç uygulanacak E/P Kontrol Ünite bağlantısı yapıldığında numune deneye hazırdır. Deneye başlamadan 15 dakika önce gerekli üniteler çalıştırılmalıdır (Durham vd., 2003; Sağlık ve Güngör 2008).

Deney yazılımı açılır ve numune ile ilgili istenilen bilgiler yazılıma girilir. Yükleme sürelerinin saniyelerden az olması sebebiyle yaşanan en büyük güçlük deney sırasında numunelere uygulanan yük değerlerinin hedef yük değerlerinden sapma göstermesidir. Bu sorun deney cihazının bilgisayar yazılımıyla sağlanan kontrolü ile önlenebilmektedir. Esneklik Modülü cihazının sahip olduğu PID (Proportional, Integral and Derivative Gain) kontrol sistemi, hedef yük değerleri ile uygulanan yük değerleri arasındaki sapmanın en aza indirilmesini sağlar (Sağlık ve Güngör 2008).

Yazılıma girilen diğer önemli veri, yükleme serisi ve yükleme değerleridir. Esneklik Modülü deneyi için hazırlanmış ticari yazılımlar, haversine yük formunun kullanıldığı 16 farklı yükleme serisi içerir. bu yükleme serilerinde, Tip-1 ve Tip-2 numuneler için farklı deviatör gerilmeler ve yanal basınç değerleri kullanılır. Bunun

nedeni, yol enkesidinde Tip-1 ve Tip-2 malzemelerin bulunduğu konumların farklı olmasıdır. Tip-2 numunelerine etki ettirilen deviatör gerilme ve yanal basınç değerleri, bu malzemeler yol enkesidinde alt tabakalarda yer aldığı için Tip-1 numunelerine göre daha düşüktür. Yükleme serileri, yazılımda numune tiplerine bağlı olarak doğru tanımlanmalıdır (Sağlık ve Güngör 2008).

5.10. Esneklik Modülü Deneyinde Kullanılan Haversine Yükleme Dalgası ve Yükleme Serileri

Numunelere uygulanan 16 farklı yükleme serisinden ilki şartlandırma evresidir. Şartlandırma evresinde, numunede deney esnasında oluşacak kalıcı deformasyonu almak, numune başlıklarıyla numune arasında teması sağlamak ve numunenin sıkıştırılması esnasında meydana gelebilecek olan sıkıntıları ortadan kaldırmak için 1000 adet yükleme gerçekleştirilir. Esneklik Modülü değerinin belirlenmesi için kullanılan diğer 15 yükleme serisinin her biri için yükün tekrar sayısı 100 adettir. Şartlandırma evresinde uygulanan 1000 adet yükleme ve diğer 15 yükleme serisinde uygulanan yüzer adet yük tekrarının her biri, düşey yükün 0.1 sn numuneye uygulanması ve 0.9 sn boyunca numunenin düşey yükten mahrum bırakılması ile gerçekleştirilir (Witczak, 2004).

Deney esnasında uygulanan yüklemeler Şekil 5.7'de gösterilen haversine yük formunda, sinüzoidal olarak gerçekleştirilir. Yükleme pistonu ile numune arasında teması sağlamak amacıyla uygulanan eksenel yüke temas yükü (P_t) adı verilir. Numuneye uygulanan maksimum yük ($P_{max} = \sigma_1 = P_t + P_c$), uygulanan temas yükü (P_t) ve uygulanan tekrarlı (cyclic) yük (P_c) toplamına eşittir. Esneklik Modülü deneyinde uygulanan haversine yükün denklemi 4.4 eşitliğinde verilmiştir (Durham vd., 2003; Sağlık ve Güngör 2008).

$$P_c = \frac{1 - \cos \theta}{2} \quad (5.4)$$

Burada: θ , zamandır.

AASHTO T 307 standardına göre Tip-2 numunelere uygulanması gereken yükleme serileri ve yükleme değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Tip-2 numunelere ait yükleme tablosu

Yükleme Seri Numarası	Yanal Basınç, S_3 $\sigma_3 = \sigma_2$		Max. Eksenel (Düşey) Gerilme, $P_{maks} = \sigma_1$		Periyodik (Tekrarlı) Gerilme, P_c		Sabit (Temas) Gerilme, $P_t = 0.1P_{maks}$		Serilerdeki Yükleme Sayısı
	kPa	psi*	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	500-1000
1	41.4	6	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
2	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
3	41.4	6	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
4	41.4	6	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
5	41.4	6	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	27.6	4	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
7	27.6	4	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
8	27.6	4	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
9	27.6	4	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
10	27.6	4	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	13.8	2	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
12	13.8	2	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
13	13.8	2	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
14	13.8	2	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
15	13.8	2	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100

*1 psi= 6.9 kPa

Hidrolik pompanın kapasitesi 21 MPa ani yükü yüklemek için yeterli olmalıdır. Numune ile ilgili genel bilgiler, katsayılar ve yükleme tabloları yazılıma girildikten sonra deney başlatılır. Deney, başlatıldıktan yaklaşık 45 dakika sonra tamamlanır. Deney tamamlandıktan sonra deney esnasında, numunelerin su içeriklerinde bir değişimin olup olmadığını anlamak için su içeriği numunesi alınmalıdır (Durham vd., 2003; Sağlık ve Güngör, 2008).

BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Giriş

Zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, çeşitli yöntem ve mekanik karıştırma araçlarıyla zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması veya zeminin boşluk oranının azaltılması sırasında zemin iskeltini oluşturan danelerin birbirine daha sıkı tutunmasını sağlamaktır. İyileştirme ile zayıf zeminin taşıma kapasitesini artırmak, toplam oturmaya azaltıp konsolidasyonu hızlandırmak, şev ve dolguların sabit durmasını sağlamak, istinat duvarlarını desteklemek, zeminin taşıdığı sıvılaşma tehlikesini azaltmak amaçlanır. Bu tez çalışmasında yol alt yapısında kullanılacak iki doğal zemine değişik katkıları ile iyileştirme uygulanmış, katkı miktarı ve bekletme süresinin dolgu malzemesi üzerine etkilerini görmek için fiziksel kimyasal mekanik deneyler yapılmış bunları desteklemek için mineral yapıları incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında yapılan tüm deney, katkı miktarları ve kür süreleri Tablo 3.13 ve Tablo 3.14'te verilmiştir. Yöntem olarak etüv kurusu malzemeler optimum su içeriği ile karıştırılarak sıkıştırılmış (TS 1900-1, 2006), hazırlanan numuneler kürlendikten sonra kürsüz deneylere tabi tutulmuştur. 20±2 °C laboratuvar şartlarında farklı süreler kürlenmiş ve küre tabi tutulmamış numunelere serbest basınç dayanımı (SB), 4 gün şişme ölçümü yapıldıktan sonra CBR deneyleri yapılmıştır. 28 gün kürlenmiş % 15 ve % 20 katkı oranlı numunelerin yaş CBR deneyi sonrası dane çapı dağılımı tespiti için hidrometre analizi ve ıslak elemeleri yapılmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Merkez laboratuvarlarında kürsüz % 15 katkılı serilere esneklik modülü (M_R) deneyi yaptırılmıştır. Atıkların zemin geçirimsizliğine etkisini tespit için kürsüz % 10 ve % 20 katkılı zeminlere permeabilite deneyleri uygulanmıştır. 112 gün kürlü karışımların mineral ve mikro

yapılarındaki kimyasal etkileşim sonuçlarını görmek için XRD, SEM ve EDX analizleri yaptırılmıştır.

Zemin-atık (T veya K zemini ilave atık) karışımlarından elde edilen deney sonuçları ve bunların değerlendirmeleri aşağıda ilgili başlıklar altında sunulmuştur.

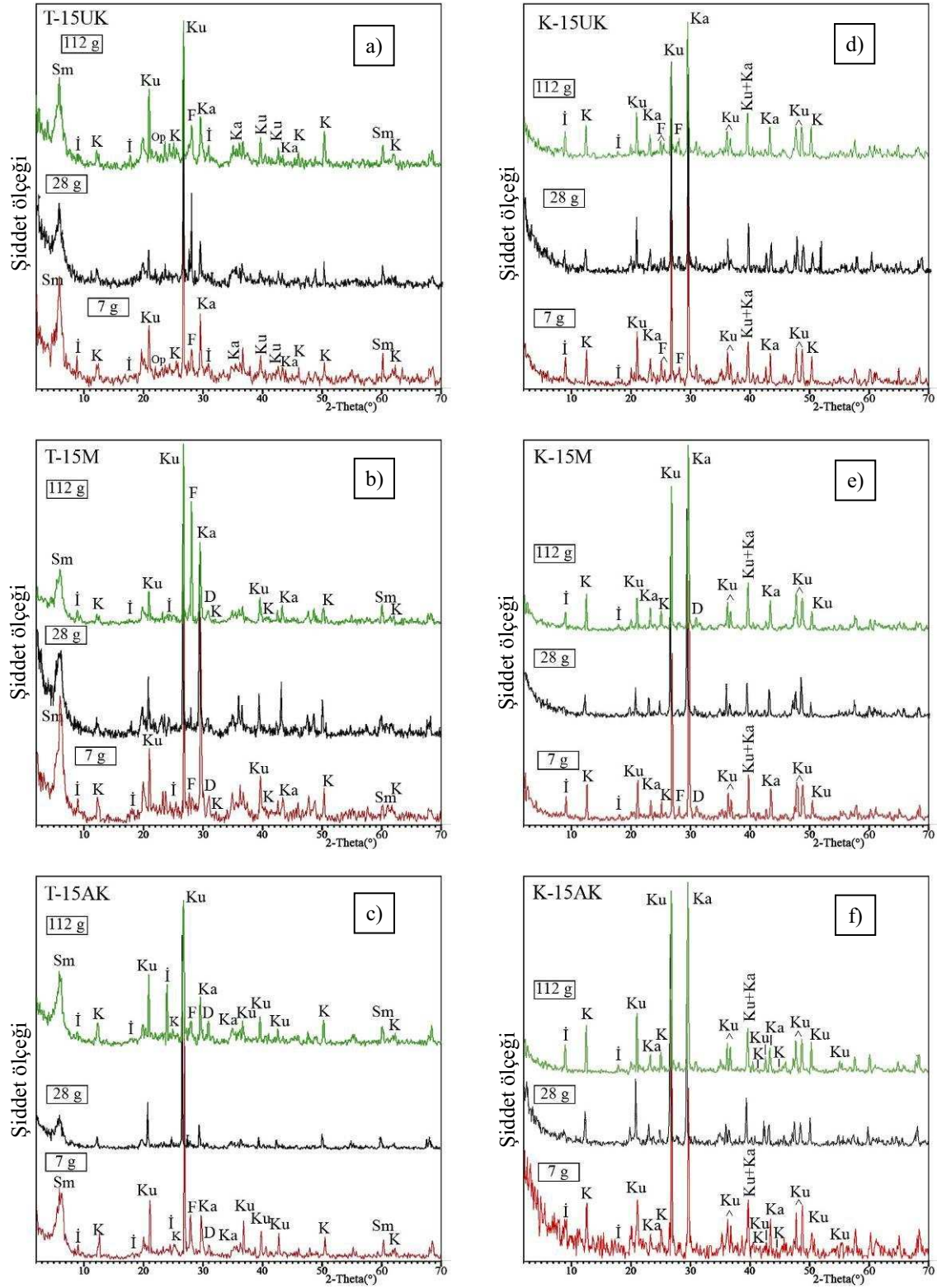
6.2. Zemin-Atık Karışımlarının Mineral ve Mikro Yapı Özellikleri (XRD, SEM)

Zeminlerin fiziksel ve mekanik davranışları açıklanırken maddelerin mineral ve mikro yapılarının buna etki yaptığı vurgulanır. Benzeri şekilde katkılarla zemin iyileştirmesinde de zemin-atık serileri karıştırma anından numune hazırlanan kadar geçen 1-2 saat süre içinde (kısa-kür) ve daha uzun (uzun-kür; 7, 28, 90 gün vb.) süreler sonundaki değişimler incelenir. Danelerin dizilimi, şekilleri, dağılımları, birbirleriyle sürtünmeleri, kimyasal ve/veya fiziksel olaylarla birleşmesi, yapışması gibi mikro düzeyde yapılarındaki değişimler XRD ve SEM gibi analitik incelemeler ile görülür hale getirilebilmektedir.

6.2.1. XRD analizi

Mineral yapıdaki değişimleri görebilmek için % 15 atık ilaveli zemin karışımların 7, 28 ve 112 gün kür sonrası toz difraktogramları belirlenmiş, ilgili zemin-atık serilerin birleştirilmiş difraktogramları Şekil 6.1’de sunulmuştur.

XRD diyagramları karışımların ana mineral bileşenlerini göstermektedir. Bu mineraller simektit, illit, kaolinit, kuvars, feldispat, kalsit, dolomit, opal-CT’dir. Zemin-UK karışımlarında puzolanik reaksiyon sonucu mineral yapıları değişime uğradığı birçok çalışmada bildirilmiştir (Ismaiel, 2006; Antemir vd., 2010; Harichane vd., 2011). Zemin-atık karışımlarında ürün olarak çıkması beklenen hidrasyon bileşikleri yanı sıra zeminlerin kil minerallerinin bileşiminde çok bulunan SiO₂ (kuvars) ile reaksiyon tipine göre çeşitli türde kalsiyum alüminyum ve/veya silikat hidrat kristalinlerin (portlandit, tobermorit vb.) ortaya çıktığı benzer çalışmalarda bildirilmiştir (Bonaccorsi, 2008; Houston vd., 2009; Fırat vd., 2011b).



Şekil 6.1. a), b), c) T-Atık, d), e), f) K-Atık serilerin farklı kür süresinde XRD difraktogramları. UK: uçucu kül, M: mermer tozu, AK: atık kum, Sm: simektit, İ: illit K: kaolinit, Ku: kuvars, F: feldispat, Ka: kalsit, D: dolomit, Op: opal-CT

Tobermorit bir kalsiyum silika hidrat (CSH) mineralidir. Kuvars (SiO_2) ile zemin ve/veya katkının içerdiği kalsiyumlu (CaCO_3 , CaO , Ca(OH)_2) bileşiklerin miktarına göre oluşur. Bu mineral kür süresi arttıkça daha yoğun ve daha sabit yapılar oluşturduğu görülür (Komarneni vd., 1987; Sarkar vd., 2006). T ve K zeminleri özellikle uçucu kül atığıyla iyileşirken puzolanik reaksiyon ürünlerinden dikkate değer ölçüde tobermorit artışı olduğu görülmektedir. Kimyasal formülü $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; ve 9.3 Å ve 11.3 Å politipleridir. 14 Å politipinin adı plomberit (plombeirite) olan tobermorit hidratlardan oluşan bir mineral grubunun adıdır (Bonaccorsi vd., 2005). Birleştiği katyona göre formülü içindeki kristal (mineral) su katsayısı değişir ve molekülün kapladığı hacmi etkiler (Khoury, 2005). 7, 28 ve 112 gün kürlenmiş zemin-atık örneklerin XRD diyagramları arasında bir karşılaştırma yapıldığında tobermorit birleşimlerinden Ca(OH)_2 (portlandit) reaksiyonları kadar SiO_2 azalışlarının da sorumlu olduğu görülür (Horpibulsuk vd., 2010; Fırat vd., 2011b).

Komarneni (1987) tobermoritin içerdiği suya bağlı varyasyonları olduğunu ve temel tabakalanmasının 2:1 kil mineraline benzer kristal yapıya sahip olduğunu belirtmiştir. Zemin-UK serilerinde zemin, UK ve su bir araya geldiklerinde puzolanik reaksiyon nedeniyle kil ana mineral piklerinde değişim (alterasyon) görülmektedir.

Kür süresi arttıkça özellikle kalsit (Ka) ve kuvars (Ku) pik boyları kısalmıştır. Bunun sebebi tobermorit mineral oluşumudur (Şekil 6.1a ve d). Benzer kuvars alterasyonu, kalker (CaCO_3) içerikleri nedeniyle M ve AK atığı ile T ve K zemin etkileşimi sonucunda Şekil 6.1b, c, e, f'de de görülmektedir. Bu difraktogramlarda kil minerallerinden illit (İ) ve kaolinit (K) pik boylarında azalmalar görülmüştür.

Zemin-UK serilerinde ve belirgin olarak T-15UK-28gün ve T-15UK-112gün de simektit (Sm) ve illit mineralleri etkilenmiştir (Şekil 6.1a). Zemin-UK serilerde UK'nın bir çeşit silisyum oksit olan opal-CT (Op) içeriği nedeniyle amorf yapı görülmektedir (Şekil 6.1a, d). Puzolanik malzemenin kimyasal reaksiyonlarda aktif olması için, yeterli miktarda silis, alümin ve demir oksit (SAF) içermesi yanında, ince taneli ve özellikle amorf yapıya sahip olması gerektiği bildirilmiştir (Erdoğan, 2003).

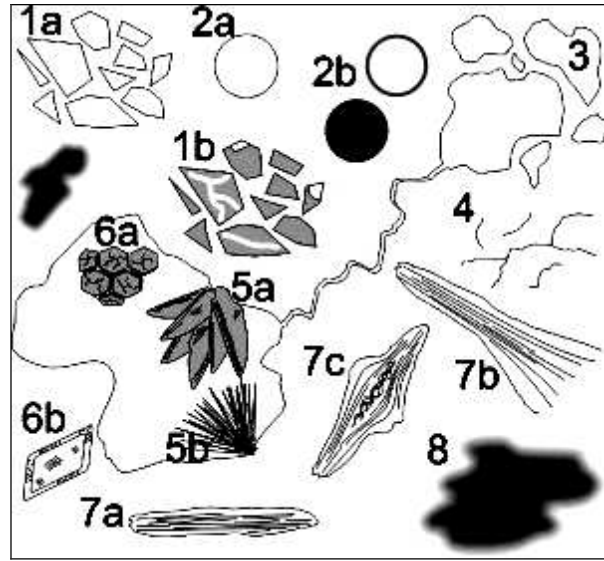
Ayrıca boşluklu yapı oluşumuna da neden olan kil mineral yüzeylerinde oluşan kation değişimi ve karbonatlı yapıların oluşum mekanizması ile izah edilir. Bir alterasyon çeşidi olan bu olay Michaels ve Bolger (1962) çalışmalarında kaolin mineralinin hacim değişikliği mekanizması ile açıklanmıştır. Kaolinit, boy kalınlık oranı yaklaşık 1/10, eş kenarlara sahip olmayan altıgen plakaların oluşturduğu bir alüminyum silika hidrat ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) birleşimidir. Normal şartlar altında, suda süspansiyon haline geldiğinde plakların taşıdığı ve iki yüzüne dağılmış negatif yükler artar. Bu durumda plakların iki yüzünde, artan yük dengeleninceye kadar rastlantısal olarak alıkonan yabancı kationlar (hidrojen, alüminyum, kalsiyum, magnezyum, sodyum vb.), kristal kil kafesi içindeki alüminyum ve silisyumdioksit ile yer değiştirdiği şeklinde açıklanmaktadır. Bu iyonlar sulu ortamda hareketlidir. İyonların hareketinden, 100 gram katı başına 1- 2 meq (milliekuvalent) mertebesine kadar kil Kation Değişim Kapasitesi (KDK) sorumludur.

Zemin-M serilerinde kür süresi arttıkça kil (simektit, illit ve kaolinit) ve dolomit ile birlikte kuvars pikleri de kısalmış. XRD piklerindeki bu değişimin nedeni kil yüzeylerinde oluşan kation değişimi ile karbonatlaşmanın artmasıdır (Şekil 6.1b, e). K zemin-atık serilerinde kuvars pikleri kısalmış, kalker pikleri aynı kalmıştır (Şekil 6.1c, d, e ve f). Bunun nedeni kuvarsın (SiO_2) reaksiyonlarda kullanılmasıdır. Alterasyonlara göre kuvars değişim miktarı çoktan aza doğru sırasıyla K-UK, K-M, K-AK, T-AK'dır.

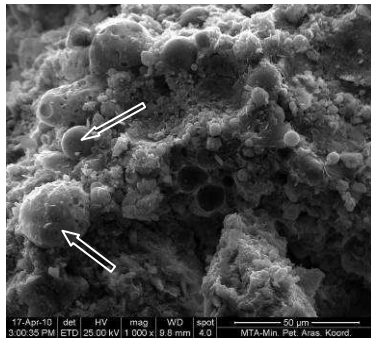
6.2.2. Taramalı elektron mikroskop (SEM ve EDX) analizi

Mineral özelliklerin görülebildiği Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) mikro resimleri de kimyasal iyileştirmede etkili olan kil ve silt minerallerinin şekilleri, dağılımları ve birbirlerine olan konumları hakkında bize bilgi verir.

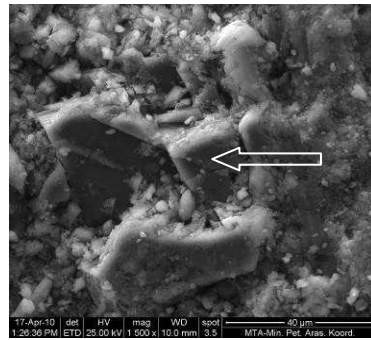
Şekil 6.2'de katkılar ile iyileştirilen zeminlerde kür sonrasında karşılaşılan karakteristik fiziksel ve kimyasal değişiklik (alterasyon) özelliklerin şematik gösterimi verilmiştir (Antemir vd., 2010).



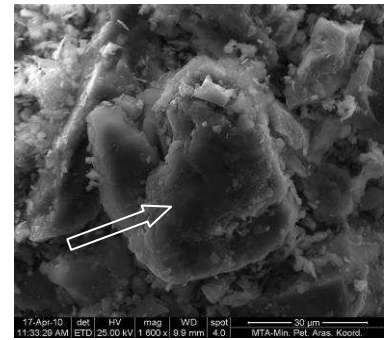
Şekil 6.2. Katkı ve kür ile iyileştirme/katılaştırma (Stabilization/Solidification) uygulanmış zeminlerin mikroskop incelemesindeki ana değişiklikler (alterasyonlar) ve bunları temsil eden özelliklerin şematik gösterimleri. 1a, hidrate olmamış çimento granülleri; 1b, hidrate olmuş çimento granülleri “kalıntıları”; 2a, reaksiyona girmemiş uçucu kül; 2b, kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül senosferi; 3, boşluklar; 4, mikro çatlaklar; 5a, kalsit; 5b, aragonit; 6a, etrenjit; 6b, alçı; 7a, mika granülü; 7b, kaolinleşmiş mika; 7c, alterasyona uğramış etrenjit içeren mika granülü; 8, organik parçalar içeren zemin veya çimento matrisi (Antemir vd., 2010)



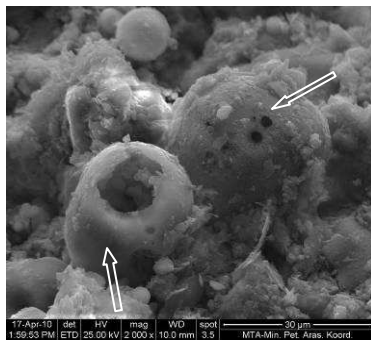
a) T-15UK (x1000)



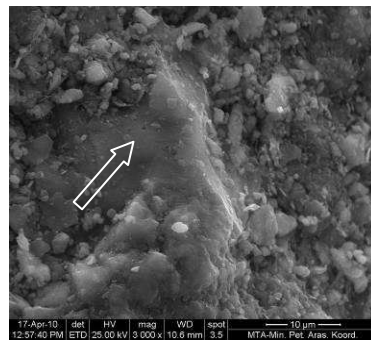
b) T-15M (x1500)



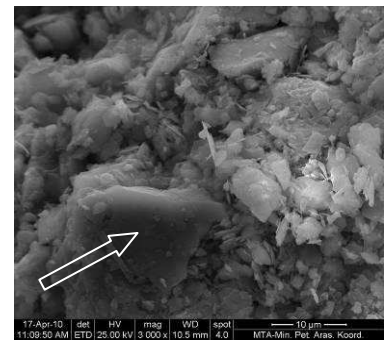
c) T-15AK (x1600)



d) K-15UK (x2000)



e) K-15M (x3000)



f) K-15AK (x3000)

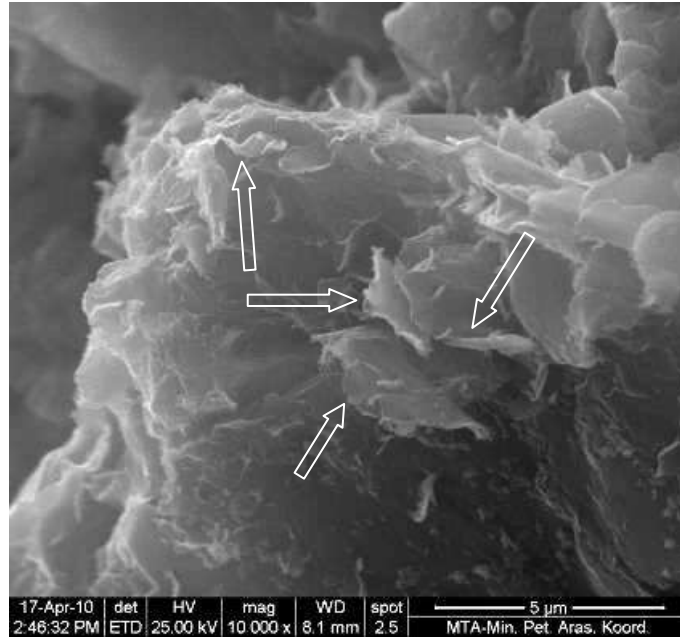
Şekil 6.3. Karışımların 112 gün kür sonrası 1000-3000 büyütme mikroyapıları a), d) uçucu kül (UK), b), e) mermer tozu (M), c), f) atık kum (AK) atık serileri (oklar atık danelerini göstermektedir)

Kalsiyum karbonatın çoklu mikro yapı türleri (polimorfları), sülfat mineralleri (ikincil etrenjit ve alçı), hidratasyona uğramamış çimento daneleri, ikincil bağlayıcılar (pulverize uçucu kül) ve bunların kalıntısı, yıpranmış mineral fazlar sıklıkla gözlenenler arasındadır (Antemir vd., 2010). Karbonatlı çoklu yapı türleri CSH şeklinde anılır temel kimyasal yapıları $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ 'dur. Çimentolanma ve/veya puzolanik reaksiyonlar ile oluşurlar. En sık rastlanılan bu hidratasyon ürünü mineraller portlandit ve tobermorittir.

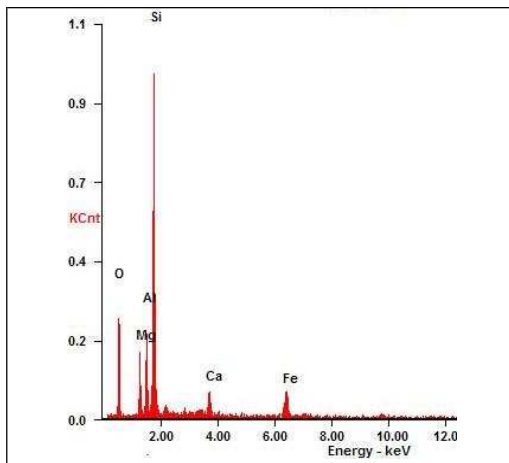
Mikro yapı gösteren yüzey şekillerinde (morfolojide) en fazla değişimi görebilmek amacıyla SEM analizleri için % 15 katkılı karışımlar kullanılmıştır. 112 gün kür sonunda serbest basınç dayanımı tespit edilen, MTA'da $110\pm 10^\circ\text{C}$ etüvde kurutulan numune parçaları altın ile kaplandıktan sonra SEM cihaz yuvasına yerleştirilmiştir. Farklı büyütmelemler ile karışımların genel ve detay mikro yapıları incelenmiş tipik özelliklere sahip noktaların mikro resimleri çekilmiş ve EDX analizleri yapılmıştır.

Karışımların kür sonrası genel görünümüne ait tipik SEM mikro resimleri Şekil 6.3'te verilmiştir. Resimlerde zemin atık etkileşimi ve karışımlara ilave edilen uçucu kül (UK) küresel daneleri (Şekil 6.3a, d), keskin köşeli mermer tozu (M) (Şekil 6.3b, e) ve yüzeyi karbonatla kaplanmış atık kum (AK) (Şekil 6.3c, e) daneleri görülmektedir.

Şekil 6.4'te T-15UK karışımının 10000 büyütmeleli mikro yapısında puzolanik reaksiyon nedeniyle karışım öncesine göre (Şekil 3.6c) T zemin mikro yapısındaki simektit yaprak kıvrımlarının küçüldüğü ve azaldığı görülmektedir. T-15UK karışımında SEM çekiminin yapıldığı bu kesitte yapılan EDX analiz sonucu Şekil 6.5'te verilmiştir. T-15UK karışımı EDX analizi ana (uzun) piklere bakıldığında Ca, Si ve O piklerinin belirgin bir şekilde yüksek olması hidratasyon ürünü olan CSH jellerinin (minerallerinin) yoğun olarak karışımın mikro yapısında bulunduğunu göstermektedir (Karakurt, 2008). Analizde görünen Mg ve Fe içeriği karışıma UK ile gelmiştir.



Şekil 6.4. T-15UK karışımının 10000 büyütme mikro yapısı

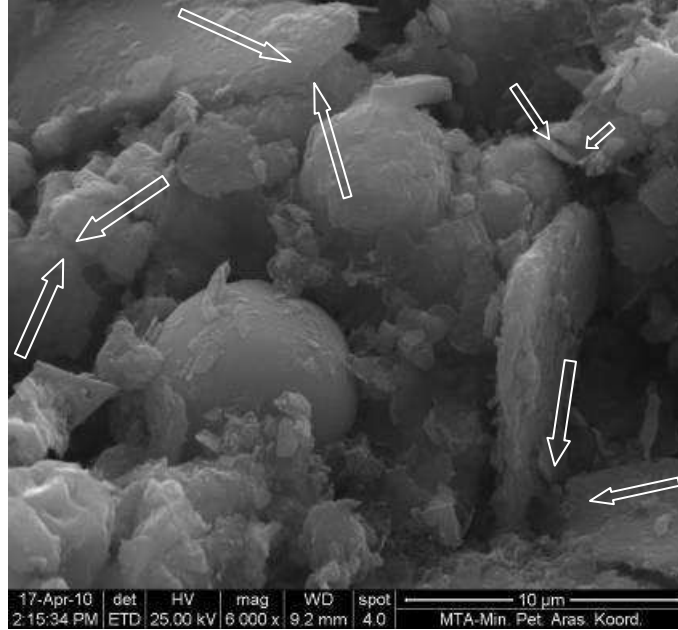


EDX Analiz Sonucu		
Element	Ağırlıkça,%	Atomal %
O	34.36	49.11
Mg	6.60	6.20
Al	9.69	8.22
Si	38.96	31.72
Ca	3.03	1.73
Fe	7.37	3.02
Toplam	100.00	100.00

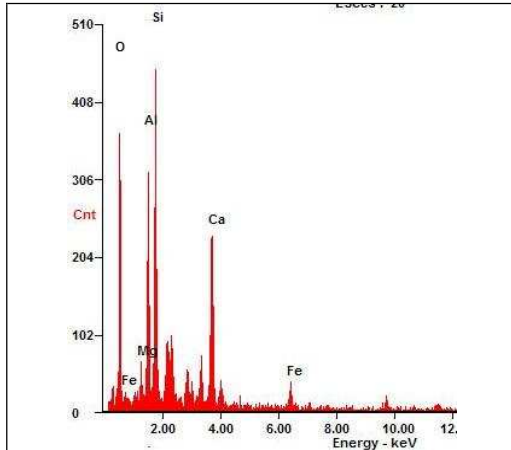
Şekil 6.5. T-15UK karışımının EDX analizi

Şekil 6.4'te T-15UK karışımının 10000 büyütme mikro yapısında puzolanik reaksiyon nedeniyle karışım öncesine göre (Şekil 3.6c) T zemin mikro yapısındaki simektit yaprak kıvrımlarının küçüldüğü ve azaldığı görülmektedir. T-15UK karışımında SEM çekiminin yapıldığı bu kesitte yapılan EDX analiz sonucu Şekil 6.5'te verilmiştir. T-15UK karışımı EDX analizi ana (uzun) piklere bakıldığında Ca, Si ve O piklerinin belirgin bir şekilde yüksektir. Bu da hidrasyon ürünü olan CSH jellerinin (minerallerinin) yoğun olarak karışımın mikro yapısında bulunduğunu göstermektedir (Karakurt, 2008). Analizde görünen Mg ve Fe içeriği karışıma UK ile gelmiştir.

Şekil 6.4'te T-15UK karışımının 6000 büyütme mikroskopisinde puzolanik reaksiyon nedeniyle karışım öncesine göre (Şekil 3.6c) T zemin mikroskopisindeki simektit yaprak kıvrımlarının küçüldüğü görülmektedir. T-15UK karışımında SEM çekiminin yapıldığı bu kesitte yapılan EDX analiz sonucu Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.6. K-15UK karışımının 6000 büyütme mikroskopisindeki mikro yapısı



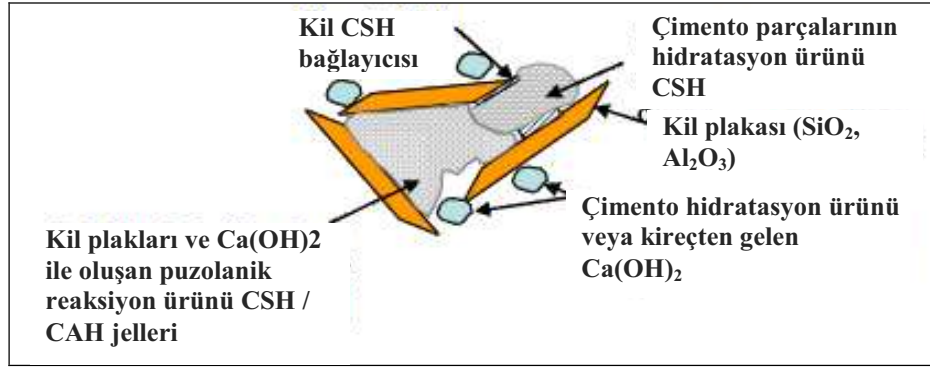
EDX Analiz Sonucu		
Element	Ağırlıkça,%	Atomik %
O	50.31	65.85
Mg	1.97	1.70
Al	13.20	10.25
Si	20.70	15.43
Ca	10.76	5.62
Fe	3.05	1.14
Toplam	100.00	100.00

Şekil 6.7. K-15UK karışımının EDX analizi

K-15UK karışımı EDX analizinde ana piklere bakıldığında Ca, Si ve O piklerinin belirgin bir şekilde yüksek olması bu karışımın da hidrasyon ürünü olan CSH minerallerinin yoğun olarak karışımın mikro yapısında bulunduğunu göstermektedir. CSH minerallerinin yoğun olması Şekil 6.6'da verilen mikro yapıyla da

örtüşmektedir. Kil plakalarının kenarlarında ve aralarında ilave olarak UK ile kil plakaların arasında karbonat oluşumları görülmektedir.

K-15UK karışımında puzolanik reaksiyon nedeniyle karışım öncesine göre (Şekil 3.6d) K zemin mikro yapısındaki kaolin yaprakların kenar-kenar ve kenar-yüzey (kart-evi) şeklinde yapıyı oluşturduğu görülmektedir (ok uçları plakaların birbirine temas eden ayrıtlarını göstermektedir). Bunun sebebi, pH'ın özellikle kenar yüklerini etkilemesi, kil daneleri arasında çiftli tabaka değişimi ve flokülasyona sebep olması nedeniyle, van der Waals çekim kuvvetinin kenarlardan-yüzeğe ve kenardan-kenara farklı olmasından dolayı burada da görüldüğü gibi dane çiftinden dane çiftine değişiklik göstermesidir (Kloprogge, 1998; Karakaya, 2006).

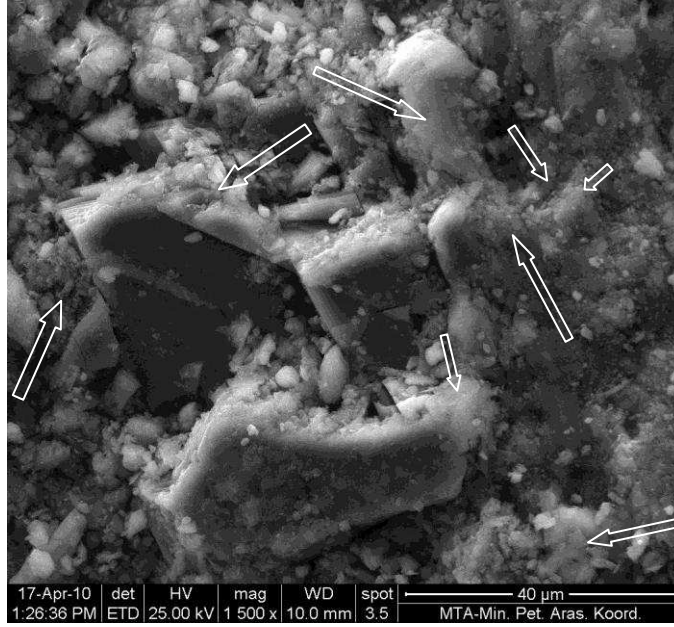


Şekil 6.8. Kireç zemin etkileşimi (puzolanik reaksiyon vb.) ile oluşan mikro yapının şematik gösterimi (Peethamparan, 2006)

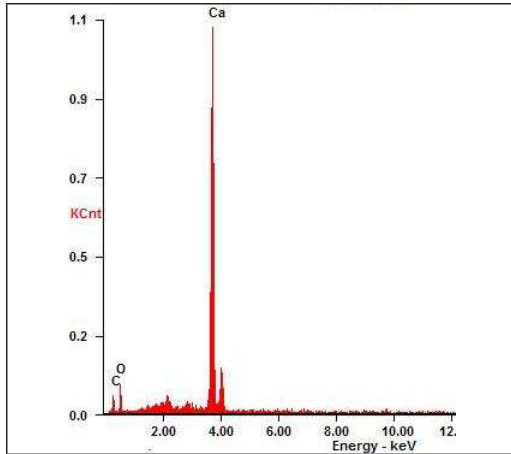
Peethamparan'a (2006) göre gerçek kireç zemin reaksiyon mekanizması için bilim insanları arasında tam mutabakat olmasa da genelde fikir birliği olan temel reaksiyonlar katyon değişimi (başta Ca^{2+} olmak üzere mevcut olan çeşitli katyonların değişimi), flokülasyon ve aglomerasyon, puzolanik reaksiyon ve karbonatlaşmadır (Şekil 6.8). M katkılı serilerde (Şekil 6.9 ve Şekil 6.11) kil plakalarının ve mermer dane ayrıtlarının net bir şekilde görünmeme (beyaz oklar) sebebi Şekil 6.8'de şematik olarak gösterilen zemin-kireç karbonatlaşması ile oluşan mikro yapıdır.

Şekil 6.9'da T-15M karışımının 1500 büyütme mikro yapısında katyon değişimi nedeniyle karışım öncesine göre (Şekil 3.6c) T zemin mikro yapısındaki simektit yaprakları görülmemektedir. T-15M karışımında SEM çekiminin yapıldığı bu kesitte yapılan EDX analiz sonucu Şekil 6.10'da verilmiştir. Analizde görünen karbon (C)

içeriği kızdırma kaybı yüksek olan mermer tozundan gelmektedir. Karışımın EDX analizinde ana piklere bakıldığında katyon değişimi ürünü Ca ana piki belirgin ve yüksektir. Bu durum karışımda yoğun karbonatlaşma olduğunu göstermektedir (Peethamparan, 2006).



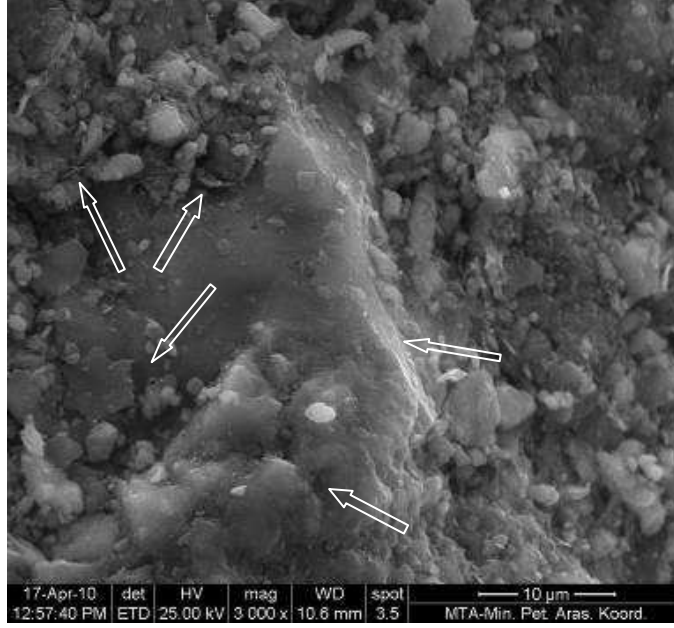
Şekil 6.9. T-15M karışımının 1500 büyütmeli mikro yapısında karbonatlaşma (oklar)



Şekil 6.10. T-15M karışımının EDX analizi

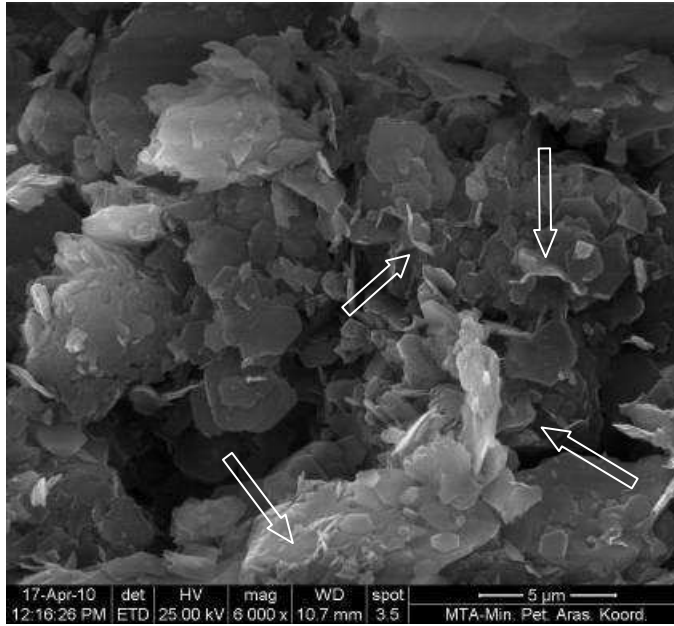
EDX Analiz Sonucu		
Element	Ağırlıkça,%	Atomal %
C	13.35	25.64
O	28.29	0.78
Ca	58.36	33.58
Toplam	32.79	24.99

Ufak ve büyük karbonat kümelerinin olması Şekil 6.9 ve K-15M mikro yapısının verildiği Şekil 6.11'de verilen mikro yapılarla örtüşmektedir.



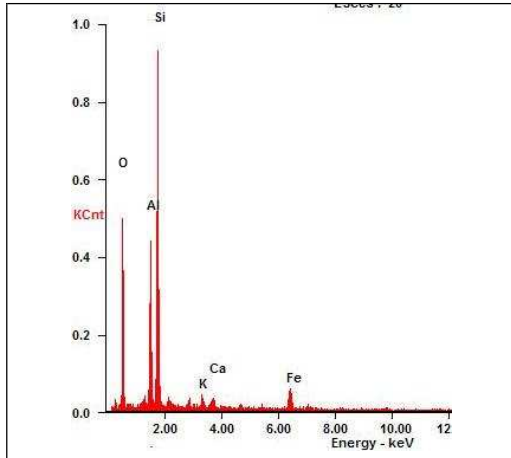
Şekil 6.11. K-15M 3000 büyütmeli mikro yapısında karbonatlaşma (oklar)

Şekil 6.12’de T-15AK karışımının 6000 büyütmeli mikro yapısında karışım öncesi gibi (Şekil 3.6c) T zemin mikro yapısındaki simektit yaprakları görülmektedir.



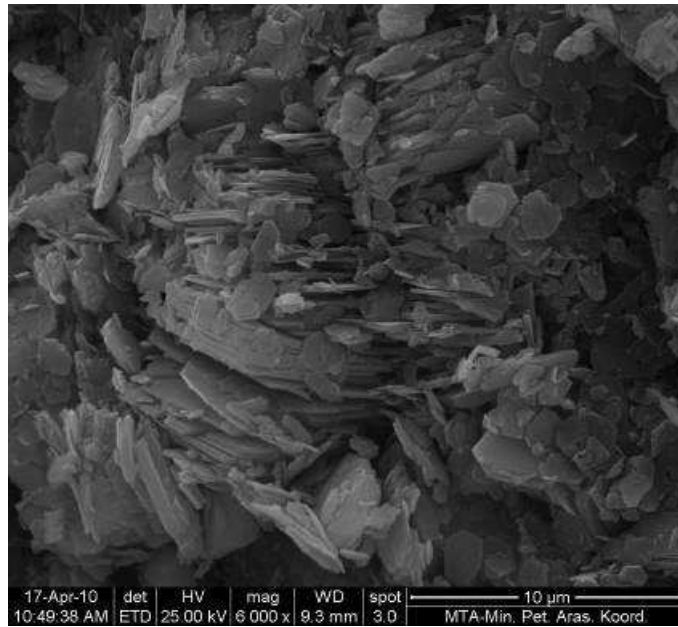
Şekil 6.12. T-15AK karışımının 6000 büyütmeli mikro yapısı

T-15AK karışımında SEM çekiminin yapıldığı kesitte yapılan EDX analiz sonucu Şekil 6.13’te verilmiştir. Analizde ana piklere bakıldığında silis (Si) piki belirgin bir şekilde yüksektir ve bu silis içeriği atık kumdan gelmektedir.

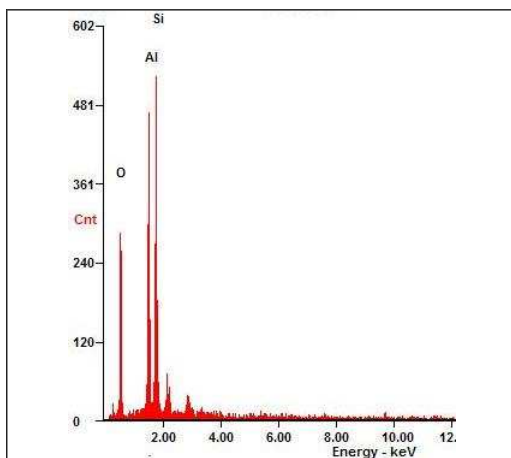


EDX Analiz Sonucu		
Element	Ağırlıkça,%	Atomal %
O	45.16	60.41
Al	13.98	11.09
Si	32.79	24.99
K	1.40	0.77
Ca	1.30	0.69
Fe	5.37	2.06
Toplam	100.00	100.00

Şekil 6.13. T-15AK karışımının EDX analizi



Şekil 6.14. K-15AK karışımının 6000 büyütme mikroyapısı

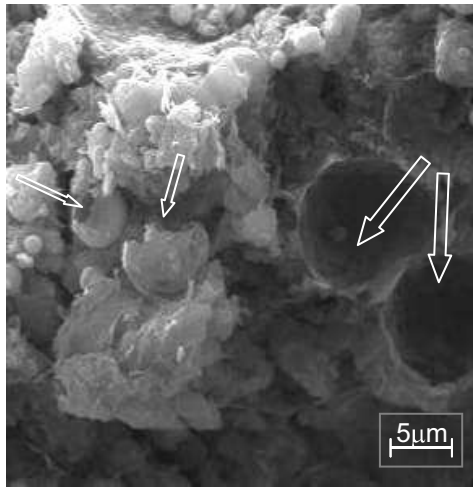


EDX Analiz Sonucu		
Element	Ağırlıkça,%	Atomal %
O	44.81	58.38
Al	21.99	16.99
Si	33.19	24.63
Toplam	100.00	100.00

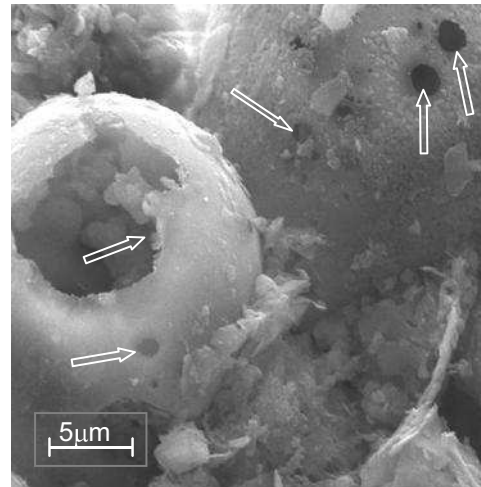
Şekil 6.15. T-15AK karışımının EDX analizi

Şekil 6.14'te K-15AK karışımının 6000 büyütme mikroskopu yapılarında herhangi bir reaksiyon olmaması nedeniyle karışım öncesi gibi (Şekil 3.6d) K zemin mikroskopu yapılarında bulunan yoğun kaolin plakları görülmektedir. K-15AK karışımında SEM çekiminin yapıldığı kesitte yapılan EDX analiz sonucu Şekil 6.15'te verilmiştir. Analizde ana piklere bakıldığında silis (Si) alüminyum (Al) pikleri belirgin bir şekilde yüksektir. Buradaki silis içeriğinin bir kısmı atık kumdan bir kısmı da kaolin kilinden gelmektedir. Analizde görünen Alüminyum (Al) içeriği kilden gelmektedir.

Şekil 6.16a ve b'de mikroskopu yapı içinde reaksiyona katılan uçucu kül küreleri daha detaylı görülmektedir. Sırasıyla T-15UK ve K-15UK karışımında zemin ile UK danelerinin birbiri ile kaynaştığı görülmektedir. Reaksiyonlar neticesi T zeminde bazı UK daneleri (büyük beyaz oklar) tamamen kaybolduğu düşünülen, K-UK serisinde ise reaksiyonlarla incelmış ve delinmiş UK dış çeperi (senosferleri) küçük beyaz okla gösterilmiştir.



a) T-15UK karışımı



b) K-15UK karışımı

Şekil 6.16. a) T-UK b) K-UK karışımının hidrasyon belirtilerinin detay görünüşleri, büyük oklar geriye kalmış uçucu kül senosfer şeklinde boşluk, küçük oklar incelmış ve delinmiş senosferleri göstermektedir

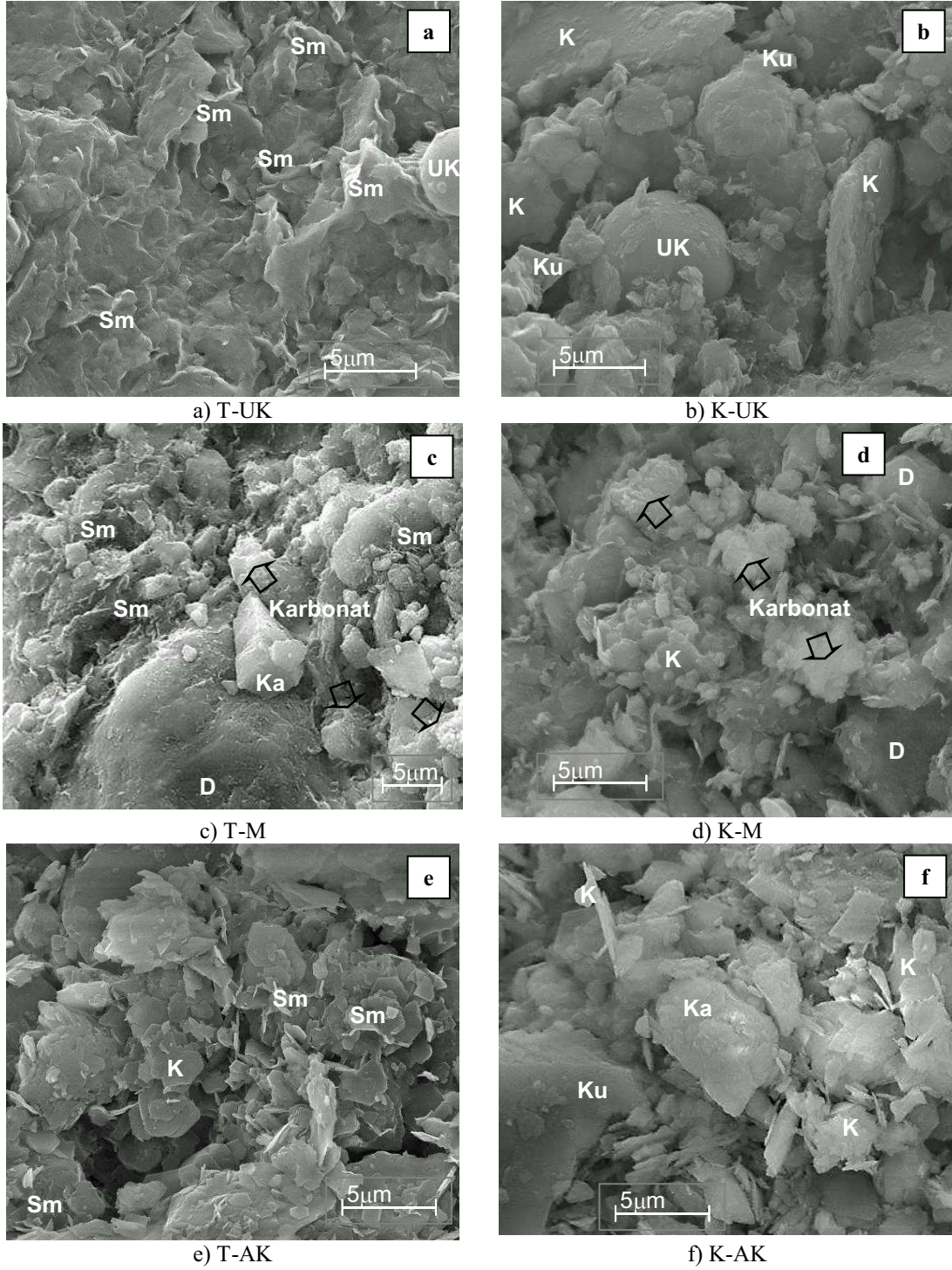
UK küreleri ile kil plakalarının oluşturduğu mikroskopu yapı şematik olarak Şekil 6.19a'da verilmiş kart evi dizilişi (Şekil 6.17a ve b) nedeniyle zemin-UK karışımında maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) beklenmediği halde azaltmıştır (Şekil 6.21a ve b). Bununla beraber T-UK'nın γ_{kmax} 'ı 100%T ile yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir (Şekil 6.21). UK katkısı dane çapı dağılımlarında kil miktarı azalmış silt miktarını arttırmıştır (Şekil 6.22a ve b). UK'lı karışım 28 gün kür sonunda en

yüksek serbest basınç dayanımı (Şekil 6.25a ve b), CBR'ı (Şekil 6.28) ve en düşük şişme yüzdesi (Şekil 6.29a-d) ve kürsüzken en büyük permeabilite katsayısına (Şekil 6.23) sahiptir. Bu, mekanik ve fiziksel özellikler daha önce UK ile yapılmış çalışmalara uygun sonuçlardır (Chang, 1995; Cömert ve Fırat, 2008; Ahmaruzzaman, 2010; Antemir vd., 2010; Harichane vd., 2011).

Şekil 6.17c'de T-15M karışımının karakteristik yapısı daha detaylı görülmektedir. Mermeri oluşturan kalsit (Ka) ve dolomit (D) daneleri içerdiği bağlı kirecin yüzeylerindeki kireçle reaksiyonu ile T zeminin içerdiği kıvrımları azalmış simektitin (Sm) ince yaprakları görülmektedir.

Şekil 6.17c ve d'de dolomit (D), kaolin (Ka) ve (siyah oklarla gösterilmiş) karbonat kümeleri dikkat çekicidir. Zemin-M karışımlardaki Ka ve D'den oluşan mermer tozu ve kil dane dizilimi birbirine yakın konumlu değildir. Bu nedenle daneler arasında boşluklar gözlenmektedir. Bu dizilime zemin-AK karışımlarında da rastlanmaktadır (Şekil 6.17e ve f). Bu (kart evi) dane yapısından oluşan boşluklar CBR ve şişme yüzdesini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca bu dane dizilimi malzeme ve katkı türüne göre permeabilite katsayısını artış veya azalış yönünde etkilemektedir. AK ilaveli karışımlarda, geniş aralıklı danelerden oluştuğu ve birbiri içine girmiş yapıların olmadığı tespit edilmiştir. Zemin-atık karışımlarından M ve AK serilerinde CBR ve şişme yüzdeleri gibi bazı özelliklerde benzerlik görülmektedir. Şekil 6.17e ve Şekil 6.17f'deki karışımları dane konumlarına göre karşılaştırıldığında T zemin-atık birbirine dik (kenar kenar veya kenar yüzey) konumlu K zemin-atık birbirine paralel (yüzey yüzey) konumlu danelere sahip olduğu görülmektedir (Michaels ve Bolge, 1962; Kloprogge, 1998).

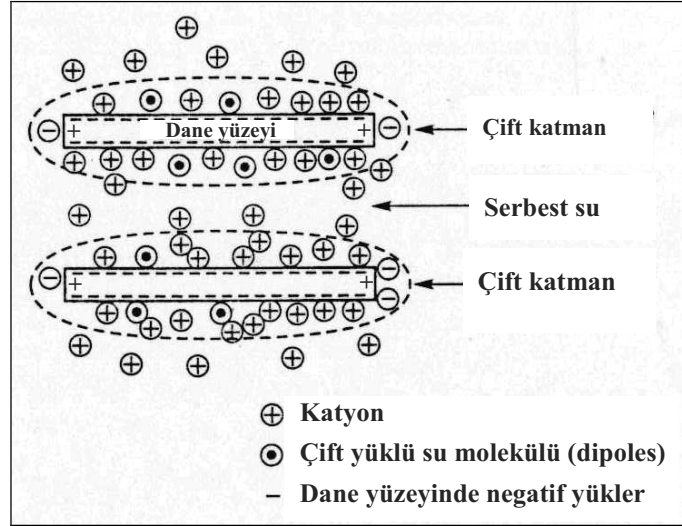
SEM mikro resimleri kür sonrasında tüm numunelerde büyük miktarlarda hidrat ürününün oluştuğunu göstermektedir. Özellikle UK katkılı karışımlarda iğne şekilli kristal oluşumlar dikkat çekmektedir. Bunlar dolgu karışımındaki farklı katı parçalar arasındaki bağların genişlemesini sağlar (Fırat vd., 2011).



Şekil 6.17. Karışımların 112 gün kür süresi sonunda SEM mikro resimleri a), d) UK, b), e) M, c), f) AK atık serileri, Sm: simektit, UK: uçucu kül, K: kaolin, Ku: kuvars, Ka: kalsit, D: dolomit, Siyah oklar: karbonat kümeleri.

Yüksek pH ($pH > 6$) gibi uygun ortamlarda, (3.3)'te verilen bölünme reaksiyonundan ortaya çıkan OH^- iyonları aşındırıcı etkisi ile zemin matrisini oluşturan mineralleri bölerek parçalara ayırır. Özellikle UK, zemin daneleri ve optimum su içeriği ile oluşan yoğun çözeltide bulunan, ağ yapısı oluşturan yapıtaşları silikat ve

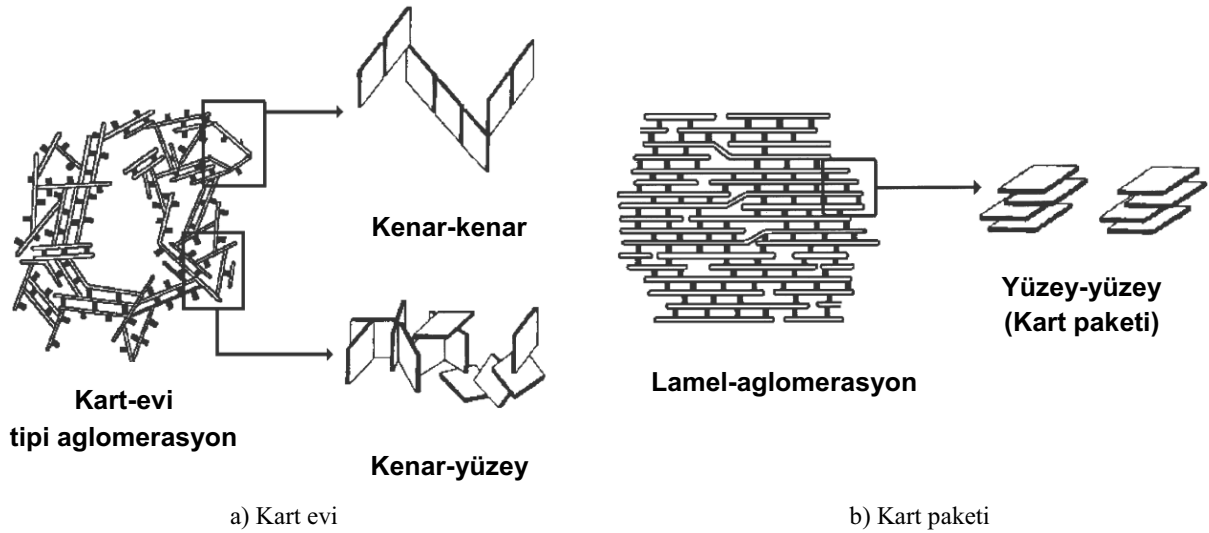
alüminosilikatlar çözeltide bulunan polimerleri monomerlere ayrılarak (dissolve) dağıttıktan sonra (3.4) ve (3.5)'te verilen puzolanik reaksiyonları ile zemin iyileştirmesinde önemli rol oynayan iki temel çimentolanma bileşeni olan C-S-H ve C-A-H yapılarını oluşturur (Silitonga, 2009).



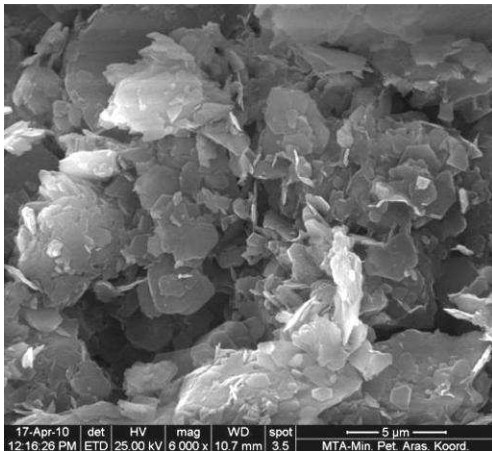
Şekil 6.18. Kil minerallerinde çift katmanın gösterimi (Başer, 2009)

Asidik koşullar altında ($\text{pH} > 6$) plakaların uçlarında alümina açığa çıkarak hidrojeni bağlar ve uçlara artı yük olarak ekler. Dolayısıyla kil danelerin kenar (uç) ve yüzleri arasındaki elektrostatik çekim kuvveti ile araları son derece genişleyen (boşluk hacmi artan) pulların "kart-evi" (card-house) oluşumuna neden olur (Şekil 6.19a) (Kloprogge, 1998). Şematik gösterimi Şekil 6.19a'da verilen T-15AK'nın Şekil 6.20a'daki kart-evi görüntüsünün nedeni kıvrımlı simektit yaprakları da içeren T zemininin doğal yapısıdır. T-AK karışımı, mikro resimlerdeki danelerin üzerinde bir tabakası oluşturarak net olarak görünmesini engelleyen Ca içeriği çok azdır. İlaven bu karışımın içerdiği Ca reaksiyona girmek için silis içeriği % 90 olan AK'yı tercih etmesidir. Bu durum Şekil 6.1c ve f'de verilen difraktogramlarıyla da örtüşmektedir. Şekil 6.16a, b ve Şekil 6.17a, b'de mikro yapıları görülen zemin-UK serilerinde K zemini ve UK'da bulunan CaO ile kil daneleri reaksiyona girmiştir. Simektit ve kaolinler uçucu kül kürelerini de içlerine alarak, danelerin karbonatla kaplandığı kart-evi görünümünü oluşturmuştur. Alkali koşullar altında ($\text{pH} < 6$), kenarlar nötr veya negatif yüklerle yüklenir, çözelti içindeki elektrolit konsantrasyonu düşer ve parçacıklar dağılır (deflocculated). Yüksek elektrolit konsantrasyonu (hem yüksek

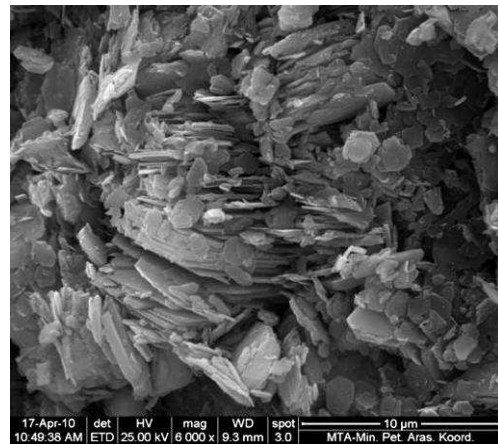
hem de düşük pH'ta) plaklarda elektrostatik itme veya çekmeyi azaltır, çünkü çift katman sıkıştırması veya iyon kalkanı yüzey yükleri azalır (Şekil 6.18). Bu koşullar altında, yüzeyinde kalan değerlik kuvvetleri parçacıkları diğer parçaların yüzeyleri doğrultusunda yüzey yüzeye “kart-paketi” (card-pack) şeklinde toplanmasına neden olur (Kloprogge, 1998). Dolayısıyla şematik gösterimi Şekil 6.19b’de verilen K zemini Şekil 6.20b’de kaolin plakları kart-paketi şeklini daha net görülmektedir. Bunun nedeninin kireç AK reaksiyonu olduğu düşünülmektedir. Kaolin-AK süspansiyonu parçacık etkileşimlerinin büyüklüğü ve geometrisinin kontrol ve tahmin edilebildiği böylece sistematik olarak incelenebildiği ideal bir madde oluşturmaktadır (Michaels ve Bolge, 1962; Kloprogge, 1998).



Şekil 6.19. Kıl plaklarının kümelemesinin şematik gösterimi a) kart-evi , b) kart-paketi (Kloprogge, 1998)



a) T-15AK karışımı



b) K-15AK karışımı

Şekil 6.20. Karışımların SEM mikro resimleri a) T-AK kaolin dizilimleri (yüzey-uç), b) K-AK kaolin dizilimleri (yüzey-yüzey) genel görünüm

Zemin-AK serileri yüksek SiO₂ içermektedir. Şekil 6.20'deki SEM resimlerinde görüldüğü gibi bu serilerde kil plakları üzerinde karbonatlaşma görülmemektedir. Bunlardaki kil minerallerinin doğal dizilimi ile Şekil 6.19'daki kil plakların kümelenmesi arasındaki benzerlikte çok net bir şekilde görülmektedir. T-AK ve K-AK serilerindeki bu net görüntünün, bölünme ile kil plaklarından ayrılan Ca²⁺ iyonlarıyla % 89 SiO₂ içeren AK'nın katyon değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.3. Zemin-Atık Karışımlarının Sıkıştırma (Kompaksiyon) Özellikleri

Atık oranı % 40'a kadar çıkan, 36 farklı zemin-atık karışımının maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) ve optimum su içeriğini (w_{opt}) belirlemek için standart Proktor enerjisi ile sıkıştırma deneyi yapılmıştır. Karışımların atık miktarına karşılık gelen, w_{opt} ilişkisi Şekil 6.21a ve b'de, γ_{kmax} ilişkisi Şekil 6.21c ve d'de verilmiştir. w_{opt} 'lar T zemini-atık karışımlarında atık türüne göre artma veya azalma gibi farklı özellikler göstermiş w_{opt} atık miktarı arttıkça, AK'da azalış, M'de artış, UK'da % 20'ye kadar azalış sonra artış göstermiştir. K zemini-atık karışımlarında atık miktarı arttıkça w_{opt} artmıştır.

Karışıma eklenen kireç arttıkça bu w_{opt} ve γ_{kmax} miktarının azaldığı açıkça görülebilir. Benzer davranış önceki kireçle iyileştirilen killi zemin çalışmalarında gözlemlenmiştir (Bell, 1996; Silitonga, 2009; Harichane 2011). Bu davranışın izah edilmesinde olası nedenler şöyle sıralanabilir: 1) Kireç kil aglomerasyonu parçacıkların daha büyük boşluk işgal etmesine ve dolayısıyla bu değişim zeminin etkili bir şekilde kümelenmesine neden olur, 2) Kirecin özgül ağırlığı genellikle çalışmalarda kullanılan zeminlerden daha azdır, 3) Zeminin içerdiği kil parçalarının birbiri ile ve kireçle yapmış oldukları puzolanik reaksiyonlar w_{opt} 'un artışına sebep olmaktadır (Harichane, 2011).

Karışımların fiziksel özelliklerine göre sonuçların karşılaştırması: Şekil 6.21a ve b'de görüldüğü gibi T-M ve K zemine katılan tüm katkılar için atık oranı arttıkça w_{opt} artmıştır. Bunda ilk neden ince daneli atık yüzdesinin artması ile danelerin özgül

yüzeyinin artmış olması ve sıkıştırma için gerekli su miktarının artmasıdır (Saghafi vd., 2008; Mishra vd., 2010).

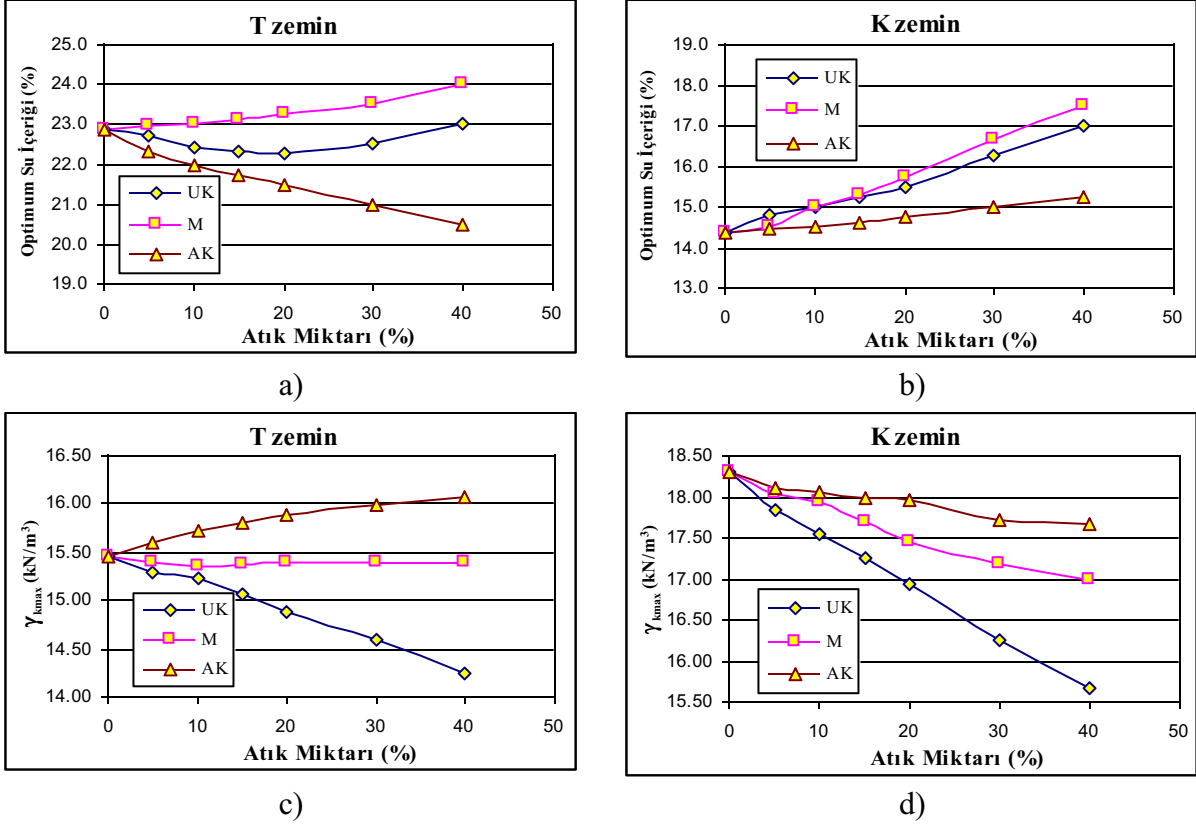
Zemin özelliklerine göre sonuçların karşılaştırması: Şekil 6.21a ve b'de w_{opt} artışı görülmeyen tek karışım T-AK'dır. T'nin ve AK'nın katyon değişimi için gerekli alümin (Al_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) içeriği düşüktür. Bu karışımda atık-zemin iyileştirmelerinde gözlenen su, atık ve kil bir araya geldiği anda gerçekleşen hızlı reaksiyonlar, katyon değişimi ve bölünme reaksiyonları gerçekleşmemektedir (Ene ve Okagbue, 2009). Bu nedenle T-AK karışımında sıkışmada atık miktarı artarken ilave suya ihtiyaç duymaz ve w_{opt} azalır. Benzer şekilde K zemini karışımlarında w_{opt} artışının K-AK'da en az olduğu görülmektedir (Şekil 6.21b).

Şekil 6.21c ve d'de görüldüğü gibi γ_{kmax} değeri atık miktarı arttıkça, T-AK'da artmış K-AK'da azalmıştır. Bu sonuç Ene ve Okagbue (2009) yaptığı çalışma ile paralellik göstermektedir. Sırasıyla γ_{kmax} değerindeki artma ve azalmanın nedeni AK atığı T zemini içindeki boşlukları ve boşluklarda bulunan suyu azaltır (Ene ve Okagbue, 2009). K zemininde ise K'nın CaO içeriği yüksektir, bölünme reaksiyonu nedeniyle Ca^{2+} iyonları ve boşluk miktarı artar bu γ_{kmax} değerinin azalmasına sebep olur.

T ve K zeminleri M atığı ile işlem gördüğünde katyon değişim reaksiyonu sonucu flokülasyon (pıhtılaşma) veya aglomerasyon (bir araya gelerek topaklanma) neticesi boşluk miktarı ve ağırlık-hacim oranı azalmaktadır. Okagbue ve Onyeobi (1999) mermer tozu ve üç farklı zeminle yaptığı çalışma sonuçları, M katılan zeminlerin sonuçlarına benzer neticeler vermiştir. Diğer taraftan M katkılı karışımların w_{opt} oranı da artmaktadır. Bu karışımdaki mermer tozu miktarının artması ile ihtiyaç duyulan suyunda artmasının bir sonucudur. Kireç benzeri katkılı karışımlarda olduğu gibi su ihtiyacı katkı miktarıyla artmaktadır (Bell, 1989; Little, 1995; Al-Rawas vd., 2005; Cömert, vd., 2005a; Güney vd., 2007). Katyon değişim reaksiyonu, $Ca(OH)_2$ molekülü Ca^{2+} ve OH^- iyonlarına ayrıldığından daha fazla kalsiyuma (Ca) ihtiyaç duyar (Okagbue ve Onyeobi, 1999).

γ_{kmax} değerleri atık miktarı arttıkça, K zemininin daha fazla Ca içermesinden dolayı tüm atık katkılarında azalma görülmektedir. Ayrıca atıklarında farklı oranda Ca

içermesinden dolayı γ_{kmax} farklı oranlarda azalmıştır. Azalış oranı azdan çok olana doğru AK, M ve UK şeklinde sıralanmıştır (Şekil 6.21d).



Şekil 6.21. Zeminlerin atık miktarına karşı, a), b) Optimum su içerikleri (%), c), d) Maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmax}) (kN/m³)

Birim hacim ağırlık T-M'de aynı kalmıştır çünkü T zemininde bulunan %7 serbest kalsiyum boşluk miktarını çok fazla arttıramamıştır. Ayrıca M daneleri T zemin danelerinden daha küçük ve zemin daneleri arasını doldurduğu için katkı miktarı arttıkça M katkısı w_{opt} 'u az miktarda arttırmıştır (Şekil 6.21c). T-UK'da katkı miktarı arttıkça w_{opt} azalmış % 20'den sonraki büyük oranlarda artma gözlenmiştir. Bunun sebebi UK % 20 oranına kadar T zemin boşluklarını doldurması ardından içerdiği serbest kireç (katyon değişimi) nedeniyle boşluk hacminin artışıdır. Bu ve UK danelerinin boşluklu yapıya sahip oluşu T-UK'da katkı miktarı arttıkça γ_{kmax} değerini hızla düşürmüştür. UK ve AK atıklarının dane çapı dağılımı (Şekil 3.12) benzerdir, ancak SEM resimlerinden ve özgül ağırlığından bilindiği gibi AK daneleri içi dolu danelerdir. Dolayısıyla AK atığı T zemine katıldığında etkisi γ_{kmax} artması şeklinde gözlenir. Atık özelliklerine göre sonuçların karşılaştırması: γ_{kmax} T zemininin atık

çeşidine bağlı olarak atık miktarı arttıkça artma veya azalma yönünde olurken K zemininde bütün atıklarda atık türüne göre farklı miktarda azalmıştır. Bunun nedeni, K zemini kötü derecelenmiş dane çapı dağılımı nedeniyle kendi başına daha iyi sıkıştırma özellikleri vermesidir. Ayrıca katılan atıkların ise dane boşluk oranı (UK), dane dış şekline göre (UK yuvarlak; M ve AK köşeli) ve özgül ağırlığına göre büyükten küçüğe doğru K zemine katıldığında γ_{kmax} değerinin azalmasına sebep olmuştur. M'nin Gs değeri AK'dan daha büyük olmasına rağmen M'nin CaO içeriği fazla olduğundan katyon değişimi ve bölünme reaksiyonları fazla olmuş sıralandığında en büyük γ_{kmax} 'ı AK katkısı vermiştir. En fazla serbest CaO içeriğine sahip UK ise γ_{kmax} karşılaştırmasında en küçük değerleri almıştır (Şekil 6.21d). Bu değerlendirme permeabilite deney sonuçları (Şekil 6.23) ile paralellik göstermektedir.

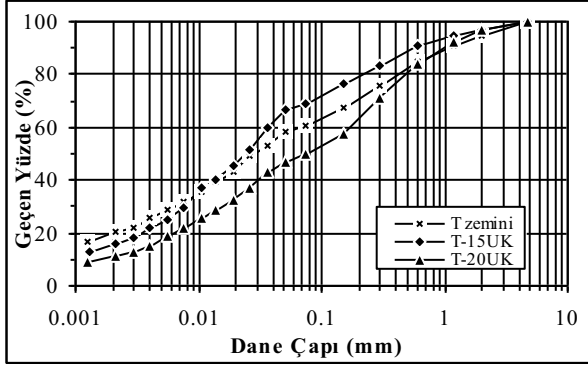
Sonuçlar zemin iyileştirmesinde fiziksel özellikler kadar kimyasal reaksiyonlarında etkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle bu iki mekanizmayı içine alan olaylar bütününü fiziko-kimyasal özellikler başlığı altında incelemek malzemeyi doğru tanımak ve tanımlamakta büyük önem taşımaktadır.

İki zeminde de % 40 kadar farklı katkı oranlarında atık kullanılmış, her oranda maksimum kuru birim hacim ağırlığı Karayolu Teknik Şartnamesi (KTS) dolguda kullanılabilme sınırı olan $\gamma_{kmax} = 14.23 \text{ kN/m}^3$ değerinin üstüne çıkmıştır. Karışımlarda en düşük γ_{kmax} değeri 14.24 kN/m^3 ile T-40UK numunesinde elde edilmiştir. KTS'nin γ_{kmax} kısıtlamasına uygun olarak % 40 AK, M, UK atık miktarına kadar T ve K ile yapılmış tüm karışımlar dolguda kullanılabilir olarak tespit edilmiştir.

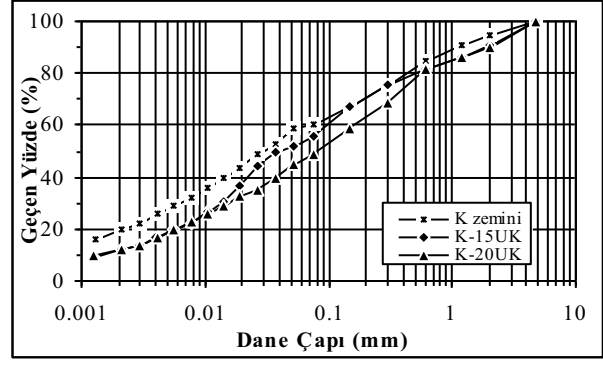
6.4. Zemin-Atık Karışımlarının Dane Çapı Dağılımı

Dane çapı dağılımı deneyleri zemin-atık etkileşiminin en iyi görülebileceği düşünülen oranlar olan % 15 ve % 20 katkılı serilere, hidrometre ve ıslak eleme yöntemiyle TS 1900-1/2006'ya uygun olarak yapılmıştır. Standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılan ve 28 gün kür edilen karışımların CBR deneyi sonrasında alınan numunelere hidrometre ve elek analizi sonrası dane çapı dağılım eğrileri çizilmiştir. Eğriler, katkısız T ve K zemin granülometri eğrileri ile aynı grafiğe çizilerek

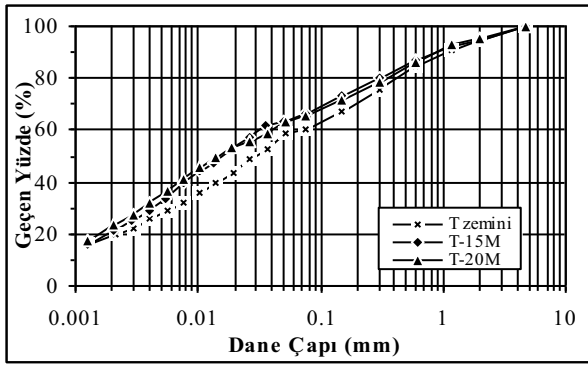
karşılaştırılmıştır. Zemin ve atık cinslerine göre gruplandırılmış eğriler Şekil 6.22a-f'de verilmiştir. Şekil 6.22'de bulunan granülometri eğrilerinden elde edilen karşılaştırma sonuçları aşağıda sunulmuş, eğrilerden bahsedilirken kısa karışım adları kullanılmıştır.



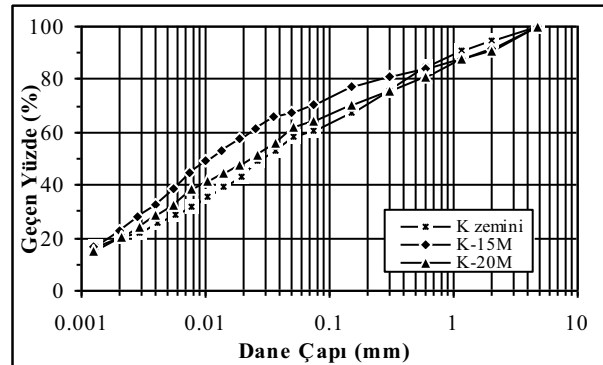
a)



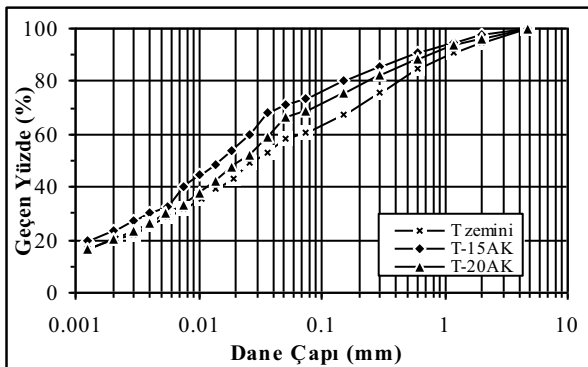
b)



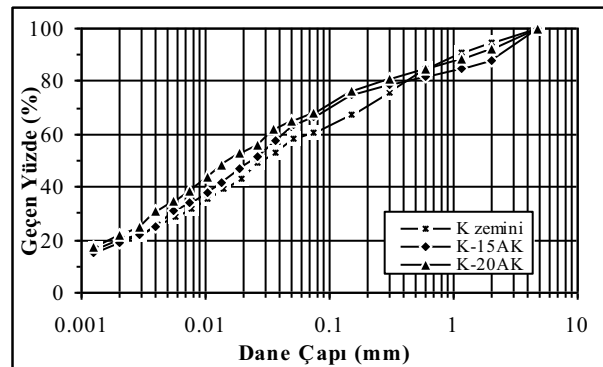
c)



d)



e)



f)

Şekil 6.22. 28 gün kürlü, zemin-atık dane çapı dağılımları, % 15 ve % 20 a), b) UK, c), d) M, e), f) AK karışımları

Güner'e (2011) göre granüler malzemelerde, iri daneli A gibi bir malzemeye daha ince daneli bir B malzemesi katıldığında karışımın granülometri eğrisi A ve B malzeme granülometri eğrilerinin arasında çıkar, başka bir deyişle karışımın eğrisi iri

daneli A malzeme granülometri eğrisinden daha yukarıda çıkar. M, AK ve UK atıklarının dane çapı dağılımında sırasıyla içerdiği ince (kil + silt) % 97, 75, 54 ve içerdiği kum % 3, 25 ve 47'dir. Dolayısıyla zemin-atık karışımlarının ince daneli malzeme kısmını atıklar oluşturmaktadır. Fiziksel olarak zemin, atık ve su birleştirildiklerinde aralarında kimyasal reaksiyon oluşmadığında zemin-atık karışımlarının dane çapı dağılımı eğrisi karışıma katılan malzemelerin oranlarından hesaplanabilir. Doğal olarak bu durumda karışımların granülometri eğrileri %100 T ve K zemin eğrilerinden daha yukarıda çıkması beklenir. Buna kısaca granülometride "eğri kuralı" dersek, T-15AK ve T-20AK'nın granülometri eğrilerinin bütünü bu eğri kuralına uymaktadır (Şekil 6.22c). Bunun nedeni T zemin ve AK atığın toplamda az miktarda (% 8) CaO içermesi ve daha önceki tartışmada açıklandığı gibi bu kirecin kation değişim katsayısı nedeniyle silikatlarla reaksiyonu tercih etmesidir.

Granülometri eğri kuralına bir kısmı ya da bütünü uymayan karışım eğrilerinde çimento ve puzolanik reaksiyonlar meydana gelir, boşluk hacmi artar ve kil daneleri flokülasyon ve birleşme (aglomerasyon) nedeniyle büyür. Benzer karışımlardaki kil oranının azalıp dane çapı dağılımındaki iri dane oranı artışları araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Wild vd., 1996; Kinuthia, 1997; Koyuncu, 1998; Okagbue, 2007; Cömert vd., 2010a; Fırat ve Cömert, 2011a). Şekil 6.22c, e'deki % 15 ve 20 katkılı T-M, T-AK karışım eğrilerinin hepsi T eğrisi ile bir kaç noktadaki çakışması dışında granülometri eğrilerinin bütünü bu kurala uygundur. T-20M eğrisi T-20AK eğrisine göre T zemin eğrisine daha yakın oluşu M'nin CaO içeriğinin yüksek oluşu ile açıklanabilir.

Şekil 6.22a ve b'deki granülometri eğrileri bir kaç çakışma dışında büyük kısmı bu kurala uymayan T-20UK, K-15UK ve K-20UK karışımlarıdır. Ayrıca T-15UK karışımı 0.002 mm'den 0.01 mm boyutuna kadar, K-20M 0.6 mm'den büyük ve K-15M 0.3 mm'den büyük dane boyutlarında eğri kuralı dışına çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi puzolanik reaksiyonlar sonucu bu karışımlardaki iri dane çaplarının artmasıdır. Şekil 6.22d ve f'de iri dane kısmında kurala uymayan karışımlardan K-20M ile K-20AK ve K-15M ile K-15AK eğriler benzer seyir izlemişlerdir. M katkılı karışımlarda bunun nedeni CaO'dan kaynaklanan puzolanik reaksiyonlar, flokülasyon ve birleşmelerdir (Agrawal, V. ve Gupta, M., 2011). AK katkılı

karışımlarda bunun nedeni AK'nın Silis ve alüminyum oksit içermesi, uzun süreli çimentolanma reaksiyonları ve K zeminin içerdiği kireç ile kil danelerinin flokülasyonu ve birleşmesi olduğu düşünülmektedir. Okagbue (2007) tarafından ahşap külü ile yapılan bir çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ahşap külü Ca içeriği % 31 silisyum oksit içeriği % 53 ve Al ve Fe içeriği toplamı % 6 olarak tespit edilmiştir. Ahşap külü Si, Al ve Fe oksit oranları ile AK atığına benzerlik göstermektedir. AK oksitler, K zemini içindeki CaO ve w_{opt} kadar su (H_2O) ile karışınca bölünme reaksiyonları neticesi kil daneleri Ca^{2+} fazlalığına sebep olur. Bunun sonucu olarak Ca^{2+} karmaşık kil yapıları içindeki zayıf metalik (Na^+ , K^+ ve Mg^{2+}) katyonlarla yer değiştirir. Bu katyon değişimi kil tabakaları arasında (difüzyonla) emilmiş su miktarını azaltırken, aynı anda kil daneleri birbirine daha yakın durabilme fırsatı bulur yani flokülasyon (Şekil 6.24) oluşur. Flokülasyon ve birleşme mekanizması ağır ağır bir araya gelme ve toparlanarak daha büyük dane çapları (Şekil 6.24 3.Sınıf) oluşturarak kil dokusu değişikliğini ortaya çıkartır (Okagbue, 2007). Sonunda bu reaksiyonlar killeri silt ve siltleri de kum boyutuna büyütürken malzemenin dane çapı dağılımını değiştirir.

Şekil 6.22a'da reaksiyonlar sonucu T-20UK'nın çoğu kısmında ve T-15UK'nın 0.010 mm den küçük kısmında T eğrisinin altına inilmiştir. Eğri kuralına T-20UK'da 0.600 mm'den büyük ve T-15UK'da 0.010 mm'den büyük kısmında uyulmuştur. Şekil 6.22b'de reaksiyonlar sonucu K-UK serisinde UK zeminin bütün dane çaplarında (kil, silt, kum) iri dane oranları artmış, eğri kuralı dışına çıkmıştır.

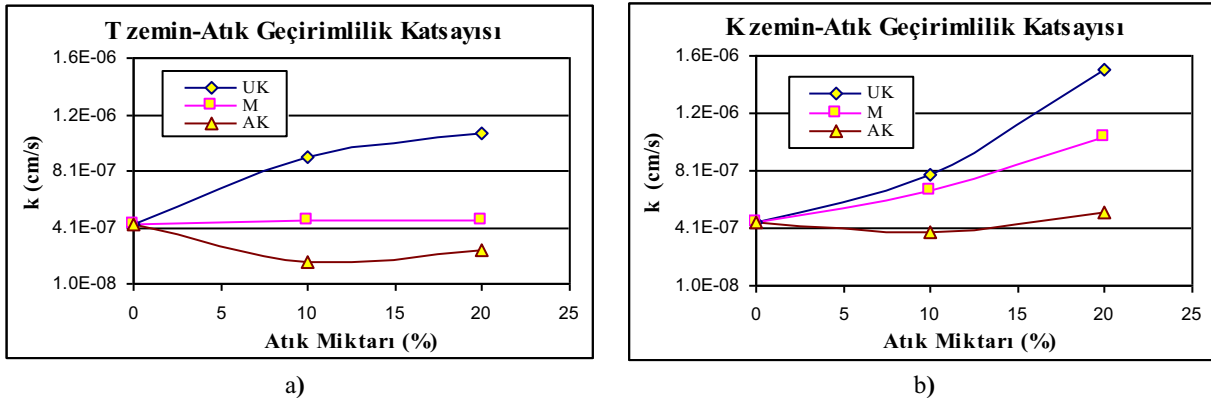
Şekil 6.22c, d, e ve f'de zemin-M ve zemin-AK serilerinde % 15 ve 20 atık miktarlarının 28 gün kür sonra dane çapı dağılımına kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ancak M serisindeki eğri kuralına uymayan silt ve kil oranı artışının M katkısından gelen silt ve kil daneleri ve özellikle Şekil 6.22d ve f'de K zemininden gelen CaO reaksiyonlarıdır.

6.5. Zemin-Atık Karışımlarının Geçirimsizlik (Permeabilite) Özellikleri

Geçirimsizlik deneyleri, kürsüz % 10 ve % 20 atık miktarlı standart Proktor kalıbında sıkıştırılmış karışımlara, 4 gün su emdirilip doymun hale getirildikten sonra

yapılmıştır. Doymunlaştırma süresi tespiti için deney programı içinde karışımlara yapılan ön deneylerle debiler ölçülmüştür. Karışımlarda geçirgenlik debisinin en uzun sürede (4 gün) sabitleştiği UK serisi olmuştur. Bu nedenle karışımların doymunlaştırma süresinin 4 gün olmasına karar verilmiştir.

Geçirimsizlik katsayıları Terzaghi vd. (1996) ye göre 10^{-6} cm/s den küçük olan zeminler pratik olarak geçirimsiz ve 10^{-4} den küçük olduğunda yumuşak kil (soft clay) olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla Şekil 6.23'te görülen bu çalışma kapsamında permeabilite deneyine tabi tutulan tüm zemin-atık karışımları k katsayılarına göre geçirimsiz yumuşak kil olarak sınıflandırılmıştır. İşlem görmemiş (% 0 katkı) T ve K zeminde permeabilite katsayıları (k) sırasıyla 4.3×10^{-7} ve 4.5×10^{-7} cm/s bulunmuştur. Buna göre T ve K zeminleri de pratik olarak geçirimsiz ve yumuşak kildir (Şekil 6.23).



Şekil 6.23. Atık miktarına göre a) T-atık, b) K-atık karışımlarının permeabilite katsayıları (k)

Şekil 6.23'te görüldüğü gibi geçirgenlik ve katsayısı T-atık serilerinde katkı miktarı arttıkça, AK ile % 10'da azalmış, % 20'de artmış, M ile çok değişmemiş, UK ile her oran artışında artmıştır. K-atık serisinde, AK ile % 10'da azalmış, % 20'de artmış bunun yanında değişimler küçük olmuştur, atık miktarı arttıkça M ile artmış, UK ile oran artışında belirgin miktarda artmıştır.

Kireç, kireç-uçucu kül gibi bağlayıcılarla iyileştirilmiş zeminlerin hidrolik geçirgenliği hakkındaki özgün çalışma ve verileri sınırlıdır. Benzer atıklarla işlem görerek iyileştirilen zeminlerin özellikle uzun süreli kür sonrasındaki geçirgenlik

derinlemesine açıklığa kavuşturulması gereken karmaşık bir problemdir (Ismail, 2006).

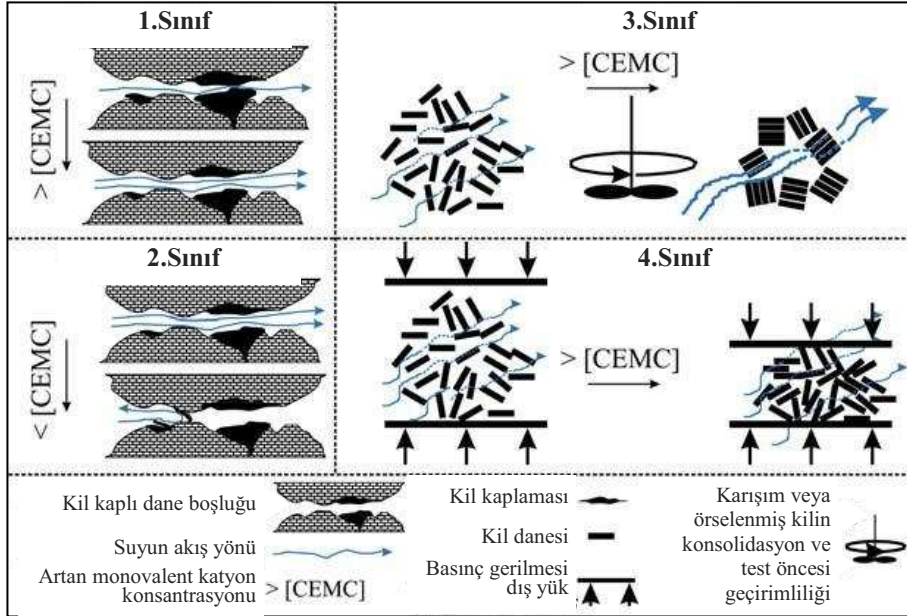
Schmitz'in (2006) zeminlerin geçirimsizliği üzerine yaptığı deneysel çalışmalara göre zeminleri oluşturan bağımsız daneler üç şekilde birbirlerine bağlanmaktadır:

- Çimentolanma: Kalsit, silika ve oksitlerle oluşur. Ortam basıncından az veya çok etkilenen bu bağlayıcılarla, ortam sıcaklığı ve/veya boşluktaki akışkan kimyası ile geoteknik mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılır.
- Parçacıkların kilitlenmesi: Başkalaşıma (alterasyona) uğramış ya da sıkıştırılmış killi zeminlerde oluşur.
- Elektrostatik güçler: Bu güçler çoğunlukla boşluktaki akışkan kimyasına bağlı ve parçacık yüzeylerinde kendini göstermektedir.

Schmitz'e (2006) göre bu üç şekilde birbirine bağlanmış kil danelerinin birbiri ile konumları ve özellikle çift katmandaki yük dağılımı (Diffuse Double Layer, DDL) ile oluşturdukları zeminlerin geçirgenliğine değişik şekillerde etki eder. Bunlardan sıkıştırma (kompaksiyon) ile elde edilen zemin numunelerinin geçirimsizliği dört sınıfta değerlendirilmiştir. Schmitz'e (2006) göre Şekil 6.24'te şematik görünümü verilen bu dört geçirgenlik sınıfının özellikleri özetle şöyledir:

1. Sınıf: Zemine dış kuvvetlerin etkisi yoktur, sıvı akışı sadece çift katmanın değişen kalınlığı ile oluşan boşluk hacmine göre değişir. Burada DDL ile geçirimsizlik arasında ters orantı vardır.
2. Sınıf: Zemine dış kuvvetlerin etkisi yoktur, sıvı akışı çift katmanın erozyonu sırasında boşlukta oluşabilecek tıkanmaya bağlıdır. Burada geçirimsizlik boşlukların tıkanması durumunda biter.
3. Sınıf: Kil parçacıklarını yeniden düzenleyecek veya biraz arttırarak parçaların tek kalmasını önleyecek kadar dış kuvvet vardır veya hiç yoktur, çift katman kalınlığı çift katman yapısı çökene kadar azalır, süspansiyon içinde gevşek olmayan parçacıklar ile birleşerek granüler dane boyutlarında bir artışa neden olur (flokülasyon). Veya çift katman kalınlığının artması ile süspansiyon içinde gevşek olan parçacıklarla birleşerek bu parçalarda bir azalmaya neden olur (peptit, amino asitlerin birbirine bağlanmasıyla oluşan kısa polimer). Burada zemini oluşturan kil

danelerinin floküle ve peptit oluşturmaya göre permeabiliteyi artırır ya da azaltabilir.



Şekil 6.24. Bazı sıvıların (özellikle tuzlu sular) zemin geoteknik özellikleri üzerine etkileri, uygulama şartları (sıkıştırma, konsolidasyon vb.) ile oluşan danelerin dizilimine bağlı olan kil çift katman kalınlığının değişimi ile açıklanabilir. Dielektrik (yalıtkan) katsayısını azaltan monovalent (katyon) konsantrasyonunun artışı (> CEMC) olan tuz çözeltisi artışı ile geçirgenlik artmaktadır (Schmitz, 2006)

4. Sınıf: İy yapıya suyun ulaşılabilirliğini azaltacak dış kuvvetler dikkate alınır, eğer çift katman kalınlığı azalır, kil daneleri arasındaki elektrostatik itme kuvvetleri azalır (etkisiz kalır). Bu miktarı aşan dış kuvvet ile kil daneleri birbirine yapışır. Kuru birim hacim ağırlık ve geçirgenlik azalır.

Terzaghi vd. (1996) permeabilite katsayısı ile boşluk oranının ters orantısına ve eşit enerji (standart Proktor) ile sıkıştırılmış örselenmiş zeminlerin farklı "k" geçirgenlik katsayısına sahip olabildiğine dikkat çekmiştir. Eşit enerji ile sıkıştırılmış farklı zemin-atık karışımları permeabilite katsayılarının atık cinsine göre değiştiği araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir. Bunlardan Ismaiel (2006) ve Wong'a (2008) göre bunun sebebi özellikle birleşik (bağlı) veya serbest kalsiyum içeren karışımlarda katkı oranı arttıkça boşluk oranı artan zemin yapıları oluşmasıdır. Boşluk hacmi artışını CaO, kil ve atık üçlüsü arasında oluşan katyon değişimi,

bölünme ve flokülasyon reaksiyonları sonucu karbonatlı yapıların oluşması ile açıklamışlardır.

Şekil 6.23'te görüldüğü gibi en fazla boşluk oranı UK katkılı serilerde oluşmuştur. Dolayısıyla karışımların geçirimsizliğini etkileyen nedenin sıkılaşmada kullanılan enerji miktarı değil zemine katılan atık içeriğine bağlı mikro yapı değişikliği olduğu sonucuna varılmıştır (Markou vd., 2002; Khattab vd., 2008).

Nablantoğlu ve Güçbilmez'in (2001) çalışmalarında olduğu gibi karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlıkları azalmış (Şekil 6.21) permeabilite katsayıları (Şekil 6.23) artmıştır. Geçirgenliğin artması ve γ_{kmax} azalması bize karışımda boşluklu yapının oluştuğunu göstermektedir (Terzaghi vd., 1996).

Zemin-UK serilerinde boşluklu yapı, zemin iyileştirmesinde karışımın ilk anında suyla oluşan bölünme, katyon değişimi ve kil parçalarının üzerine iyon toplanması reaksiyonları ile açıklanır (ASTM D 5239). Bu durum Şekil 6.24'te verilen 3. Sınıf sıkıştırılmış zeminlerdeki kil plakların ayrı gruplar halinde kart paketi görünümünde floküle olması ile açıklanır. Bunun yanı sıra permeabilitenin artma nedeni Şekil 6.16a ve b'de de görüldüğü gibi uçucu kül küre yüzeylerinin incelerek delinmesi sonucu zemin-atık matrisinin birbirine açık boşluklardan oluşan poroz bir yapıya dönüşmesidir. T-M ve T-AK serileri çok az miktarda CaO (serbest kireç) içerdiğinden bu karışımlardan özellikle T-AK daha çok fiziksel değişimin etkisinde kaldığı düşünülmektedir. Dolayısıyla K-AK ile T-AK karışımlarda atıklar zemin dane boşluklarını doldurmuş bu nedenle % 10 katkıda geçirgenlik katsayısı azalmış, % 20 AK ilavesinde iki zeminde de permeabilite artmıştır.

M katkısı K zeminin kireç içeriği ile reaksiyona girerek katyon değişimi sayesinde kart evi şekli (Şekil 6.17d) ile beraber boşluk hacminde artmaya sebep olmuş permeabilite artmıştır. T-M serilerinde boşluk hacminin artmaması nedeniyle geçirgenlik katsayısı k' da değişiklik olmamıştır.

Geçirgenlik katsayılarındaki değişimlerin T-AK serisinde büyük oranla fiziksel olarak, K-AK, T-M ve K-M serilerinde hem fiziksel hem kimyasal olarak K-UK ve

T-UK serilerinde ise büyük oranda kimyasal reaksiyonlar neticesi olduğu sonucuna varılmıştır.

6.6. Zemin-Atık Karışımlarının Serbest Basınç (SB) Özellikleri

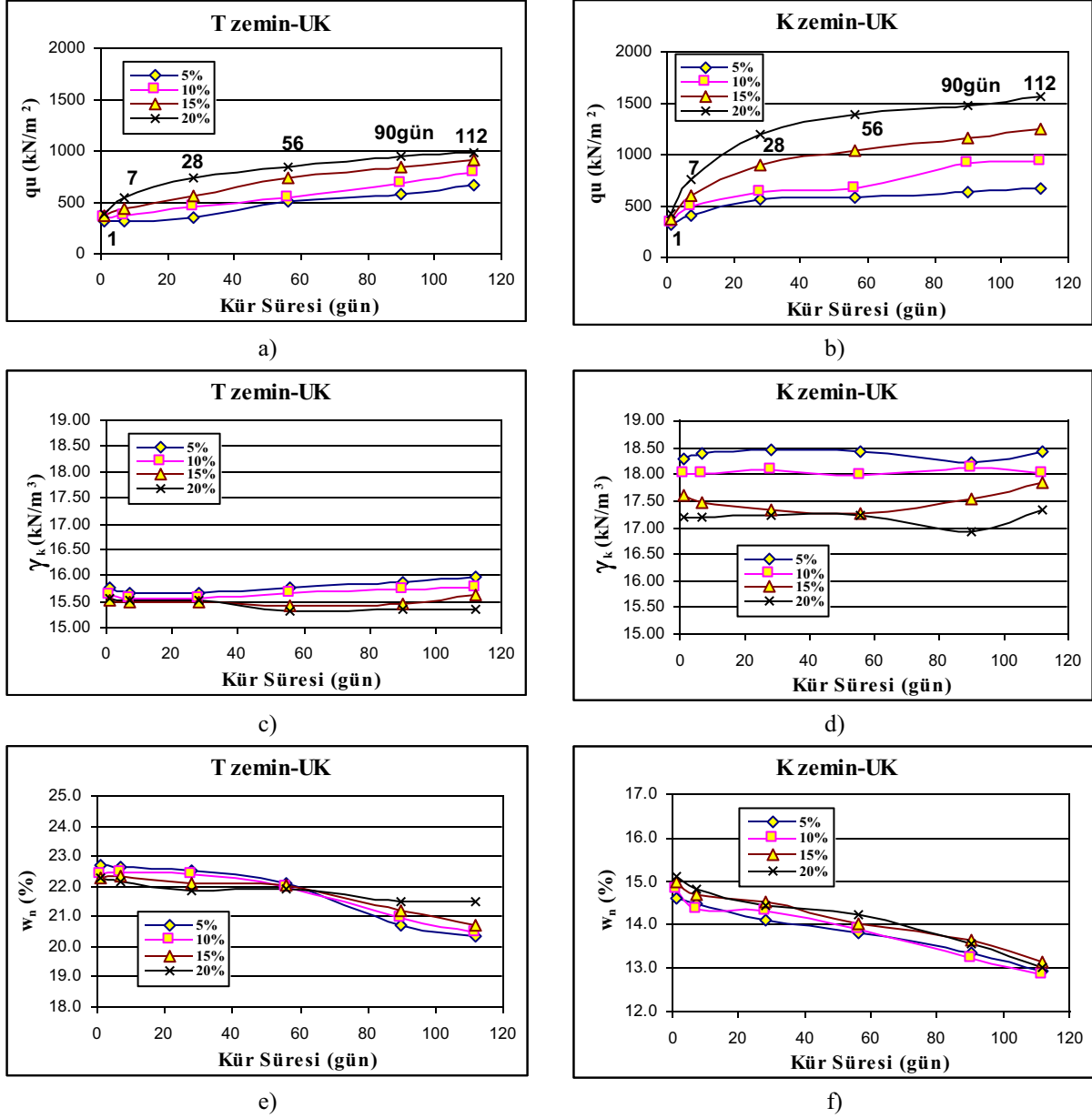
Serbest basınç (SB) dayanım deneyleri için iki zemine % 5, 10, 15 ve 20 atık katılmış 24 değişik karışım hazırlanmıştır. 1, 7, 28, 56, 90 ve 112 gün kür süresi sonunda uygulanan SB deneyleri TS 1900-2 (2006) yöntemine uygun olarak yapılmıştır. Her kür süresi için SB deneyi iki numuneye yapılmış, değerlerin ortalaması sonuç olarak kabul edilmiştir. İlaveten SB dayanımı (q_u) belirlendikten sonra, numunelerin kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) ve deney sonu (nihai) su içerikleri (w_n) bulunmuştur. Zemin-atık karışımının q_u , γ_k , w_n sonuçları ayrı grafiklerde Şekil 6.25, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27’de verilmiştir. Bu bölümde SB deney sonuçları üzerine; (1) Kısa-kür (1-24 saat süre)’de “atık miktarı” etkisi, (2) Uzun-kür (1-112 gün süre)’de “kür süresi” ve “atık miktarı” etkisi tartışılmıştır.

Kısa-kürde (1-24 saat içinde) zemin-UK serilerinde atık miktarı arttıkça karışımların q_u ’ları artmıştır, γ_k azalmış, w_n T-UK’da azalmış K-UK’da artmıştır.

Uzun-kürde atık miktarı ve süre arttıkça q_u artmış, atık miktarı arttıkça w_n T-UK’da azalmış, K-UK’da artmıştır. γ_k atık miktarına göre artmış veya azalmıştır. γ_k ’daki değişim T-UK’da 28 güne kadar çok belirli değilken bu günden sonra atık miktarı % 5-10’da artmış, % 15-20’de azalmıştır. Bunun sebebi UK’nın uzun süre gerektiren puzolanik reaksiyonunun 28 günden sonra daha etkili olmaya başlamasıdır. Kür süresi uzadıkça γ_k aynı kalmış ve w_n farklı değerlerde düşüş göstermiştir. w_n ’deki değişim K-UK karışımların her birinde sabit % 2 düşüş gözlenirken bu düşüş T-UK karışımlarında % 1-2 arasında değişmiştir (Şekil 6.25).

Zemin-UK serilerinde en düşük q_u 1. gün T-5UK ve K-5UK’da 325 kPa hesaplanmıştır. İki zemin-UK serisi arasında katkı miktarı arttıkça en fazla q_u artışı K-UK serisinde olmuştur. En yüksek q_u 112 gün kürde T-20UK 1000 kPa, K-20UK 1600 kPa ile olmuştur. 1. günden 112 gün kür sonuna kadar en yüksek değer veren

T-20UK ve K-20UK dayanım artış oranı sırasıyla % 250 ve % 400'dür (Şekil 6.25a ve b).



Şekil 6.25. Karışımların UK miktarına ve kür süresine karşı a), b) Serbest basınç dayanımı (q_u) (kN/m^2), c), d) Kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) (kN/m^3), e), f) Deney sonu su içeriği (w_n) (%)

Kısa-kürde atık miktarı arttıkça Şekil 6.25c ve d'de görüldüğü gibi T ve K zeminde de γ_k azalmıştır. Bu sonuç önceki çalışmalarla örtüşmektedir (Klopprogge, 1998; Peethamparan 2006; Silitonga, 2009; Harichane, 2011). γ_k azalma nedeni kireç ile kil daneleri arasında katyon değişimi ve ardından flokülasyon olması ile açıklanmaktadır. Ayrıca K zemin serbest kireç içeriğinin T zemine göre fazla oluşu K-UK

karışımlarında UK içeriğinin her artışında γ_k 'nın daha fazla azalmasına neden olmuştur. Bu durum Şekil 6.6 ve Şekil 6.16a ve b'de karışımların mikro resimlerinde görülen boşluklu yapısıyla da örtüşmektedir.

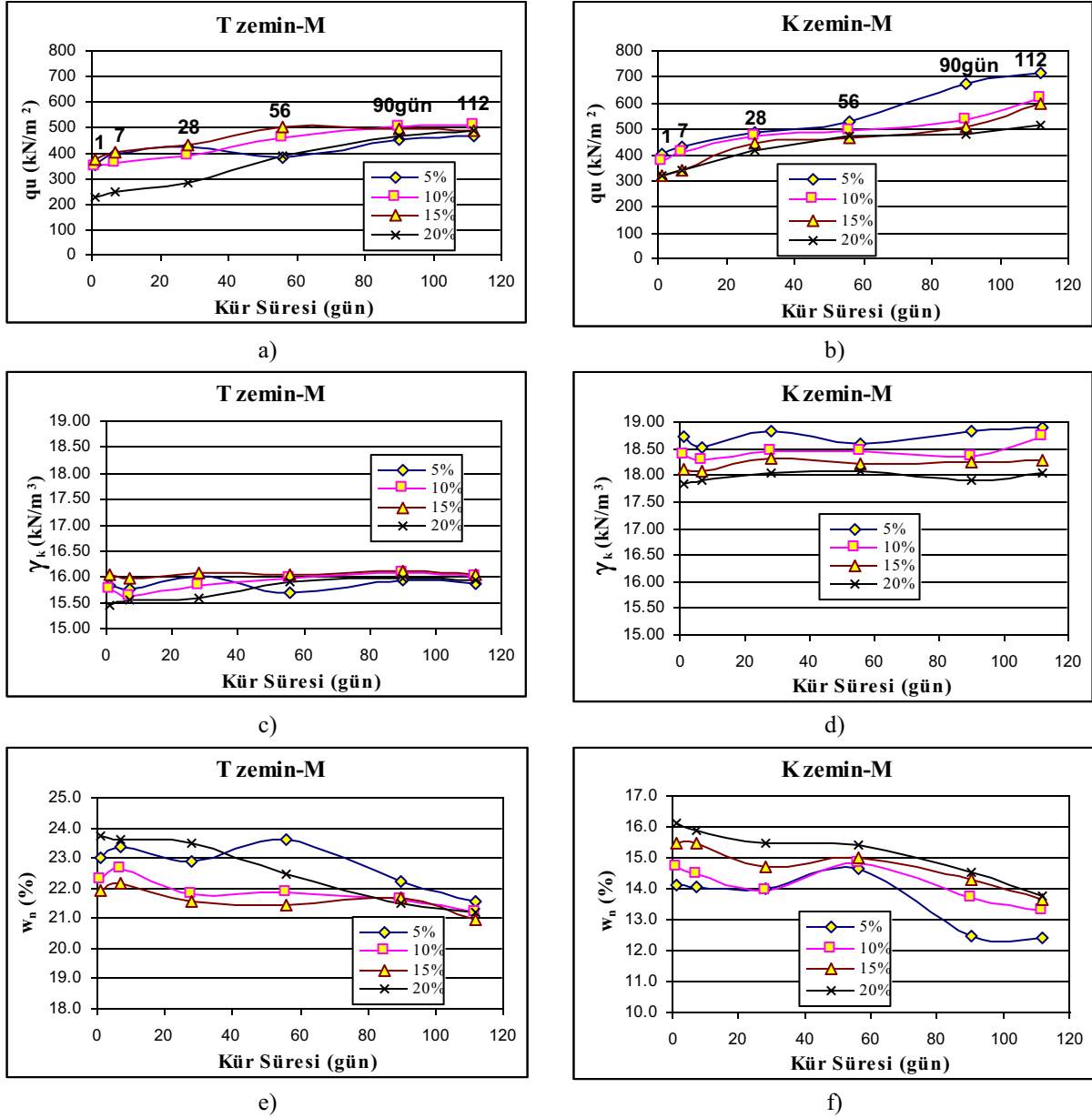
Uzun-kürde w_n değişimi incelendiğinde, T-UK serilerinde 112 gün kür sonunda su içeriği % 1-2 arasında azalmıştır. w_n 'de en fazla düşme T-5UK, en az düşme T-20UK karışımında olmuştur (Şekil 6.25e). Bunun nedeni T zeminde UK katkı miktarı arttıkça puzolanik reaksiyonu sırasında su moleküllerinin bağlanması ile oluşan Tobermorit mineralinin artması olduğu düşünülmektedir. Yine uzun-kürde K-UK karışımların her biri 112 gün kür sonunda w_n 'nin % 2 oranında azalma nedeni de aynıdır (Şekil 6.25f). Burada K-UK serisindeki karışımların hepsinde w_n 'nin % 2 azalma nedeni K zeminin T zemine göre daha fazla CaO içermesidir.

Kısa-kürde zemin-M serilerinde katkı miktarı arttıkça q_u azalmış, γ_k azalmış, w_n T-M'de T-20M hariç azalmış, K-M serisinde artmıştır (Şekil 6.26).

Uzun-kürde zemin-M serilerinde süre ve atık miktarı arttıkça q_u artmış, süre uzadıkça γ_k aynı kalırken, atık miktarı arttıkça γ_k T-M'de pek değişmezken K-M'de azalmış, T-M serilerinde atık oranı arttıkça w_n yüzde olarak daha fazla düşmüş, K-M karışımların her birinde w_n sabit olarak % 1.5-2.5 düşmüştür (Şekil 6.26).

Kısa-kürde atık miktarı arttıkça q_u T-M serisinde T-15M'ye kadar, K-M serisinde K-10M'ye kadar artmış, γ_k bütün karışımlarda azalmış, w_n T-M serilerinde T-20M hariç azalmış ve K-M serilerinde artma göstermiştir. Benzer çalışmalarda kuru birim ağırlığı azalmıştır (Okagbue ve Onyeobi, 1999; Khan, 2006) Bunun nedeni kolloid (0.001mm'den küçük parçalar) halindeki, katyon açısından en aktif haldeki zemin kil daneleri ve kolloid mermer tozu daneleri ile birlikte daha iri olan zemin daneleri üzerine yapışarak kil mermer karışımı bir kolloid tabakası oluşturmuştur. Bu kolloid tabakasını ve diğer karbonat kümelerini oluşturan katyon değişim reaksiyonu, $\text{Ca}(\text{HO})_2$ molekülü Ca^{2+} ve OH^- iyonlarına ayrıldığından daha fazla kalsiyuma (Ca) ve suya ihtiyaç duyar. Dolayısıyla zemin-M serilerinin kil danelerinin üzerinde ve aralarında karbonat topakları oluşur (Şekil 6.8). Sonuçta zemin-M serisi

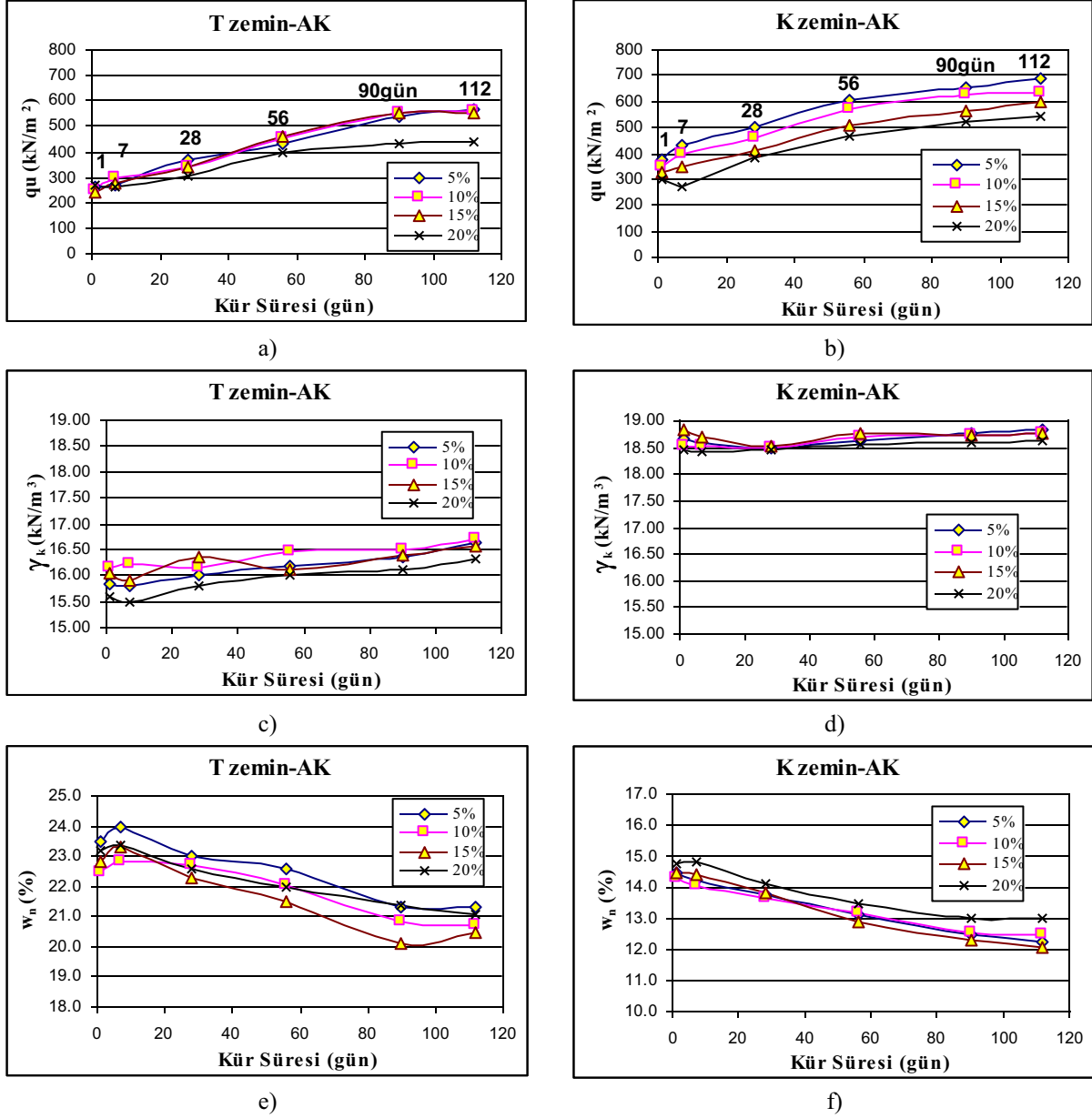
karışımlarının hepsinde γ_k azalma, w_n T-M serisinde azalma, Ca içeriği fazla olan K-M serilerinde katyon değişimi nedeniyle w_n 'de artma görülmüştür.



Şekil 6.26. Karışımların M miktarına ve kür süresine karşı a), b) Serbest basınç dayanımı (q_u) (kN/m^2), c), d) Kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) (kN/m^3), e), f) Deney sonu su içeriği (w_n) (%)

Uzun-kürde zemin-M serisinde kür süresi arttıkça dayanımlar artmıştır, γ_k değişmemiş, w_n genelde azalmıştır. q_u artışı ve w_n azalışın sebebi katyon değişimi sonrası devam eden reaksiyonlar sonucu flokülasyondur. Bu durum hızlı reaksiyonlarla (kısa-kürde) dane yüzeylerinde oluşan, 112 gün kür sonunda Şekil

6.3b, e ve Şekil 6.17c ve d'de görülen mikro resimlerde kil ve mermer yüzeylerde hafif karbonatlaşma ile de örtüşmektedir.



Şekil 6.27. Karışımların AK miktarına ve kür süresine karşı a), b) Serbest basınç dayanımı (q_u) (kN/m^2), c), d) Kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) (kN/m^3), e), f) Deney sonu su içeriği (w_n) (%)

Kısa-kürde zemin-M serilerinde 1. gün en düşük q_u değeri T-20M ve K-20M'da sırasıyla 230 ve 320 kPa hesaplanmıştır. Uzun-kürde katkı miktarı arttıkça dayanımlar zemin-M serilerinde çok fazla artmamıştır. 1. günden 112 gün kür sonuna kadar bu serilerde en yüksek dayanım 504 kPa ve 718 kPa ile T-10M ve K-5M vermiştir. Dayanım artış oranı sırasıyla % 45 ve % 75'tir (Şekil 6.26a ve b).

Kısa-kürde T-M serilerinde katkı miktarı artarken, γ_k azalmış, en yüksek dayanımlar % 10-15 katkı miktarında elde edilmiştir, K-M serilerinde katkı miktarı artarken, γ_k azalmış, en yüksek dayanımlar % 5 katkı miktarında elde edilmiştir (Şekil 6.26c ve d). Uzun-kürde zemin-M karışımlarında kür süresi arttıkça γ_k , T serilerinde 56. gün küre kadar artmış bu günden sonra değişmemiş, K serilerinde azalmış, önemli değişim göstermemiştir (Şekil 6.26c ve d). Uzun-kürde w_n incelendiğinde, zemin-M serilerinde % 1.5-3 azalma görülmüştür (Şekil 6.26e ve f). Zemin-M serilerinde de karışımlardaki su içeriği azalmasının dayanımı arttıran etmenlerden biri olduğu düşünülmektedir.

Kısa-kürde zemin-AK serisinde katkı miktarı arttıkça q_u ve γ_k 'da önemli değişiklik olmamış, w_n T-AK serisinde T-20AK hariç azalmış ve K-AK serisinde artma göstermiştir

Uzun-kürde zemin-AK serilerinde kür süresi arttıkça dayanımlar artmış, γ_k T serilerinde az miktarda (en fazla 1 kN/m³) artmış, K'da değişmemiş, w_n tüm katkılar için her iki zemin türünde de % 2 azalma göstermiştir.

Kısa-kürde zemin-AK serilerinde en düşük q_u T-15AK ve K-20AK'da sırasıyla 240-300 kPa hesaplanmıştır. Uzun-kürde en yüksek dayanımlar 112. günde T-5AK'da 570 kPa, K-5AK'da 690 kPa'ya ulaşmış, dayanım artış oranı T ve K zemin karışımlarında sırasıyla % 200 ve % 180 olmuştur (Şekil 6.27a ve b).

Zemin-AK karışımları katkı miktarı arttıkça γ_k iki zeminde de düzenli bir değişim göstermemiş, kür süresi arttıkça da farklılık oluşmamıştır. En yüksek γ_k 16.63 kN/m³ ile T-5AK ve 18.83 kN/m³ ile K-5AK'da elde edilmiştir. Bu iki değerde katkısız (100 %) K ve T zemin kuru birim hacim ağırlığından yüksektir.

Sonuç olarak zemin-atık karışımlarında en yüksek q_u 'lar çoktan aza doğru UK, M ve AK atıklarında ve sırasıyla % 20, % 5-10 ve % 5-10 katkı miktarlı karışımlarında elde edilmiştir. Zemin-M ve zemin-AK serilerinde % 5-10'dan fazla katkı kullanıldığında q_u düşük çıkmıştır. Bunun nedeni toz atıkların yol malzemesine büyük miktarda katılması durumunda malzemenin özgül yüzeyinin ve dolayısıyla

sıkıştırma suyu ihtiyacını arttırması ve yük altında danelerin birbiri üzerinden kaymasını kolaylaştırmasıdır (Saghafi, 2008). Uzun-kür süresince w_n düzenli olarak azalmış, tüm serilerin w_n 112. güne kadar yaklaşık % 2 azalmıştır. Karışımlarda özellikle M ve AK katkılı serilerde bir diğer dayanım artış sebebinin w_n 'deki bu azalma olduğu düşünülmektedir. KTS'de dolguda kullanılacak katkı ile iyileştirilmiş zeminlerin 7 günlük q_u dayanımının 5 kPa'dan büyük olması istenmektedir. Bu çalışmada buna uygun karışımlar T-20UK, K-10UK, K-15UK ve K-20UK'dır. Bunların yanında kür süresi 56 gün olan diğer tüm % 15 katkılı karışımların q_u değeri 5 kPa'dan büyük çıkmıştır. Bu durumda M ve AK serileri ile dolgu yapıldıktan sonra üzerinden esas trafik yükü geçişine kadar, diğer yol katmanlarının yapımında kullanılacak, yaklaşık 2 aylık bir süre beklemek gerektiği anlamına gelmektedir. Bu bekleme süresinin uygulanması her zaman mümkün olmamakla beraber imkânsız da değildir.

6.7. Zemin-Atık Karışımlarının Taşıma Gücü (CBR) Özellikleri

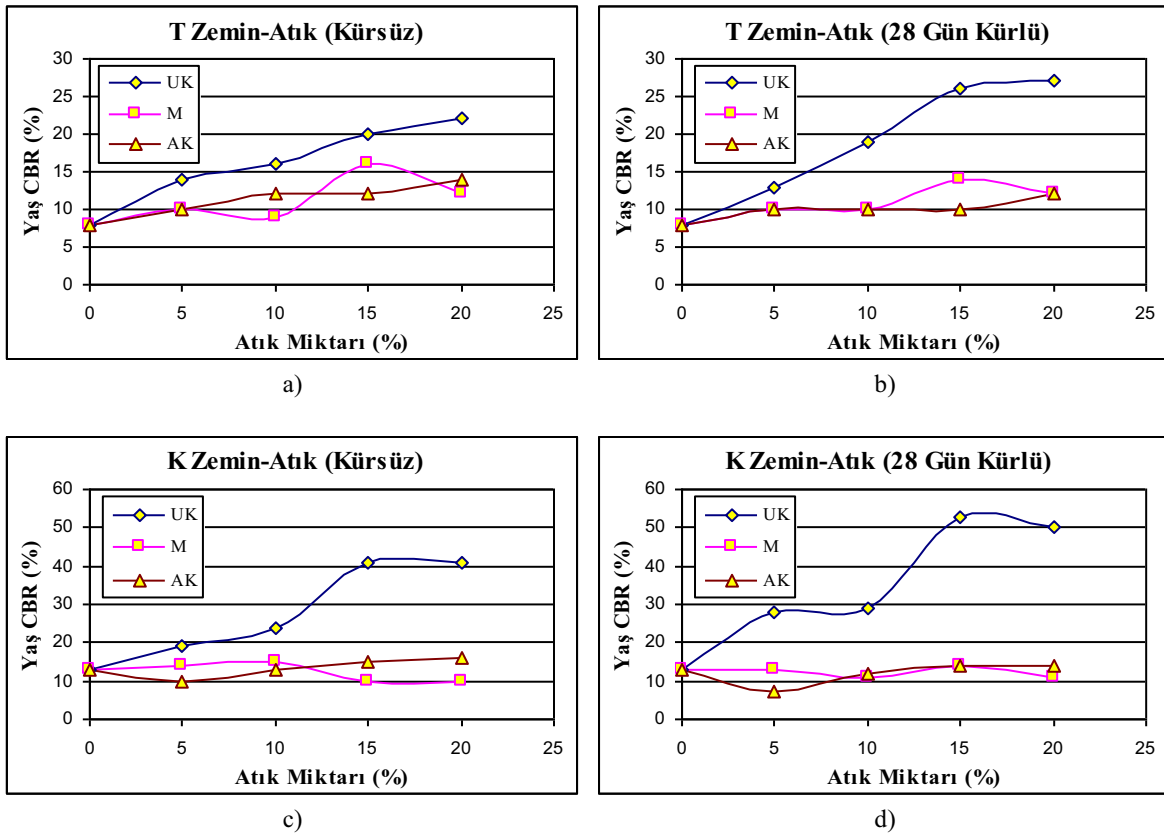
Yol dolgusunda kullanılmak için farklı miktarlarda atıkla iyileştirilen zeminlerin taşıma gücünü tespit etmek için Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada yol tabanında kullanılacak iyileştirilen zemin en kötü şartlar altındaki taşıma gücünü görmek için KTS'de istendiği gibi zemin-atık karışımlarına ıslak (yaş) CBR deneyi uygulanmıştır.

% 5, 10, 15, 20 atık miktarlı karışımlar kompaktör (sıkıştırıcı) ile standart Proktor enerjisinde sıkıştırılmıştır. CBR kalıbı içindeki numuneler kürsüz ve 28 gün kür sonrasında TS 1900-2'ye (2006) uygun olarak 4 gün su havuzunda bekletilmiş, her gün şişmeleri ölçülmüş ardından CBR deneyine tabi tutulmuştur. Deney numunelere CBR kalıbının iki yüzeyinden de uygulanmış elde edilen iki değerden düşük olanı ile CBR grafiği çizilmiştir. CBR ve şişme yüzdesi grafikleri sırasıyla Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da sunulmuştur.

Malzeme tanımlama deneylerinde bulunan katkısız T ve K zeminlerin yaş CBR'ları sırasıyla % 8 ve % 13'tür. Kürsüz karışımların grafiğe alınan en yüksek CBR'ları T-20UK % 22 ve K-15UK % 41, T-15M % 16 ve K-10M % 15, T-20AK % 14 ve K-

20AK % 16'dır (Şekil 6.28a, c). 28 gün kürlü karışımların grafiğe alınan en yüksek CBR'ları T-20UK % 27 ve K-15UK % 53, T-15M % 14 ve K-15M % 14, T-20AK % 12 ve K-20AK % 14'tür (Şekil 6.28b, d).

Katkısız iki zemin CBR'ı ile iki kür durumundaki katkıli karışımların grafiğe alınan en yüksek CBR'ları karşılaştırıldığında, zeminlerin CBR'larında UK katkısı en az % 250, M ve AK katkısı T zemine sırasıyla % 75 ve % 25, M ve AK katkısı K zemine % 1 iyileşme sağlamıştır.



Şekil 6.28. Kürsüz ve 28 Gün Kürlü Yaş CBR'lar, a), b) T Zemin-Atık, c), d) K Zemin-Atık Serileri

Şekil 6.28'de verilen numunelerin kürlü ve kürsüz CBR değerleri birbiri ile karşılaştırıldığında uygulanan 28 gün kürün CBR değerini zemin-UK serilerinde % 2-25 arttırırken, T-M ve T-AK serilerinde % 2 azaltmış, K-M serisinde % 1 arttırmış, K-AK serisinde % 1 azaltmıştır.

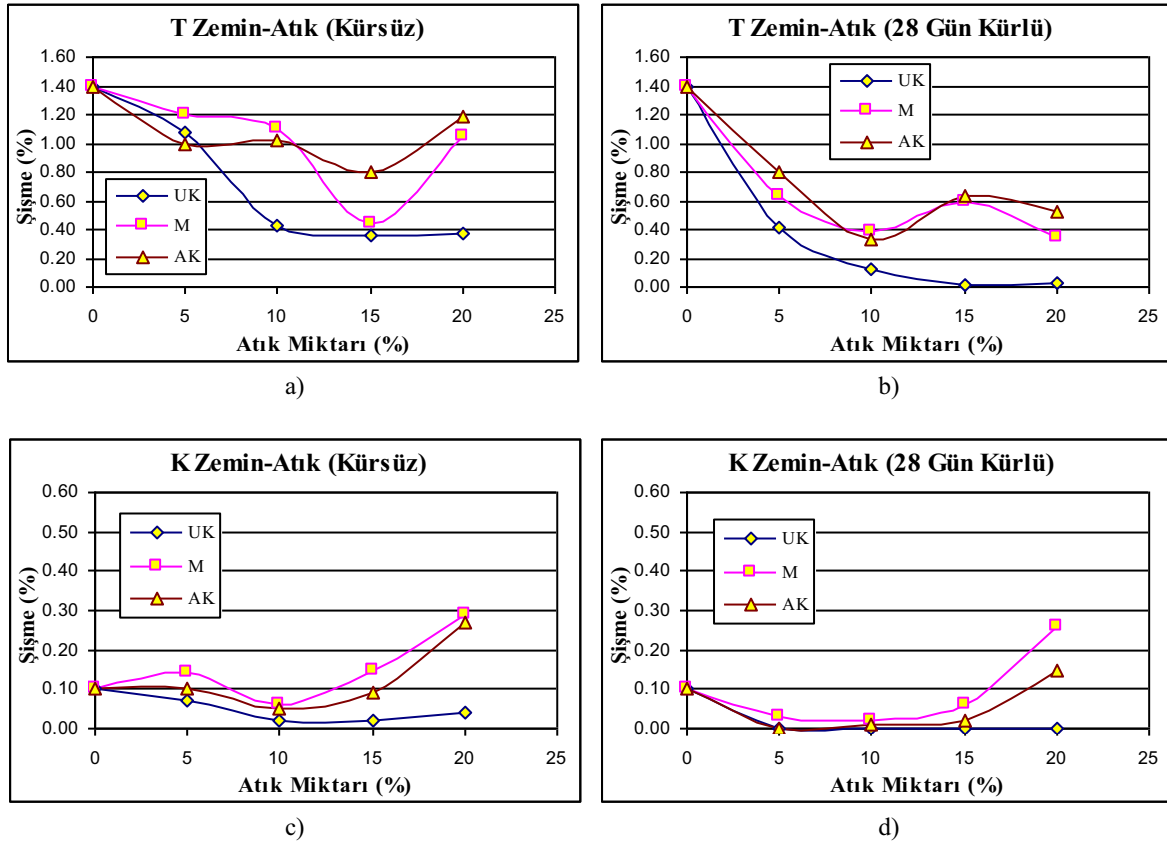
Thom vd. (1987) yüksek miktarda atık toz ilavesinin yol malzemelerinin mekanik özellikleri kötüleştirdiği gibi yüksek miktarda kalker tozu ilavesinin de yol dolgu tabakasında dayanım azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Saghafi (2008) bu

atıklarla serbest basınç dayanımı ve taşıma gücü gibi mekanik özelliklerini düşürmesi nedenini bu ilavelerle karışım özgül yüzeyinin ve dolayısıyla sıkıştırma suyu ihtiyacını arttırması ile açıklamıştır. Çalışmamızdaki AK ve M katkılı zemin-atık karışımların iki kür durumunda da CBR % 10-15 atık miktarında kendi serileri içinde yüksek değer almıştır. % 10-15'ten fazla atık miktarlarında CBR'ın düşmesi özgül yüzeyi dolayısıyla numuneyi sıkıştırmak için su ihtiyacı artması ile açıklanır.

Ayrıca atık katılarak zemini iyileştirmede amaç dayanımda artış olmasıdır. Fakat kür süresince birbiri ile reaksiyona giren zemin ve katkının özelliğine bağlı olarak karışımın dayanımında artma olabileceği gibi azalma da görülebilir (Fırat ve Cömert, 2011). AK atığı yüksek (% 89) oranda SiO_2 içermektedir. AK katkılı karışımlarında CBR sonuçlarda düşme görülmüştür. Özellikle numunelerin su içinde 4 gün beklemeleri sırasında ayrışma ve katyon değişimi reaksiyonları ile atık ve zemin daneleri arasındaki boşluklarda kil daneleri yüzeyinden ayrılır. Bu serbest kalan katyonlar suyla boşluklarda oluşturduğu süspansiyon içinde serbestçe hareket edip kuvars (SiO_2) mineralleri üzerinde bir kadife örtü şeklinde dizilmeyi tercih etmektedir (Şekil 6.3c ve f). Bu arada bu katyonlardan arınan kil mineral ve plakları Şekil 6.17e ve f'deki ve Şekil 6.20a ve b'deki gibi kil plaklarının ve dizilimlerinin çok net görüldüğü SEM mikro resimlerdeki görüntülerin oluşmasını sağlar. Ayrıca Şekil 6.1c ve f'deki XRD difraktogramlarında bulunan kuvars (Ku) ve kalker (Ka) piklerinin uzaması bu açıklama ile örtüşmektedir.

Kısaca zeminler atıklarla karıştırılıp kür ile iyileştirildiğinde CBR değerlerinde, UK katkısı ile en az % 250 artma, M ve AK ile T zemin % 50, K zemini % 1 artma tespit edilmiştir.

Katkısız T ve K zeminin şişme yüzdesi sırasıyla % 1.4 ve % 0.1 bulunmuştur. 96 saat (4 gün) içinde ölçülen şişmelerden hesaplanan şişme yüzdeleri 28 gün kürlü numunelerde daha az olduğu, kendi zemin-atık serileri içinde % 15 katkılı karışımlarda en düşük veya oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.29). Zemin-% 15 atık serilerinde En yüksek şişme yüzdesi T ve K zeminlerinde sırasıyla, UK katkısında % 0.4, 0.0, M katkısında % 0.6, 0.15, AK katkısında % 0.9, 0.1 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.29. Farklı Kür Uygulamalarında CBR Şişme Yüzdeleri, a), b) T Zemin-Atık, c), d) K Zemin-Atık Serileri

KTŞ (2006) dolgu malzeme için verilen sınır değerler, şişme için en fazla % 3, yaş CBR için en az % 10'dur. Şişme yüzdeleri ve yaş CBR neticeleri birlikte değerlendirildiğinde UK, M, AK atıkları yol alt yapı dolgusu içinde % 15 oranında kullanılabilceği görülmektedir. % 15'ten fazla atık kullanımının bu zemin-atık karışımların bazısında daha yüksek CBR dayanımı verdiği görülmüş fakat şişme yüzdesini ve geçirimsizliği arttırdığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu üç atık ile yapılacak iyileştirmelerde geçirimsizlik, şişme yüzdesi ve taşıma gücü açısından optimum zemin/atık oranının 85/15 olduğu görülmüştür.

6.8. Zemin-Atık Karışımlarının Esneklik Modülü (M_R)

Esneklik modülü, elastik teoreminin uygulaması olup, üst yapı malzemelerinin statik yükten ziyade tekrar eden trafik yükleri altındaki elastisite modülünün tespiti için geliştirilmiş bir yaklaşımdır. Üst yapı malzemeleri normal olarak elastik değildir ve her yük tekrarından sonra bir miktar plastik (kalıcı) deformasyon gösterirler. Bununla

beraber, eğer trafik yükü malzemenin mukavemetine nazaran küçük ise, belirli miktarda yük tekrarından sonra malzeme elastik davranış göstermeye başlar.

M_R deneyinde tekrarlı yüklemeler ile yapılan şartlandırmadan sonra seri yüklemeler gerçekleştirilir ve çıkan neticelerden çizilen eğriden elde edilen model o malzemenin formülü haline getirilir. Uygulamada sık kullanılan Pezo (1993) ve Uzan (1985) modelleri 6.1, 6.2 eşitliklerinde verilmiştir (Özay ve Güngör, 2008; Kim, ve Tutumluer, 2008).

$$M_R = k_1 Pa (B/Pa)^{k_2} (S_d/Pa)^{k_3} \quad (\text{Uzan, 1985}) \quad (6.1)$$

$$M_R = k_1 S_d^{k_2} S_3^{k_3} \quad (\text{Pezo, 1993}) \quad (6.2)$$

Burada:

S_d : Deviatör gerilme,

S_3 : Yatay gerilme,

Pa : Atmosfer basıncı (100 kPa),

B : Toplam (bulk) gerilme, ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (Tutumluer, 2008),

k_1, k_2, k_3 : Katsayılar.

Katkısız zeminler ve katkılı karışımlar w_{opt} ile karıştırılıp 2 saat bekletildikten sonra deney kalıplarında beş kademe ve standart Proktor enerjisinde otomatik sıkıştırma cihazı ile sıkıştırılmıştır (Trzebiatowski vd., 2004; Edil vd., 2006). % 15 katkılı zemin-atık karışımlarının deney sonucu oluşan M_R tablolarından Pezo (1993) ve Uzan (1985) yöntemine göre elde edilen modelleri toplu olarak Tablo 6.1'de verilmiştir.

Katkı türü ve farklı yüzdelerde katkıların esneklik modülü özellikleri üzerine etkisini gözlemlemenin birkaç yolu vardır. Karışımlardan deney sonucu elde edilen M_R değerlerinden tablolar oluşturulur. Bu listelerin ortalamaları karşılaştırılır veya karayolunda dolgunun bulunma derinliğine, kalınlığına ve yolun proje yüküne bağlı olarak deviatör gerilme ve yanal yük hesaplanır. Bunlar Tablo 6.1'de verildiği gibi modellerinde yerine konarak hesaplanan değerler karşılaştırılabilir. Bunun diğer bir yolu da belirli bir gerilme değerini esas alıp ortalama değerleri karşılaştırmaktır (Trzebiatowski vd., 2004; Edil vd., 2006; Solanki, 2010).

Tablo 6.1. Katkısız zeminlerin ve %15 katkılı karışımların deneyle belirlenen M_R modelleri

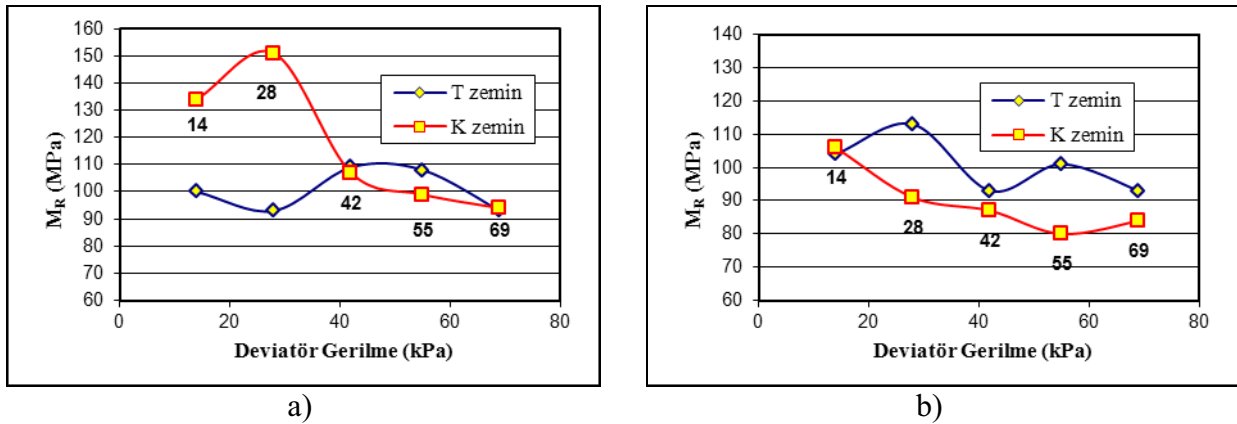
MALZEMELER		M_R (Pezo, 1993)	M_R (Uzan, 1985)
		$M_R = k_1 S_d^{k_2} S_3^{k_3}$	$M_R = k_1 Pa(B/Pa)^{k_2} (S_d/Pa)^{k_3}$
T zemin	% 100 T	$M_R = 46443 S_d^{-0.0188} S_3^{0.197}$	$M_R = 820.03 Pa(B/Pa)^{0.307} S_d/Pa^{-0.0728}$
	15UK	$M_R = 45040 S_d^{-0.0174} S_3^{0.16}$	$M_R = 622.56 Pa(B/Pa)^{0.223} S_d/Pa^{-0.0826}$
	15M	$M_R = 53665 S_d^{-0.0371} S_3^{0.18}$	$M_R = 704.32 Pa(B/Pa)^{0.278} S_d/Pa^{-0.119}$
	15AK	$M_R = 26151 S_d^{0.0357} S_3^{0.267}$	$M_R = 603.57 Pa(B/Pa)^{0.393} S_d/Pa^{-0.0801}$
K zemin	% 100 K	$M_R = 79924 S_d^{-0.268} S_3^{0.342}$	$M_R = 549.91 Pa(B/Pa)^{0.492} S_d/Pa^{-0.414}$
	15UK	$M_R = 65348 S_d^{-0.243} S_3^{0.413}$	$M_R = 594.2 Pa(B/Pa)^{0.647} S_d/Pa^{-0.432}$
	15M	$M_R = 49124 S_d^{-0.269} S_3^{0.438}$	$M_R = 424.25 Pa(B/Pa)^{0.665} S_d/Pa^{-0.469}$
	15AK	$M_R = 41252 S_d^{-0.239} S_3^{0.46}$	$M_R = 437.72 Pa(B/Pa)^{0.681} S_d/Pa^{-0.44}$
Not: UK: Uçucu Kül, M: Mermer Tozu, AK: Atık Kum, k_1, k_2, k_3 : Katsayı S_d : Deviatör Gerilme, S_3 : Yatay Gerilme, Pa: Atmosfer Basıncı, B: Toplam (bulk)gerilme ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)			

Örnek, M_R deneyi için dünyada standart haline gelen Amerikan FHWA (Federal Karayolları İdaresi)'nin Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) kapsamında geliştirilen LTPP (The Long Term Pavement Performance) protokolü P-46'dır. Bu dolguda kullanılacak zeminleri için deviatör gerilme (S_d) olarak 28 kPa ve düşey gerilme (S_3) olarak 41 kPa değerini karşılaştırma değeri olarak tavsiye etmektedir (Pezo ve Hudson, 1994; Solanki, 2010). Bununla beraber birçok çalışmada coğrafi, iklimsel ve yol alt tabanı ve kullanılacak malzeme özelliklerine göre LTPP P-46 protokolü değerlerinden farklı ancak yakın değerler göz önüne alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır (Pezo ve Hudson, 1994; Trzebiatowski vd., 2004; Edil vd., 2006; Solanki, 2010).

Trzebiatowski vd., (2004) dolguda kullanılacak uçucu kütle iyileştirdikleri zeminlere uyguladıkları M_R deneyinde deviatör gerilmeyi 21 kPa ve yanal gerilmeyi ise 13.8 kPa olarak almışlardır. Araziden alınan numuneleri ıslak karışım halinde 2 saat içinde küp beton numune kalıplarında sıkıştırmışlar, 7 gün beton kalıplarında kürlendikten sonra ince cidarlı karot ile numuneler alarak deneye tabi tutulmuşlardır. Edil vd., (2006) göre tipik dolgu malzemesinin karşılaştığı deviatör gerilmenin 21 kPa olduğunu belirtmektedir. Bununla beraber yazarların hemfikir olup tavsiye ettikleri dolgularda kullanılacak atıklarla iyileştirilmiş zeminler için kesinleşmiş bir karşılaştırma değeri yoktur (Solanki, 2010).

M_R deneyinde numuneye Kenlayer gibi bilgisayar programlarıyla hesaplanıp arazide yol katmanı içindeki yerine uygun deviatör gerilme ve düşey basınç ile yüklerin tatbik edilmesi çok önemlidir. Bununla beraber katman kalınlıklarının değişmesi ve arazi şartlarının değişkenliği nedeniyle hesaplanan gerilmeler ile arazide malzemeye gelen yükler birbirinden farklı olabilir. Bu sebeplerden dolayı LTPP P-46 protokolü M_R değerleri tespit edilirken mümkün olduğu kadar arazi durumunu temsil eden gerilmeler ile deneyin yapılmasını önermektedir (Solanki, 2010).

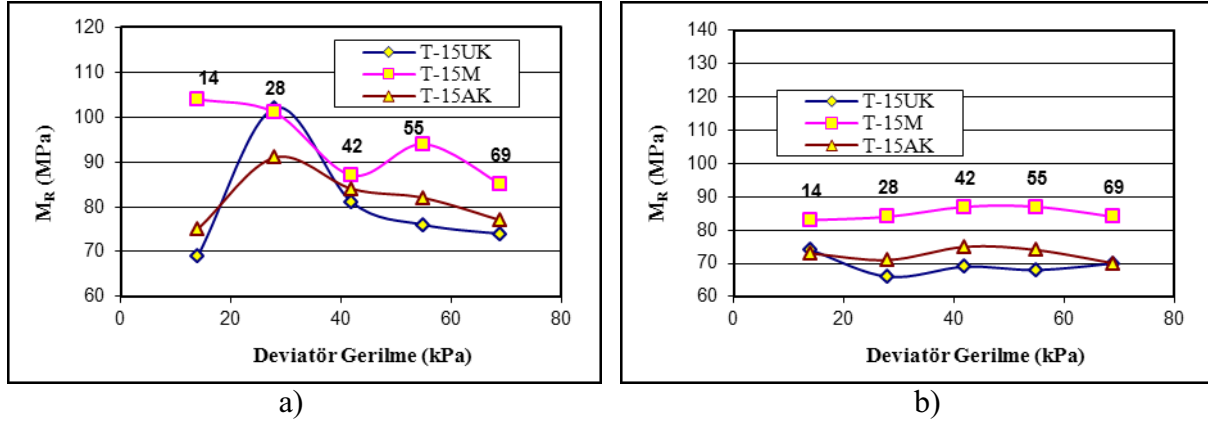
Tablo 6.1’de verilen % 15 katkılı modellerden ve beş farklı (14, 28, 42, 55 ve 69 kPa) deviatör gerilme ile elde edilen M_R değerleri hesaplandığında katkisız zeminlerin Şekil 6.30 ve % 15 atıkla iyileştirilmiş zeminlerin, Şekil 6.31 ve Şekil 6.32’deki grafikleri ortaya çıkmaktadır. Şekillerin a) şıklarında LTPP P-46 protokolü P 46’ya uygun olarak 41 kPa düşey gerilme ve b) şıklarında 28 kPa düşey gerilme ile hesaplanmış esneklik modüllerinin grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.30. T ve K zeminlerin M_R a) Düşey gerilme 42 kPa b) Düşey gerilme 28 kPa eğrileri

K zemini ile T zemini LTPP P-46 protokolü 28 kPa deviatör gerilmesine göre karşılaştırıldıklarında Şekil 6.30a’da K zemini T zeminine göre daha yüksek esneklik modülü verirken Şekil 6.30b’de T zemini daha yüksek esneklik zemin modülü vermiştir. Bunun nedeni düşey gerilme büyük ve deviatör gerilme azken yanıl ve düşey gerilmelerin birbirine yakın değer almasıdır. Ancak malzeme dayanımı, düşey gerilmelerde azalma (deviatör gerilmelerde artış) başladığında ve aynı anda tekrarlı yükler de ortaya çıkınca K zemininin kireç içeriği nedeniyle daneler birbiri üzerinden kaymaya başlamıştır. Dolayısıyla harekete karşı koyamaması sonucu dinamik bir dayanım gösteremediğinden esneklik modülünde azalma görülmüştür. Bu M_R eğrileri

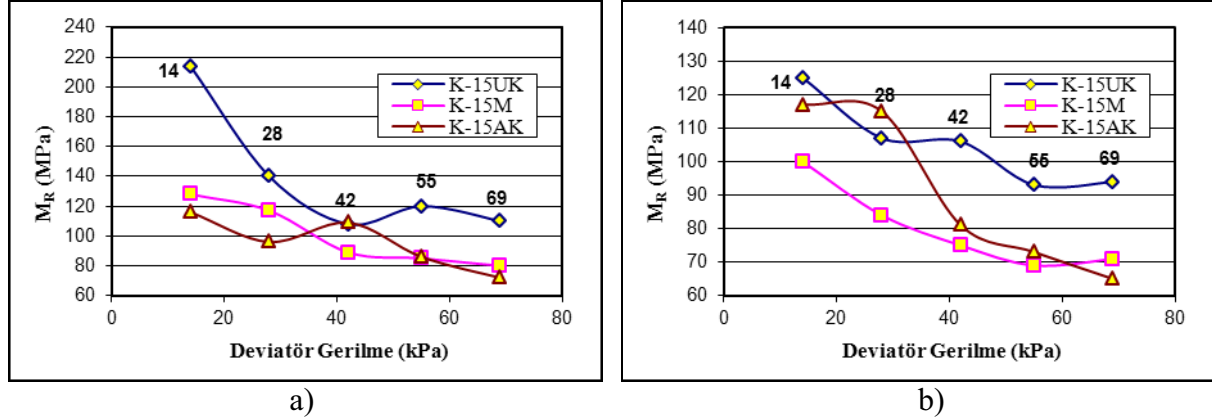
plastisitesi orta ve az olan zeminlerin tipik eğrileridir (Pezo ve Hudson, 1994; Trzebiatowski vd., 2004; Edil vd., 2006).



Şekil 6.31. T zemin-atık karışımı M_R a) Düşey gerilme 42 kPa b) Düşey gerilme 28 kPa eğrileri

% 15 atık katkılı T zemin karışımları 42 kPa düşey gerilme ve 28 kPa deviatör gerilmeye göre karşılaştırıldıklarında Şekil 6.31a'da sadece bu basınçta T15UK karışımı diğer katkılara göre daha yüksek esneklik modülü vermiştir. Şekil 6.31b'de T15M karışımı daha yüksek esneklik modülü vermiştir. 42 kPa ve 28 kPa Şekil 6.31a ve b'ye genel olarak bakıldığında en yüksek mermer tozu katkılı karışımları, en düşük ise uçucu kül katkılı karışımlar esneklik modülü değerlerini vermişlerdir. Bunun sebebi öncelikle mermer tozunun az olmakla beraber CaO içeriği ile hızlı gelişen bölünme ve karbonatlaşma reaksiyonları olduğu düşünülmektedir. Esneklik modülü değerleri ikinci sırada gelen atık kum katkısının dane şekli nedeniyle ve üzerine serbest kireç parçalarını katyon değişimi ile çektiği bilinmektedir, buda onun iki saat bekleme süresi sonunda M'den daha az ama uçucu külden daha yüksek M_R değerleri vermesini sağlamıştır. T zeminle en küçük M_R değerleri veren UK katkılı karışımlarda reaksiyonlar için yeterli CaO olmayışı ve karıştırıldıktan iki saat içinde numunelerin deneye tabi tutulması nedeniyle uçucu kül daneleri zeminle hızlı reaksiyonlar oluşmamıştır. UK ile benzer çalışmalar yapan araştırmacılar w_{opt} ve $w_{opt} + \% 5-7$ ile hazırladıkları numuneleri 7 ve 28 gün külden sonra M_R deneyine tabi tutmuşlar, bu kür süresi sonunda % 18 UK katkılı karışımların M_R değerlerinin % 10 UK katkılı ince daneli zeminlerden daha büyük çıktığını tespit etmişlerdir. Ancak % 100 (katkısız) zemin M_R değerlerinden % 18 UK katkılı zeminlerin değerleri yaklaşık 10-15 MPa düşük % 10 UK katkılı zeminlerin değerleri yaklaşık 20-25 MPa düşük çıkmıştır (Trzebiatowski vd., 2004; Edil vd., 2006). Bu çalışmada % 15 katkılı

karışımlarda benzer düşüşler gözlenmiş ayrıca 28 kPa düşey gerilmelerde bütün deviatör gerilmelerde T zemin-atık karışımları yatay grafikler oluşturan M_R değerleri vermiştir. UK katkılı karışımlar daneleri birbirine bağlamak için gerekli reaksiyon ortamı ve süresini bulamamışlardır.



Şekil 6.32. K zemin-atık karışımı M_R a) Düşey gerilme 42 kPa b) Düşey gerilme 28 kPa eğrileri

% 15 atık katkılı K zemin karışımları 42 kPa düşey gerilme ve 28 kPa deviatör gerilmeye göre karşılaştırıldıklarında Şekil 6.32a ve b'de K15UK karışımı bir nokta hariç bütün deviatör gerilmelerinde diğer katkılara göre en yüksek esneklik modülü değerlerini vermiştir. Bunun nedeni CBR ve SB deney sonuçlarında da açıkça görüldüğü gibi K zeminin içerdiği yüksek kirecin hızlı reaksiyonların yanı sıra UK ile yapmış olduğu puzolanik reaksiyonlardır. Benzer sonuç ve açıklamalar yüksek sönmüş kireç içeriği ve uçucu kül ile yapılmış diğer M_R deneyleri içeren çalışmalarda da belirtilmiştir (Trzebiatowski vd., 2004; Edil vd., 2006; Saghafi vd., 2008; Saghafi vd., 2010). 42 kPa ve 28 kPa Şekil 6.31a ve b'ye genel olarak bakıldığında ikinci en yüksek değerleri mermer tozu ve atık kum katkılı karışımlar paylaşmıştır.

Kalker tozu ile yapılmış benzer çalışmalarda kür süresinin çok uzun tutulmasında (7 ay) M_R değerlerinin serbest kireç içeren kalker tozu nedeniyle % 420 arttığı belirtilmiştir (Saghafi vd., 2009; Saghafi vd., 2010). % 2.5-15 oranında kireçle yapılan plastisitesi yüksek zemin iyileştirmelerinde farklı süreler kürlenmiş karışımlarda esneklik modülü değerlerinin % 800 ila % 1500 oranında yükseldiği bildirilmiştir (Peethamparan, 2006). Bu çalışmada atıkla karıştırıldıktan 2 saat içinde M_R deneyleri yapılmasına rağmen özellikle 42 kPa düşey gerilmelerde farklı

katkılarda M_R değerleri yaklaşık % 20-200 oranında artışlar göstermiştir. Kür süresinin artırılması durumunda M_R değerlerinde artışların daha belirgin olacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM 7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Modern toplum kurumları, üretimi aşamasında kimyasal işlem görmeden ve ufalanması dışında hiçbir fiziksel uygulamaya tabi tutulmayan ancak hacim olarak çok yer işgal eden endüstriyel atıkları ortadan kaldırmakta büyük sorun yaşamaktadır. Bu kısmen zararlı atıkların en bilindik zararları yararlı hacim ve alan tüketmeleridir. Bu atıkların, miktarları ve kapladıkları yer daha az olan endüstriyel ve şehirselle atıklara karıştırılmadan depolanması veya değerlendirilmesi atık sorununu baştan azaltacaktır. Bu atıklar, ufalanmış kömürün yakılması, doğal taşların kesilmesi veya kırılması sırasında ufalanmış toz kısmı su ile toplanarak süspansiyon haldeki bütünü içinden çeşitli tekniklerle ayrılması sonucu ortaya çıkar. Bunların çoğu basit işlemlerle kuru toz haline getirilebilen senelik ortaya çıkış miktarları 100.000 tondan fazla olduğundan kara yolu alt yapısında kullanılabilir atıklardır.

Türkiyede çok büyük yararlı alan kayıplarına sebebiyet veren atıklardan üçü uçucu kül, mermer tozu ve endüstriyel atık kumdur. Bu atıkların yurdumuzda ortaya çıkış miktarları sırasıyla en az 13 milyon, 1 milyon ve 600000 tondur. Bu çalışmada bu üç atığın karayolu dolgusunda değerlendirilerek ortadan kaldırılma olanağı araştırılmıştır. Bu katı atıkların her biri % 5 ile % 40 aralığında farklı miktarlarda iki farklı doğal zemine karıştırılmıştır. Karışımlarla hazırlanan numuneler kürsüzken veya farklı kür sürelerinde ilave su uygulanmadan sabit 20 ± 2 °C laboratuvar sıcaklığında tutulduktan sonra fiziksel, mekanik, dinamik (M_R) deneylere tabi tutularak özellikleri tespit edilmiştir. Deney sonuçlarında atık türü ve miktarı, kür süresi vb. nedenlerden oluşan değişimlerin mikro yapı ilişkisini görmek için karışımlara XRD ve SEM analizleri uygulanmıştır. Deney ve analiz sonuçları değerlendirmelerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Dolguda kullanılacak atıklarla iyileştirilmiş zeminler için yapılan çalışmalarda katkı ilave yöntemi, numune hazırlama ve kür tekniğinin doğru seçilmesinin önemli

olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada hazırlanan zemin-atık numunelerine atıklar kuru ağırlıkça ve toplam miktarını % 100'e tamamlama esasına göre katılmıştır. Kür süresince ilave su ve sıcaklık uygulanmadan optimum su içeriği (w_{opt}) ile kürün tamamlanması yöntemleri seçilmiştir.

2. Kür süresince numunelerin içinde kalacağı saklama ortamı (desikatör, dolap vb.) ani sıcaklık değişimine uğramamalı ve direk güneş ışığı görmemelidir. Kür uygulamasında, kullandığımız T ve K zemin-atık numunelerinin w_{opt} 'u kaybetmesine engel olmak için SB numuneleri tek, CBR gibi kalıbı içinde saklanacak büyük numuneleri çift naylon torbaya, torba zedelenmeden ve delmeden konulmuş ağzı bağlanmıştır. Şekil 3.15'te görüldüğü gibi desikatörde veya ahşap dolapta naylon torbaya konularak kürlenmiş numunelerin mekanik deney sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır. İki şartın da uygulanan kür açısından numune dayanımlarında fark yaratmadığı tespit edilmiştir.

3. T ve K zemin-UK karışımları ürün olarak hidratasyon bileşikleri oluşturmuştur. Ayrıca UK bu iki zeminin (T ve K) kil boyutlu danelerinin mineral bileşiminde çok bulunan SiO_2 (kuvars) ile reaksiyona girmiştir. Bunun sonucu XRD difraktogramlarında reaksiyon tipine göre çeşitli türde (portlandit ($Ca(OH)_2$), tobermorit ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O$) vb.) kalsiyum alüminyum ve/veya silikat hidrat (CAH, CSH ve CASH) kristalinlerin ortaya çıktığını gösteren pik değişimleri görülmüştür.

4. XRD difraktogramlarında kür süresi arttıkça zemin-UK karışımlarında özellikle kalsit ve kuvars pik boyları kısalmıştır. Bunun tobermorit gibi kalsiyum silika hidrat (CSH) minerallerinin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Benzer kuvars alterasyonu, kalker ($CaCO_3$) içerikleri nedeniyle M ve AK atığı ile zemin etkileşimi olan karışımlarda da görülmektedir. Buna destek olarak difraktogramlarda kil minerallerinden illit ve kaolinit pik boylarında azalmalar görülmüştür.

5. EDX analizi Ca, Si ve O piklerini hidratasyon ürünü olan CSH minerallerinin T ve K zemin-UK karışımları mikro yapısında yoğun olarak bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca SEM mikro resimlerinde bu karışımlardaki UK nedeniyle kil plaklarının

kenarlarında ve aralarında ilave olarak karbonat oluşumları görülmektedir. Dolayısı ile T ve K zeminlerin UK karışımında puzolanik reaksiyon nedeniyle karışım öncesine göre değişmiştir. T ve K zemin mikro yapısındaki kaolin yaprakların kenar-kenar ve kenar-yüzey (kart evi) şeklinde yapıyı oluşturduğu görülmektedir. Kart evi'nin boşluklu ama düzenli sıralanmış kil plaklardan oluşan yapısı zemin-UK karışımlarının permeabilitesini arttırmakta ve kil plak uçları karbonat kümeleri ile birleştiğinde dayanımını arttırmakta bu arada maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) değerleri azalmaktadır.

6. T ve K zemin-M karışımları SEM mikro resimlerinde kil plaklarının ve mermer dane ayrıtları net bir görüntü vermemiştir. Bunu engelleyen, aynı noktada yapılan EDX analizindeki Ca ve O pik uzunlukları ile de örtüşen, T ve K zemin-kireç reaksiyonları sonucu oluşan karbonatlaşmadır.

7. Sıkıştırma deneyi sonucu UK katkısı T ve K zeminin γ_{kmax} değerini azaltmıştır. Bunun nedeni UK küreleri ile kil plakalarının oluşturduğu mikro yapının yanısıra kart evi dizilişidir. Bununla beraber T-UK'nın γ_{kmax} 'ı 100 % T ile yaklaşık aynı değerde kaldığı görülmektedir. K-UK karışım kil daneleri mikro yapısı K zeminin içerdiği kireç içeriği sebebiyle kart evi yapısına daha yakın bir dane dizilimi oluşturmaktadır.

8. T-UK ve K-UK karışımlarında UK katkısı T ve K zeminlerin dane çapı dağılımlarındaki kil miktarını azaltmış, silt miktarını arttırmıştır. UK'lı karışımlar 28 gün kür sonunda en yüksek serbest basınç dayanım (SB) ve CBR değerleri ile en düşük şişme yüzdesini vermiştir. T ve K zemin-UK karışımlarında kürsüzken (karıştırılıp sıkıştırıldıktan hemen sonra) yapılmış permeabilite deneylerinde, bu çalışmada tüm karışımlara ait geçirgenlik değerleri içinde hesaplanan en büyük k katsayıları bulunmuştur.

9. T ve K zemin-M karışımlardaki, kalker ve dolomitten oluşan mermer tozu ve kil daneler birbirine yakın konumlu olmadığı tespit edilmiştir. Benzer daneler arası boşluklar zemin-AK karışımlarında da rastlanmaktadır. Bu kart evi dane diziliminden kaynaklanan boşluklar CBR yüzdesini düşürmüş, şişme yüzdesini

arttırmıştır. Zeminin ve katkının türüne göre oluşan bu dane dizilimi karışımların permeabilite katsayısını artış veya azalış yönünde etkilemektedir. Bu çalışma sonuçlarına göre AK'lı karışımların permeabilitesi atık ilavesi % 10 iken azalmış, % 20 iken artmıştır. AK ilavesi arttıkça ortamdaki kireç içeriği kil daneleri üzerinden ayrılmış AK dane yüzeylerinde tabakalanma şeklinde karbonatlaşma olmuştur. Bu nedenle AK miktarı arttıkça su geçirgenliği artmıştır.

10. Sıkıştırma deneylerinde iki zemine ayrı ayrı % 40 kadar farklı miktarlarda atık ilave edilmiştir. Deney sonuçlarına göre her orandaki katkı ilavesi için karışımların γ_{kmax} 'ı Karayolu Teknik Şartnamesi (KTS) dolguda kullanılabilme sınırı olan $\gamma_{kmax} = 14.23 \text{ kN/m}^3$ değerinin üstünde kalmıştır. Karışımlarda en düşük γ_{kmax} değeri 14.24 kN/m^3 ile T-40UK numunesinde elde edilmiştir. KTS'nin γ_{kmax} kısıtlamasına uygun olarak % 40 AK, M, UK atık miktarına kadar T ve K ile yapılmış tüm karışımlar dolguda kullanılabilir olarak tespit edilmiştir.

11. Hidrometre ve eleme deneyleri ile oluşturulmuş T-15AK ve T-20AK'nın dane çapı dağılımı eğrileri eğrilerin toplu olarak verilen bölümde anlatılan "eğri kuralına" uyması karışıma giren maddelerin büyük oranda fiziksel olarak karıştığını göstermektedir. Küçük bir yüzdenin ihtimal dışı bırakılma nedeni bu karışımların SEM görüntü ve XRD analizlerinden tespit edilen serbest kirecin kuvars tarafından bağlandığını göstermesidir. Bu sonuç hidrometre analizinin bu tür karışımlar hakkında oldukça hassas ancak kesin sonuçlar vermediğini göstermiştir. Bunun nedeninin deneyde yapışık daneleri ayırmak için kullanılan kimyasal ve deneyin su içinde yapılırken kireç reaksiyonları ile oluşan karbonat bileşiklerinin çözünmesi olduğu düşünülmektedir.

12. Eğri kuralına bir kısmı ya da bütünü uymayan dane çapı eğrilerine sahip karışımlarda çimentolanma ve/veya puzolanik reaksiyonlar meydana gelir. Sonuçta karışım boşluk hacmi artar ve kil daneleri flokülasyon ve birleşme (aglomerasyon) nedeniyle büyür. % 15 ve 20 katkılı T-M, T-AK karışım eğrilerinin hepsi T eğrisi ile bir kaç noktadaki çakışması dışında granülometri eğrilerinin bütünü eğri kuralına uygundur. T-20M eğrisi T-20AK eğrisine göre T zemin eğrisine daha yakın oluşu M'nin CaO (kireç) içeriğinin AK'dan biraz fazla oluşu ile açıklanabilir.

13. Dane çapı dağılımında özellikle iri danelerde eğri kuralına uymayan karışımlar K-20M ile K-20AK ve K-15M ile K-15AK'dır. K zemini serbest kireç içeriğinden kaynaklanan puzolanik reaksiyonlar, flokülasyon ve birleşmeler nedeniyle bu karışımlar eğri kuralına uymamışlardır.

14. T-20UK, K-15UK ve K-20UK karışımlarında oluşan reaksiyonların büyük kısmı puzolanik reaksiyonlardır. Bu nedenle bu karışımların bir iki nokta dışında granülometri eğrilerinin tamamı eğri kuralı dışına çıkmaktadır. K-UK karışımlarında kural dışına çıkma nedeni % 15 ve %20 UK katkısına ilaveten K zemininin yüksek miktarda kireç içermesidir.

15. Dane çapı dağılımı sonuçlarından T ve K zemin-UK serilerinde boşluklu yapı, zemin iyileştirmesinde karışımın suyla temas anında oluşan bölünme, katyon değişimi ve kil parçalarının üzerine iyon toplanması reaksiyonları ile açıklanır. T-M ve T-AK serileri çok az miktarda CaO içerdiğinden bu karışımlardan özellikle T-AK daha çok fiziksel değişimin etkisinde kaldığı düşünülmektedir. K-AK ile T-AK karışımlarda atıklar zemin dane boşluklarını doldurmuş bu nedenle % 10 katkıda geçirgenlik katsayısı azalmış, % 20 AK ilavesinde iki zeminde de permeabilite artmıştır. Geçirgenlik katsayılarındaki değişimlerin T-AK serisinde büyük oranla fiziksel olarak, K-AK, T-M ve K-M serilerinde hem fiziksel hem kimyasal olarak K-UK ve T-UK serilerinde ise büyük oranda kimyasal reaksiyonlar neticesi olduğu sonucuna varılmıştır.

16. SB deneyinde T ve K zemin-UK serilerinde yenilme dayanımı (q_u), en düşük bir gün kürde T-5UK ve K-5UK'da 325 kPa, en yüksek 112 gün kürde T-20UK 1000 kPa, K-20UK 1600 kPa hesaplanmıştır. 1. günden 112 gün kür sonuna kadar en yüksek dayanım değeri veren T-20UK ve K-20UK karışımlarında q_u artış oranı sırasıyla % 250 ve % 400'dür.

17. Kısa kür (1. gün) karşılaştırmalarında T ve K zemin-UK serilerinde katkı miktarı arttıkça SB deney bitiminde tespit edilen kuru birim hacim ağırlığında (γ_k) azalmalar olmuştur. Bunun nedeni kireç ile kil daneleri arasında katyon değişimi ve ardından flokülasyon olmasıdır.

18. Uzun-kür (112 gün) karşılaştırmalarında numunelerin SB deneyi sonunda bulunan nihai su içeriği (w_n) T-UK ve K-UK serilerinde % 1-2 azalmıştır. Bunun nedeni T zeminde UK katkı miktarı arttıkça reaksiyon sonucu çimentolanma mineralleri ile bağlanan su molekülleri artması ile w_n 'de azalma olduğu düşünülmektedir. Bu azalma UK katkılı K zeminde daha fazla (% 2) olmasının nedeni de kireç içeriğidir. Ayrıca azalmanın 56. Gün kürden sonra daha belirgin olduğu w_n grafiklerinde görülmektedir.

19. Kısa-kürde T ve K zemin-M serilerinde katkı miktarı arttıkça SB deneylerinden elde edilen q_u ve γ_k azalmış, w_n T-20M hariç T-M serisinde azalmış, K-M serisinde artmıştır.

20. Uzun-kürde T ve K zemin-M serilerinde süre ve atık miktarı arttıkça q_u artmış, süre uzadıkça γ_k aynı kalırken, atık miktarı arttıkça γ_k T-M'de pek değişmezken K-M'de azalmış, T-M serilerinde atık oranı arttıkça w_n yüzde olarak daha fazla düşmüş, K-M karışımların her birinde w_n sabit olarak % 1.5-2.5 oranında düşmüştür. Uzun-kürde T ve K zemin-M serilerinde karışımlardaki su içeriği azalmasının q_u dayanımını arttıran etmenlerden biri olduğu düşünülmektedir.

21. Kısa-kürde (1. gün) T ve K zemin-M serilerinde en düşük q_u değeri T-20M ve K-20M'da sırasıyla 230 ve 320 kPa hesaplanmıştır. Uzun-kürde katkı miktarı arttıkça dayanımlar T ve K zemin-M serilerinde çok fazla artmamıştır. 1. günden 112 gün kür sonuna kadar bu serilerde en yüksek dayanım T-10M'de 504 kPa ve K-5M'de 718 kPa olmuş, q_u değerindeki artış sırasıyla % 45 ve % 75 olmuştur.

22. Kısa-kürde T ve K zemin-AK serilerinde en düşük q_u T-15AK ve K-20AK'da sırasıyla 240-300 kPa hesaplanmıştır. Uzun-kürde en yüksek dayanımlar 112. günde T-5AK 570 kPa, K-5AK 690 kPa'ya ulaşmış, dayanım artış oranı sırasıyla % 200 ve % 180'dir.

23. T ve K zemin-AK karışımları katkı miktarı arttıkça γ_k iki zeminde de düzenli bir değişim göstermemiş, kür süresi arttıkça da farklılık oluşmamıştır. En yüksek γ_k

16.63 kN/m³ ile T-5AK ve 18.83 kN/m³ ile K-5AK'da elde edilmiştir. Bu değerler katkısız T ve K zemin kuru birim hacim ağırlığından yüksektir.

24. Kısa ve uzun kürde CBR grafikleri katkılı karışımların en zayıf taşıma oranlarını gösteren en düşük değerleri alınarak çizilmiştir. Bu grafiklerdeki en yüksek CBR'lar ile T ve K zemin CBR'ı karşılaştırıldığında, zeminlerin CBR'larında UK katkısı en az % 250, M ve AK katkısı T zemine sırasıyla % 75 ve % 25, M ve AK katkısı K zemine % 1 iyileşme sağlamıştır.

25. Numunelerin kürlü ve kürsüz CBR değerleri karşılaştırıldığında uygulanan 28 gün kürün CBR değerini UK atığı ile % 2-25 arttırdığı, T-M ve T-AK serilerinde % 2 azalttığı, K-M serisinde % 1 arttırdığı, K-AK serisinde % 1 azalttığı tespit edilmiştir. % 10-15'ten fazla atık miktarlarında CBR değerlerindeki azalma nedenlerinden biri özgül yüzeyin dolayısıyla numuneyi sıkıştırmak için kullanılan w_{opt} artmasıdır. Diğer bir neden ise artması nedeniyle SiO₂'nin kireci yüzeyinde toplanmasıdır. Kireç daneleri bağlayarak kart evi yapısını oluşturup dayanımı ve taşıma gücünü arttırmaktadır.

26. CBR deneyinden önceki 4 gün boyunca ölçülen şişmelerden hesaplanan şişme yüzdelерinin 28 gün kürlü numunelerde kürsüz numunelere göre daha az olduğu bulunmuştur. Bu seriler içinde de % 15 katkılı karışımların en düşük şişme yüzdesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

28. Düşey gerilme 42 kPa iken K zemini T zeminine göre daha yüksek esneklik modülü (M_R) verirken 28 kPa'da ise T zemini daha yüksek M_R vermiştir. Bunun nedeni düşey gerilme değiştiğinde numunenin farklı davranış göstermesidir. Düşey gerilme azaldıkça (deviatör gerilme arttıkça) ve tekrarlı yüklere karşı K zemininin M_R 'sini azalmıştır. K zeminin kireç içeriği nedeniyle danelerinin birbiri üzerinden kayması sonucu dinamik dayanım azalmıştır.

29. Düşey gerilme 42 kPa iken bulunan karışımların M_R değerleri büyükten küçüğe ilave edilen atıklara göre sıralarsak T zemin'de M, AK ve UK, K zemin'de UK, M ve AK'dır. Bunun nedeni CBR ve SB deney sonuçlarında da görüldüğü gibi K zeminin içerdiği yüksek kirecin hızlı reaksiyonları yanı sıra UK ile yapmış olduğu

puzolanik reaksiyonlardır. Benzer sonuçlar, yüksek sönmüş kireç içerikli zemin ve uçucu kül karışımı ile yapılmış diğer M_R deneyi içeren çalışmalarda da belirtilmiştir.

30. M_R deneyleri çalışmada T ve K zemin-atık karışımları karıştırıldıktan sonra 2 saat içinde yapılmıştır. Bu kısa sürede özellikle 42 kPa düşey gerilme altında, bu üç atığında karışımların esneklik modüllerinde (M_R) yaklaşık % 20-200 oranında artışlar göstermiştir. Kür süresinin artırılması durumunda M_R değerlerinde artışların daha belirgin olacağı düşünülmektedir.

31. Bu çalışmada kullanılan atıkların iyileştirme etkisi tespitinde, sıkıştırma, dane çapı dağılımı, permeabilite, SB, CBR deneylerinden yararlanılmıştır. Ancak deney sonuçlarının yorumlanması ve kullanılabilirlik tespitinde yapılan bu standart geoteknik deneyler kadar M_R deneyleri yanında XRD ve SEM analizlerinden de yararlanılabileceği görülmüştür.

Bu çalışma, atık malzemelerin karayolu yapısında dolguya göre daha üstte olan alt temel ve temel tabakalarında da kullanılabilirliği, benzer atıkların kullanma olasılığı ve benzer atıkların kullanılabilirlik tespiti için daha basit yöntemler araştırması konularında genişletilebilir.

Bu çalışmanın sonucu olarak; Tablo 3.11'de özellikleri verilmiş % 20 kil içeren düşük (CL) ve orta plastisiteli (CI) K ve T zeminlerine ayrı ayrı % 15 oranında C sınıfı uçucu kül, mermer tozu ve endüstriyel atık kum atıkları ile karıştırıldığında yol dolgusunda kullanılabilme şartlarını sağladığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] AASHTO T 307, Çeviren; ÖZAY, O. ve GÜNGÖR, A.G., Esneklik Modülü Deneyi, EK-1, Ulaştırma Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 27-69, 2007.
- [2] ABICHOU, T., BENSON, C.H. and EDIL, T.B., Beneficial Reuse of Foundry by Products. University of Wisconsin, Environmental Geotechnics Report, 1, 42-55, 1999.
- [3] ABICHOU, T., BENSON, C.H. and EDIL, T.B., Foundry Green Sands as Hydraulic Barriers: Laboratory Study. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126, 12, 1174-1183, 2000.
- [4] AGRAWAL, V. and GUPTA, M., Expansive Soil Stabilization Using Marble Dust, International Journal of Earth Sciences and Engineering, 4, 6, 59-62, 2011.
- [5] AHMARUZZAMAN, M., A Review on The Utilization of Fly Ash, Progress in Energy and Combustion Science, 36, 327-363, 2010.
- [6] AKBULUT, H. ve GÜRER, C., Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agregata Olarak Değerlendirilmesi, İMO Teknik Dergi, Yazı 261, 3943-3960, 2006.
- [7] ALKAYA, D., ALYANAK, İ. ve ÇOBANOĞLU, İ., Yatağan Termik Santral Uçucu Küllerinin Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, Trabzon, 2006.
- [8] ALKAYA, D., Uçucu Küllerin Zemin İyileştirilmesinde Kullanılmasının İncelenmesi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1, 61-72, 2009.
- [9] AL-RAWAS, A.A., HAGO, A.W. and AL-SARMI, H., Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on The Swelling Potential of An Expansive Soil From Oman, Building and Environment, 40, 681-687, 2005.
- [10] ALYAMAC, K.E. and INCE, R., The Effect of Powder Admixture Type and Maximum Aggregate Size on Self-Compacting Concrete Characteristics, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE), Trabzon, 2010.

- [11] ANTEMİR, A., HILLS, C.D., CAREY, P.J. and GARDNER, K.H., Long-Term Performance of Aged Waste Forms Treated by Stabilization/Solidification, *Journal of Hazardous Materials*, 181, 65-73, 2010.
- [12] ARORA, S. and AYDILEK, A.H., Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17, 640-649, 2005.
- [13] ARUNTAŞ, H.Y., Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *G.Ü. Mühendislik Mim. Fak. Dergisi*, 21, 1, 193-203, 2006.
- [14] ASTM C618-05, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standarts*, 2005.
- [15] ASTM D422-07, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, *Annual Book of ASTM Standarts*, 2007.
- [16] ASTM D1883-07, Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils, *Annual Book of ASTM Standarts*, 2007.
- [17] AVENA, M.J., and DE PAULI, C.P., Proton Adsorption and Electrokinetics Of An Argentinean Montmorillonites, *Colloid Interface Science*, 202, 195-204, 1998.
- [18] AYAROĞLU, H., Bozüyük Metamorfiklerinin (Bilecik) Petrokimyasal Özellikleri, *T.J.K. Bülteni* 22.1, 101-108, 1979.
- [19] BAHAR, R., BENZAOUZ, M. and KENAI, S., Performance of Compacted Cement-Stabilised Soil, *Cement & Concrete Composites*, 26, 811-820, 2004.
- [20] BANKS, S.J., CHAN, D.H., LEE, K.H. and LAM, K.C., Triaxial Testing of Kaolin-Cement Mixture: Laboratory Program and Preliminary Results, *Proceedings of the Third International Conference on Soft Soil Engineering*, Hong Kong, 545-550, 2001.
- [21] BAŞER, O., Şişen Zeminlerin Atık Mermer Tozu Kullanılarak Stabilizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [22] BAŞER O. ve ÇOKÇA, E., Şişen Zeminlerin Atık Mermer Tozu Kullanılarak İyileştirilmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 143-152, 2010.
- [23] BAYKAL, G., EDİNÇLİLER, A. ve SAYGILI, A., Karla Sıkıştırılmış Uçucu Külün Mikroyapısı ile Mühendislik Özelliklerinin İlişkilendirilmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, Trabzon, 2006.

- [24] BELL, F.G., Lime Stabilization of Clay Soil, *Bulletin of International Association of Engineering Geologists*, 39, 67-74, 1989.
- [25] BERA, A.K., CHANDRA, S.N., GHOSH, A. and GHOSH, A., Unconfined Compressive Strength of Fly Ash Reinforced with Jute Geotextiles, *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 391-398, 2009.
- [26] BONACCORSI, E., MERLINO, S. and KAMPF, R.A., The Crystal Structure of Tobermorite 14 Å (Plombierite), a C-S-H Phase, *Journal of the American Ceramic Society*, 88, 3, 2005.
- [27] BRITO, L., Design Methods for Low Volume Roads, PhD Thesis, University Of Nottingham School of Civil Engineering, The University of Nottingham, 2011.
- [28] BROWN, S. F. 36th Rankine lecture: soil mechanics in pavement engineering. *Geotechnique*, 46, 3, 383-426, 1996.
- [29] BRUNTON, J.M., Developments in The Analytical Design of Asphalt Pavements Using Computers, PhD Thesis, University Of Nottingham School of Civil Engineering, The University of Nottingham, 1983.
- [30] CASAGRANDE, A. and FADUM, R.E., Notes on Soil Testing for Engineering Purposes, Massachusetts, USA, SM Series No. 8. Inc. New York. 74-79, 1940.
- [31] CELİK, M.Y. and SABAH, E. Geological and Technical Characterisation of Iscehisar (Afyon-Turkey) Marble Deposits and The Impact of Marble Waste on Environmental Pollution, *Journal of Environmental Management*, 87, 106-116, 2008.
- [32] CETİN, B., AYDILEK, A.H. and GUNEY, Y., Stabilization of Recycled Base Materials With High Carbon Fly Ash, *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 878-892, 2010.
- [33] CHANG, Dave Ta-Teh., Resilient Properties and Microstructure of Modified Fly Ash-Stabilized Fine-Grained Soils, *Transport Res Rec* 1486, 88-96, 1995.
- [34] CHEN, L. and LIN, D.F., Stabilization Treatment of Soft Subgrade Soil by Sewage Sludge Ash and Cement, *Journal of Hazardous Materials* 162, 321-327, 2009.
- [35] CHEW, S.H., KAMRUZZAMAN, A.H.M. and LEE, F. H., Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 130,7, 2004.
- [36] CHOI, Y.K., Development of the Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS) Test for High Modulus Base Materials, PhD Thesis, University Of Nottingham School of Civil Engineering, The University of Nottingham, 2005.

- [37] CONNER J.R., Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [38] COMERT, A.T., FIRAT, S., YILMAZ G. and SUMER, M., The Effect of Fly Ash, Marble Dust, and Waste Sand on the CBR and Permeability of the Road Subbase Filling Materials, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2010a.
- [39] CÖMERT, A.T., FIRAT, S. ve KOYUNCU, H., Katı Atıkların Yol Alt Yapısında Kullanımı, Uluslar arası 4.İleri Teknolojiler Sempozyumu, Konya, 2005a.
- [40] CÖMERT, A.T., Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyonuna etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapazarı, 2005b.
- [41] CÖMERT, A.T., KOYUNCU, H., FIRAT, S. ve SÜMER, M., Uçucu Kül ile Stabilize Edilmiş Zeminlerde Kür Süresinin Taşıma Gücü Üzerine Etkileri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, Trabzon, 2006.
- [42] CÖMERT, A.T. ve FIRAT, S., F Tipi Uçucu Kül ve Çimento ile Stabilize Edilmiş Zeminlerde Kür Süresinin Taşıma Gücü Üzerine Etkileri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Konya, 849-858, 2008.
- [43] CÖMERT, A.T., FIRAT, S., YILMAZ G. ve SÜMER, M., Uçucu Kül, Mermer Tozu ve Atık Kumun Yol Alt Temel Dolgusunda Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, İstanbul, 153-162, 2010b.
- [44] CRONEY, M.D. and CRONEY, P., Design and Performance of Road Pavements, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 14-16, 1998.
- [45] CULLINANE, M.J., JONES, L.W. and MALONE, P.G., Solidification and Stabilization of Hazardous Wastes, US Environmental Protection Agency, 540, 2-86, 146-198, 1989.
- [46] ÇİMEN, Ö., KESKİN, S.N., ŞİMŞEK, S. ve KALAY, E., Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Pomza ve Mermer Tozunun Etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, İstanbul, 855-862, 2010.
- [47] DOĞAN, Ö., Afşin/Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Çöktürülmüş Kalsiyum Karbonat (CaCO_3) Kazanım Koşullarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007.
- [48] DURHAM, G.N., MARR, W.A. and DeGROFF, W.L., Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM Special Technical Publication (STP) 1437, ASTM International, 2003.

- [49] EDIL, T.B., BENSON, C.H. and ACOSTA, H., Soil Stabilization and Drying Using Fly Ash, Geo Engineering Report No:03 University of Wisconsin Madison, 125, 2003.
- [50] EDIL, T.B., ACOSTA, H. and BENSON, C.H., Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash, Journal of Materials in Civil Engineering, 18, 2, 2006.
- [51] ELMAS, A. and GURER, A., A Comparison of The Geological and Geotechnical Structures in The Eastern Marmara Region (NW Turkey), Journal of Asian Earth Sciences, 23, 153-162, 2004.
- [52] ENE, E. and OKAGBUE, C., Some Basic Geotechnical Properties of Expansive Soil Modified Using Pyroclastic Dust, Engineering Geology, 107, 1-2, 61-65, 2009.
- [53] ERDOĞAN, T.Y., Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını, 2003.
- [54] ERSOY, B., Mermer İşleme Tesisi Atık Su Arıtımında Kullanılan Flokülantların Tanıtımı, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Afyon, 449-462, 2003.
- [55] ERSOY, M., Mermer Ocaklarında Delme Çatlatma Yönteminde Üretim Planlaması ve Hesap Çizelgesi Programında Uygulanması, Tubav Bilim Dergisi, 3, 1, 23-34, 2010.
- [56] FELEKOĞLU, B., Utilization of High Volumes of Limestone Quarry Wastes in Concrete Industry (Self-Compacting Concrete Case), Resources, Conservation & Recycling, 51, 770-791, 2007.
- [57] FIRAT, S. ve CÖMERT, A.T., Uçucu Kül, Kireç ve Çimento ile İyileştirilmiş Kaolinde Kür Süresinin CBR Üzerine Etkileri, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26, 4 719-730, 2011a.
- [58] FIRAT, S., YILMAZ G., COMERT, A.T. and SUMER, M., Utilization of Marble Dust, Fly Ash and Waste Sand (Silt-Quartz) in Road Subbase Filling Materials, KSCE Journal of Civil Engineering, Yayınlanmak Üzere Kabul Edildi, 2011b.
- [59] GHOSH, A. and SUBBARAO, C., Tensile Strength Bearing Ratio and Slake Durability of Class F Fly Ash Stabilized with Lime and Gypsum, ASCE, Journal Of Materials in Civil Engineering, 18, 1,18, 2006.
- [60] GILLIAM, T.M. and WILES, C.C., Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes, 218-223, Fredericksburg VA, 1996.
- [61] GÖRHAN, G., KAHRAMAN, E., BASPINAR, M.S. ve DEMİR, İ., Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 5, No: 2, 33-42, 2009.

- [62] GÜNER, M.S., Malzeme Bilimi Yapı Malzemesi ve Beton Teknolojisi, 14.baskı, Aktif Yayınevi, 316-320, 2011.
- [63] GÜNEY, Y., KOYUNCU, H., YILMAZ, G. ve YALÇIN, M., Kalıp Kumu Atıklarının Yeniden Kullanımının Araştırılması, AÜBAP 030210, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2004.
- [64] GÜNEY, Y., SARI, D., ÇETİN, M. and TUNCAN, M., Impact of Cyclic Wetting-Drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil, Building and Environment 42, 681-688, 2007.
- [65] GUNEYISI, E., GESOGLU, M. and OZBAY, E., Effects of Marble Powder and Slag on the Properties of Self-Compacting Mortars, Materials and Structures, 42, 813-826, 2009.
- [66] HARICHANE, K., GHRICI, M., KENAI, S. and GRINE, K., Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils, Geotechnical and Geological Engineering, 29:759–769 2011.
- [67] HORPIBULSUK, S., RACHAN, R. and CHINKULKIJNIWAT, A., Analysis of Strength Development in Cement-Stabilized Silty Clay From Microstructural Considerations, Construction and Building Materials, 24, 2011-2021, 2010.
- [68] HOUSTON, J.R., MAXWELL, R.S. and CARROLL, S.A., Transformation of Meta-Stable Calcium Silicate Hydrates to Tobermorite: Reaction Kinetics and Molecular Structure from XRD and NMR Spectroscopy, Geochemical Transactions, 10, 1, 2009.
- [69] ISMAIEL, H.A.H., Treatment and Improvement of the Geotechnical Properties of Different Soft Fine Grained Soils Using Chemical Stabilization, PhD Thesis, Der Martin Luther Universität, Halle Wittenberg, 2006.
- [70] İKİZLER, S.B., AYTEKİN, M., VEKLİ, M., YAVUZ, H.İ. ve TANDOĞAN, M., Bentonitin Çimento, Uçucu Kül ve Kum ile Stabilizasyonu, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Konya, 689-698, 2008.
- [71] KALINSKI, M.E. and HIPPLEY, B.T., The Effect of Water Content and Cement Content on The Strength of Portland Cement-Stabilized Compacted Fly Ash, Fuel, 84,1812-1819, 2005.
- [72] KARAKAYA, M.Ç., Kil Minerallerinin Özellikleri ve Tanımlama Yöntemleri, 640s., Ankara, 2006.
- [73] KARAKURT, C., Çimento Üretiminde Doğal Zeolit ve Volkanik Tüflerin Endüstriyel Atıklarla Birlikte Kullanılmasının Beton Performansı Üzerine Etkileri, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, 2008.

- [74] KARAŞAHİN, M., KAYACAN, R., TİĞDEMİR M., ÇAĞLAR F. ve KILIÇ M., Ferrokrom ve Mermer Sanayi Atıklarının Karayolu İnşaatında Değerlendirilmesi ve Laboratuvar Liç Davranışlarının İncelenmesi, Tübitak projesi, 10-14, 2007.
- [75] Karayolu Teknik Şartnamesi, Ulaştırma Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2006.
- [76] KAVAKLI, M., Mermer İşletme Tesisleri Proses Atıksularının Özellikleri, Arıtılması ve Kontrolü, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Afyon, 313-326, 2003.
- [77] KAVAS, T. ve KİBİCİ, Y., Afyon Bölgesi Mermer Atıklarının Portland Kompoze Çimentosu Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Kullanım Olanakları, Türkiye III. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Afyon, 327-335, 2001.
- [78] KAYABALI, K., Geoteknik Deprem Mühendisliği, KRAMER, S.L., Gazi Kitapevi, 551-571, 2003.
- [79] KAYABALI, K., Geoteknik Mühendisliğine Giriş, HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D., Gazi Kitapevi, Ankara, 105-106, 2002.
- [80] KEZDI, A., Stabilized Earth Roads, Elsevier, North-Holland, pp.327, 1979.
- [81] KHATTAB, S.A.A., AL-JUARI, Kh.A.K. and AL-KIKI, I.M.A., Strength, Durability and Hydraulic Properties of Clayey, Soil Stabilized with Lime and Industrial Waste Lime, Al-Rafidain Engineering Journal, 16, 1, 2008.
- [82] KHOURY, N.N, Durability of Cementitiously Stabilized Aggregate Bases for Pavement Application, PhD Thesis, The University of Oklahoma Graduate College, 2005.
- [83] KIM, M. and TUTUMLUER, E., Implications of Complex Axle Loading and Multiple Wheel Load Interaction in Low Volume Roads, Airfield and Highway Pavements, ASCE, 2008.
- [84] KINUTHIA, J. M., Property Changes and Mechanisms in Lime-Stabilized Kaolinite in the Presence of Metal Sulphates, PhD Thesis, School of the Built Environment University of Glamorgan, 1997.
- [85] KLEVEN, J., Mechanical Properties of Excess Foundry System Sand and Evaluation of its Use in Roadway Structural Fill, Geotechnical Engineering Report, 98-1, 125, 1998.
- [86] KLOPROGGE, J.T., Synthesis of Smectites and Porous Pillared Clay Catalysts: A Review, Journal of Porous Materials, 5, 5-41, 1998.
- [87] KOCAELİ İLİ JEOLJİSİ, <http://www.mta.gov.tr/v1.0/bolgeler/kocaeli/kocaeli/jeolojisi.doc>, 2012.

- [88] KOMARNENI, S., BREVAL, L.E., MIYAKE, M. and ROY, R, Cation-Exchange Properties of (Al + Na)-Substituted Synthetic Tobermorites, *Clays and Clay Minerals*, 35, 5, 385-390, 1987.
- [89] KOYUNCU, H., Stabilizasyon / Solidifikasyon Yöntemleriyle İyileştirilmiş Petrollü Sondaj Atıkların Fiziko-Kimyasal Mikro-yapısı ve Geoteknik Özellikleri, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, 1998.
- [90] Kömür Sektör Raporu (Linyit)-2008, Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü (TKİ), [www.tki.gov.tr/dosyalar/KömürSektorRaporu 2008.pdf](http://www.tki.gov.tr/dosyalar/KömürSektorRaporu%202008.pdf), Ankara, 21 sayfa, 2009.
- [91] Kömür (Linyit) Sektör Raporu-2009, Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü (TKİ), [www.tki.gov.tr/dosyalar/KömürSektorRaporu 2009.pdf](http://www.tki.gov.tr/dosyalar/KömürSektorRaporu%202009.pdf), Ankara, 20 sayfa, 2010.
- [92] KUNES, T. and SMITH, M., Waste Disposal Considerations for Green Sand Use in the Foundry Industry, AFS-CMI Conference on Green Sand Productivity for the 80's, 47, 27-55, 1983.
- [93] LEE, SEUNG, W. and FISHMAN, K.L., Resilient and Plastic Behavior of Classifier Tailings And Fly Ash Mixtures, *Transport Res Rec* 1418, 51-59, 1993.
- [94] LEELAVATHAMMA, B., MINI, K.M., and PANDIAN, N.S., California Bearing Ratio Behavior of Soil-Stabilized Class F Fly Ash Systems, *Journal of Testing and Evaluation*, 33, 6, 406-410, 2005.
- [95] LEKARP, F., ISACSSON, U. and DAWSON A., State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates, *Journal of Transportation Engineering*, 2000.
- [96] LITTLE, D., Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall Hunt Publishing Company, 1995.
- [97] Linyit Raporu, Maden Mühendisleri Odası (TMMOB), http://www.maden.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=112&tipi=5&sube=0, 2005.
- [98] LTPP Protocol P-46, Long Term Pavement Performance Project Laboratory Materials Testing And Handling Guide, Publication No. FHWA-HRT-07-052, 2007.
- [99] LVOV, Y., ARIGA, K., ICHINOSE, I. and KUNITAKE, T., Formation of Ultrathin Multilayer and Hydrated Gel from Montmorillonite and Linear Polycations. *Langmuir*, 3038-3044, 1996.
- [100] MARKOU, I.N. and ATMATZIDIS, D.K., Mechanical Behavior of a Pulverized Fly Ash Grouted Sand, *Geotechnical Testing Journal*, 26, 4, 2002.

- [101] MATTIGOD, S.V., RAI, D., EARY, L.E. and AINSWORTH, C.C., Geochemical Factors Controlling the Mobilization of Inorganic Constituents from Fossil Fuel Combustion Residues, *J. Environment Quality*, 19, 188-201, 1990.
- [102] MICHAELS, A.S. and BOLGER, J.C., Settling Rates and Sediment Volumes of Flocculated Kaolin Suspensions, *Ind. Eng. Chem. Fundamen.*, 1, 1, 24-33, 1962.
- [103] MISRA, A., UPADHYAYA, S. and BISWAS, D., Utilization of Silo Stored and Poned Class C Fly Ash in Road Bases, *International Ash Utilization Symposium*, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper #:118, 2003.
- [104] MISRA, A., BISWAS, D. and UPADHYAYA, S., Physico-Mechanical Behavior of Self-Cementing Class C Fly Ash-Clay Mixtures, *Fuel*, 84, 11, 1410-1422, 2005a.
- [105] MISRA, A., UPADHYAYA, S., HORN, C., KONDAGARI, S. and GUSTIN, F., CBR and DCP Correlation for Class C Fly Ash-Stabilized Soil, *Geotechnical Testing Journal*, 29, 1, 2005b.
- [106] MISRA, A., GUPTA, R. and GUPTA, R.C., Utilization of Marble Slurry in Construction Materials, <http://www.cdos-india.com/Papers%20technical.htm>, 2008.
- [107] MISHRA, A.K., MATHUR, R., RAO, Y.V., SINGH, A.P. and GOEL, P., A New Technology of Marble Slurry Waste Utilization in Roads, *Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR)*, 69, 67-72, 2010.
- [108] MITCHELL, J.K. and DERMATAS, D., Clay Soil Heave Caused by Lime-Sulfate Reactions, *Innovations and Uses for Lime*, STP 1135, HOFFMAN, D. C. and STANLEY, D. D., eds., ASTM West Conshohocken, 41-64, 1992.
- [109] MITCHELL, J.K. and SOGA, K., *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, Third Edition, 2005.
- [110] MOLLAMAHMUTOĞLU, M. ve KAYABALI, K., *Geoteknik Deprem Mühendisliği Elkitabı*, DAY, R.W., Gazi Kitapevi, 437, 562-569, 571, 2004.
- [111] MOLLAMAHMUTOĞLU, M. ve KAYABALI, K., *Geoteknik Mühendisliği: İlkeler ve Uygulamalar*, CODUTO, D.P., Gazi Kitapevi, 177-186, 2006.
- [112] MORENO, N., QUEROL, X., ANDRE'S, J.M., STANTON, K., TOWLE, M., NUGTEREN, H., JANSSEN-JURKOVICOVA, M., JONES, R., Physico-chemical Characteristics of European Pulverized Coal Combustion Fly Ashes, *Fuel*, 84, 11, 1351-1363, 2005.

- [113] MUNTOHAR, A.S. and HANTORO, G., Influence of Rice Husk Ash and Lime on Engineering Properties of a Clayey Subgrade, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 4, 2000.
- [114] NABLANTOGLU, Z. and GUCBILMEZ, E., Improvement of Calcareous Expansive Soils in Semiarid Environments. *Journal of Arid and Environments*, 47, 4, 453-463, 2001.
- [115] OKAGBUE, C.O. and ONYEOBI, T.U.S., Potential of Marble Dust to Stabilise Red Tropical Soils for Road Construction, *Engineering Geology*, 53, 371-380, 1999.
- [116] OKAGBUE, C.O. Stabilization of Clay Using Woodash, *the Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 1, 14-18, 2007.
- [117] ÖZER, M. ve ORHAN M., Tane Şeklinin Hidrometre Deney Sonuçları Üzerindeki Etkisi, *Teknik-Online Dergi*, 5, 3, 100-110, 2006.
- [118] ÖNALP, A., İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, Cilt II , 1145, 1202-1209, KTÜ Basımevi, Trabzon, 1983.
- [119] ÖZAY, O. ve GÜNGÖR, A.G., Esneklik Modülü Deneyi, Ulaştırma Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 2008.
- [120] ÖZAYDIN, K., Zemin Mekaniği, 1. Baskı, Mesa Matbaacılık ve Yayıncılık Ltd. Şti., 381-385, İstanbul, 1989.
- [121] PAPAGEORGIOU, G. and HYTIRIS, N., Effect of Partial Substitution of Cement by Pulverized Fuel Ash on the Compressive Strength Material, *Proceedings of the International Congress of Construction for a Sustainable Environment*, Taylor and Francis, 399, 2009.
- [122] PEETHAMPARAN, S., Fundamental Study of Clay-Cement Kiln Dust (CKD) Interaction to Determine the Effectiveness of CKD as a Potential Clay Soil Stabilizer, PhD Thesis, Purdue University, 2006.
- [123] PEZO, R. and HUDSON, W.R., Prediction Models of Resilient Modulus for Nongranular Materials, *ASTM Geotechnical Testing Journal GTJODJ*, 17, 3, 1994.
- [124] READ, J. and WHITEOAK, D., *The Shell Bitumen Handbook*, pp.460, 2003.
- [125] RUPNOW, T. D. SCHAEFER, V. R. and WHITE D. J., An Investigation of the Use of Limestone Screenings in Roadway Construction., *TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM*, 2010.
- [126] SABAH, E. ve ÇELİK, M.Y., İscehisar (Afyon) Mermer Artıklarının Hayvan Yemi Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Türkiye III. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Afyon, 309-315, 2001.

- [127] SABAT, A.K., BEHERA, S.N. and DASH, S.K., Effect of Fly Ash-Marble Powder on the Engineering Properties of an Expansive Soil, Indian Geotechnical Conference (IGC), Proceedings, Ahmadabad, 269-272, 2005.
- [128] SAGHAFI, B. and AL NAGEIM, H.K., The Use of High Waste Dust in Unbound and Hydraulically Bound Materials for Road Bases, The 3rd Built Environment & Natural Environment Conference, Liverpool, 130-136, 2008.
- [129] SAGHAFI, B. and AL NAGEIM, H.K., Short- And Long-Term Effects Of Applying Limestone Dust In Unbound Base Material, The 4th Built Environment & Natural Environment Conference, Liverpool, 140-152, 2009.
- [130] SAGHAFI, B. and AL NAGEIM, H.K., LJMU Progress in Utilizing Limestone Quarry Waste Dust as Road Base and Subbase Material, The 5th Built Environment & Natural Environment Conference, Liverpool, 215-223, 2010.
- [131] SAĞLAMER, A., TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Kurs Notları, <http://www.imoistanbul.org.tr/kursnotlari.htm>, 2010.
- [132] SAĞLIK, A. ve GÜNGÖR, A.G., Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Ulaştırma Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 2008.
- [133] SARKAR, R., DAS, S.K., MANDAL, P.K. and MAITI H.S., Phase and Microstructure Evolution During Hydrothermal Solidification of Clay-Quartz Mixture With Marble Dust Source of Reactive Lime, Journal of the European Ceramic Society, 26, 297-304, 2006.
- [134] SCHMITZ, R.M., Can The Diffuse Double Layer Theory Describe Changes in Hydraulic Conductivity of Compacted Clays?, Geotechnical and Geological Engineering, 24, 1835-1844, 2006.
- [135] SILITONGA, E., LEVACHER, D. and MEZAZIGH, S., Effects of The Use of Fly Ash as a Binder on the Mechanical Behaviour of Treated Dredged Sediments, Environmental Technology, 30, 8, 799-807, 2009.
- [136] SOLANKI, P. and ZAMAN, M. M., Laboratory Performance Evaluation of Subgrade Soils Stabilized with Sulfate-Bearing Cementitious Additives, Journal of Testing and Evaluation, 38, 1, 2009.
- [137] SOLANKI, P., Characterization of Cementitiously Stabilized Subgrades for Mechanistic-Empirical Pavement Design, PhD Thesis, the University of Oklahoma, 2010.
- [138] SOOSAN, T.G., SRIDHARAN, A., JOSE, B.T. and ABRAHAM, B.M., Utilization of Quarry Dust to Improve the Geotechnical Properties of Soils in Highway Construction, Geotechnical Testing Journal, 28, 4, 2005.

- [139] SRIDHARAN, A., SOOSAN, T.G., JOSE, B.T. and ABRAHAM, B.M., Shear Strength Studies on Soil-Quarry Dust Mixtures, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 1163-1179, 2006.
- [140] SWEERE, G. T. H., Unbound Granular Bases For Roads. PhD Thesis, University of Delft, 1990.
- [141] ŞENOL A. ve GÜMÜŞER, C., Uçucu Kül ve Polipropilen Elyafarla Stabilize Edilmiş Zayıf Zeminlerin Analizi, Üçüncü Geoteknik Sempozyumu, Adana, 277-289, 2009.
- [142] LUNNE T., ROBERTSON P.K., POWELL J.J.M., Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Spon Press, London, 2002.
- [143] Taşkömürü Sektör Raporu-2011, Türkiye Taşkömürü Kurumu Genel Müdürlüğü, Ankara, 1-41, 2011.
- [144] TAŞPOLAT, L.T., ZORLUER, İ. ve KOYUNCU, H., Atık Mermer Tozunun Geçirimsiz Kil Tabakalarda Donma - Çözölmeye Etkisi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 1-16, 2006.
- [145] TERZAGHI, K., PECK, R.B. and MESRI, G., Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons Inc., New York., 74-79, 1996.
- [146] THOM, N.H. and BROWN, S.F., Effect of Moisture on the Structural Performance of a Crushed-Limestone Road Base, *Transportation Research Record*, 1121, 50-56, 1987.
- [147] TOPCU. I.B., BILIR. T. and UYGUNOGLU. T., Effect of Waste Marble Dust Content as Filler on Properties of Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 1947-1953, 2009.
- [148] TRZEBIATOWSKI, B.D., EDIL, T.B. and BENSON, C.H., Case Study of Subgrade Stabilization Using Fly Ash: State Highway 32, *Recycled Materials in Geotechnics (GSP 127)*, ASCE Civil Engineering Conference and Exposition, 2004.
- [149] TS 639-1/A1, Uçucu Kül - Betonda Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1998.
- [150] TS 1500, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [151] TS 1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [152] TS 1900-1/T1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleleri - Bölüm 1: Mekanik Özelliklerin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007.

- [153] TS 1900-2, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [154] TS 1900-2/T1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [155] TS 1901, İnşaat Mühendisliğinde Sondaj Yolları ile Örselelenmiş ve Örselelenmemiş Numune Alma Yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1975.
- [156] TS EN 450-1/A1, Uçucu Kül - Betonda Kullanılan - Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [157] TUNCAN, A., TUNCAN, M. ve KOYUNCU, H., Petrollü Sondaj Atıklarının Toprakta Meydana Getirdiği Kirliliğin Fiziksel ve Kimyasal Etkilerinin Araştırılması, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu, Proje No: KTÇAG-136, Eskişehir, 1996.
- [158] TUNÇ, A., Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 253-263, 2002.
- [159] TURGUT, P. and ALGIN, H.M., Limestone Dust and Wood Sawdust as Brick Material, Building and Environment, 42, 3399-3403, 2006.
- [160] TUTUMLUER, E., State of the Art: Anisotropic Characterization of Unbound Aggregate Layers in Flexible Pavements, Pavement and Materials, ASCE, 2008.
- [161] TUTUMLUER, E., İri Daneli Zeminlerin Dinamik Yüklere Bağlı Davranışı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi İstanbul Kültür Üniversitesi, 2010.
- [162] TÜRKER, P., ERDOĞAN, D., KATNAŞ, F. ve YEĞİNOBALI, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ar-Ge Enstitüsü, Ankara, i-ii, 2004.
- [163] Uçucu Kül, <http://www.k3mo.info/insaat-muhendisligi/224-ucucu-kul-nedir.html>, 2012.
- [164] URAL, N., İnce Daneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapazarı, 2008.
- [165] URAL, N., KARAKURT, C. ve CÖMERT, A.,T.,Bilecik Mermer Ocağı Atıklarının Zemin İyileştirme ve Beton Üretiminde Kullanımı, Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu, Ankara, 2010.

- [166] UZUNER, B.A., Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitabevi, Trabzon, 121-123, 2007.
- [167] XANTHAKOS, P.P., ABRAMSON, L.W. and BRUCE, D.A., Ground Control and Improvement, John Wiley & Sons, 224-227, 1994.
- [168] XI, Y., FROST, R.L., HE, H., KLOPROGGE, T. and BOSTROM, T., Modification of Wyoming Montmorillonite Surfaces Using a Cationic Surfactant, Langmuir, 8675-8680, 2005.
- [169] XRF ve XRD Çalışma Prensibi, <http://www.teknis.com.tr/xrd.html>, 2011.
- [170] WANG, H., Analysis of Tire-Pavement Interaction and Pavement Responses Using a Decoupled Modeling Approach, PhD Thesis, Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois, 2011.
- [171] WHITEOAK, D., The Shell Bitumen Handbook, 1990.
- [172] WILD, S., KINUTHIA, J. M., ROBINSON, R. B. and HUMPHREYS, I., Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) On the Strength and Swelling Properties of Lime-Stabilized Kaolinite in The Presence of Sulphates, Clay Minerals, 31, 423-433, 1996.
- [173] WITCZAK, M.W., Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design, Volume II-Asphalt Concrete Material, Final Project Report, Project No. 1-28A, NCHRP, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 2003.
- [174] WITCZAK, M.W., Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design, NCHRP, RRD 285, 2004.
- [175] WONG, L.S., HASHIM, R. and ALI, F.H., Strength and Permeability of Stabilized Peat Soil, Journal of Applied Sciences, 8, 21, 3986-3990, 2008.
- [176] YARBAŞI, N., KALKAN, E. ve AKBULUT, S., Katı Atıklarla Stabilize Edilmiş Zeminlerin Donma-Çözülme ve Dinamik Davranışları, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, Trabzon, 2006.
- [177] YILDIRIM, S., Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Kitapevi, İstanbul, 440-446, 2002.
- [178] YILMAZ, G. ve ÖZSOY, E.A., Bozüyük, Yediler Yerleşim Alanı Kaymasının Stabilitate Analizi, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 18, 2, 2003.
- [179] YILMAZ, G., ÖZSOY, E.A. ve ÇETİN, M., Seyitömer Uçucu Küllerinin Killerle Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Konya, 841-848, 2008.

- [180] ZORLUER, İ. ve USTA, M., Zeminlerin Atık Mermer Tozu ile İyileştirilmesi, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Afyon, 305-311, 2001.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Tuna CÖMERT 31 Mart 1967 tarihinde Ankara'da doğdu. Almanya'da başladığı ilköğrenimini Ankara'da tamamladı. Ankara İnşaat Teknik Lisesi Alt Yapı bölümünü bitirdi. 1987 yılında girdiği Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi bölümünü 1991 yılında bölüm birinciliği ile bitirdi. 1993 yılında YÖK 2. Dünya bankası projesi kapsamında İngiltere'de bir sene süren laboratuvar eğitimi aldı. 1993 yılında Anadolu Üniversitesi Bilecik Meslek Yüksekokulu İnşaat Teknolojisi Programında öğretim görevlisi olarak göreve başladı. 2008 yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesine aktarılan Meslek Yüksekokulundaki görevine devam etmektedir. İnşaat programında Zemin Mekaniği I-II, Yapı Statiği I-II, Mukavemet, Çelik Yapılar I-II, Malzeme Bilimi ve Yapı Malzemesi, Beton Teknolojisi, Bilgisayar Destekli Tasarım I-II, Topografya, Teknik Resim ve Meslek Resmi derslerini laboratuvar ve uygulama ağırlıklı vermiştir. Yüksek lisans eğitimini 2005'te Sakarya Üniversitesinde, Prof. Dr. Seyhan FIRAT'ın danışmanlığında hazırladığı geoteknik konulu tezi ile tamamladı. 2006'da Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Fakültesinde geoteknik ağırlıklı doktora eğitimine başladı. Doktora derslerini, doktora yeterliliğini de verdiği Sakarya Üniversitesinde ve İstanbul Teknik Üniversitesi Geoteknik Bilim Dalından aldığı dersler ve Yrd. Doç. Dr. Mansur SÜMER ve Prof. Dr. Seyhan FIRAT'ın danışmanlığında hazırladığı geoteknik konulu tez ile tamamladı. İngilizce bilmekte, evli ve iki çocuk babasıdır.