

# UÇUCU KÜL, KİREÇ VE ÇİMENTO İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ KAOLİNDE KÜR SÜRESİNİN CBR ÜZERİNE ETKİLERİ

**Seyhan FIRAT<sup>a</sup>, Ahmet Tuna CÖMERT<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>Sakarya Ün., Teknoloji Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Sakarya

<sup>b</sup>Bilecik Ün., MYO, İnşaat Teknikerliği Bölümü, Bilecik

[sefirat@sakarya.edu.tr](mailto:sefirat@sakarya.edu.tr), [atcomert@gmail.com](mailto:atcomert@gmail.com)

(Geliş/Received: 03.06.2009; Kabul/Accepted: 13.07.2011)

## ÖZET

Katkılarla iyileştirilen zeminlerin taşıma gücü tespitinde Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi kullanılır. CBR esnek üst yapılar için alt temel ve granüler tabakaların davranışını belirler. Standart CBR deneyinde, 24 saat havada bekletildikten sonra sıkıştırılan örnekler 4 gün suda bekletilip deneye tabi tutulmaktadır. Bu kür süresi, puzolanik etkinin ilk prizlenme (katılaşma) sürecini kapsar ve puzolanik katkılarla iyileştirilen zeminin taşıma gücü tespiti için yeterli değildir. Bu nedenle karışımlar gerçek arazi durumundaki taşıma gücü tespiti için daha uzun süre kürlenmelidir. Bu çalışmada, F sınıfı uçucu kül ve çimento katkısı ile stabilize edilen iki zeminin taşıma oranları ve dayanım değerleri üzerindeki 1, 7, 28 ve 56 günlük kür etkileri incelenmiştir. Zemin olarak, biri kaolin ve kireç, diğeri kaolin, bentonit ve kireç, iki matris hazırlanmıştır. Matrisler farklı oranda katkı ile karıştırılmış optimum su içeriğinde sıkıştırılmıştır. Kür süreleri sonunda karışımlar üzerinde mekanik ve fiziksel deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarından karışımların CBR yüzdeleri, dayanım parametreleri, dane çapı dağılımı ve bağıl yoğunlukları hesaplanmıştır. 28 gün kür sonunda, uçucu kül katkılı zeminlerin taşıma gücünde %4-%160 artış, çimento katkılı zeminlerin çoğunda ise %50'ye varan düşüş belirlenmiştir. Bu sonuçlar, çimento ve uçucu küle stabilize edilmiş zeminlerin taşıma gücü kontrolünün 28 gün kür sonunda yapılması gerektiğini ortaya koymuştur.

**Anahtar kelimeler:** CBR, Uçucu kül, Kireç, Çimento, Zemin iyileştirmesi

## CURING TIME EFFECTS ON CBR OF STABILIZED KAOLINE WITH FLY ASH, LIME AND CEMENT

### ABSTRACT

California Bearing Ratio (CBR) is used to determine bearing capacity of additives mixed soils. The CBR test estimates behaviour of road sub-base and granular layers for flexible pavement. In the standard CBR test, samples are compacted after waiting 24 hours in air and 4 days in water for curing. But these times are not adequate for a pozzolanic stabilization. It is just enough for the first solidification of pozzolanic effect but is not sufficient for determination of total strength. Hence mixtures should be cured longer to obtain actual bearing capacity of soil. In this study 1, 7, 28 and 56 days cured effects were examined on the CBR percents of soils stabilized with class F fly-ash and cement. There are two main matrices in this study: The first matrice consists of kaolin and lime and the second matrice consists of kaolin, bentonite and lime. In samples, fly-ash (class-F) and cement were used as additives. Different mixtures were prepared with various combinations of these materials and the samples compacted under optimum water content. At the end of curing, the mechanical strength for wet CBR, triaxial un-consolidated and un-drained (UU) and unconfined pressure tests, the physical characteristic for hydrometer analysis, wet sieving were performed on the mixtures. From test results, mechanical characteristics as CBR percentages, strength parameters, physical characteristics as grain size distribution and specific gravity were calculated. At the end of tests, it was determined that CBR values of mixtures cured 28 days are higher than conventional CBR values by 4-160% for the mixtures cured with fly-ash. In same circumstances, it was determined that CBR values decreased by 50% by cement stabilization. According

to these results, CBR test should be performed on 28 days cured samples, in terms of bearing capacity of stabilized soil.

**Keywords:** CBR, Fly ash, Lime, Cement, Soil stabilization

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde katı yakıtlar yaygın olarak enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Düşük kalorili linyit kömürü termik santrallerde yakılarak ekonomik bir değere dönüştürülürken çok miktarda uçucu kül atık olarak elde kalmaktadır. Uçucu kül yanma sonucu ortaya çıkan gazlardan elektrostatik yöntemlerle filtre edilen mikron büyüklüğünde granüler malzemelerdir. Yakılan linyit kömürlerinden geriye ağırlıkça %23 civarında uçucu kül kalmaktadır [1]. Türkiye termik santrallerinde yılda yaklaşık olarak 13 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır [2, 3]. Bu çalışmada uçucu külü kullanılan Orhanlı (Bursa) termik santralinde her yıl 400 bin ton uçucu kül atık olarak üretilmekte, bu külün 170 bin tonu beton ve çimento üreticilerine satılmaktadır. Kalan miktarı kül barajında depolanmak üzere doğaya bırakılmakta olup bu da önemli çevre problemlerine neden olmaktadır.

Uçucu külür inşaat sektörünün değişik alanlarında değerlendirilebilir özellikle olmasına rağmen, yeteri kadar kullanılmamaktadır. Katkı malzemesi olarak hazır beton ve çimento sanayinde artan miktarda kullanılmakta ancak atık rezervlerin tüketilmesi açısından oldukça yetersiz kalmaktadır. Uçucu külün yol inşaatında alt yapı dolgusunda kullanılan zeminlere kimyasal katkı olarak katılması uygulanan bir yöntemdir ve iki yönden fayda sağlar: (1) Uçucu kül karıştırılan zeminlerin taşıma gücü, kayma dayanımı, yüzde olarak kil miktarı azalır silt miktarı artarken, sıkışabilirlik (konsolidasyon), geçirgenlik gibi değerleri azalır. (2) Atık uçucu külün toprağa, suya ve havaya karışarak çevreye vereceği fiziksel ve kimyasal zarar ortadan kalkar. Sorunun aşılması, külün kullanım miktarını arttırmaya bağlıdır [1, 4].

Misra ve arkadaşlarına [4] göre son yıllarda araştırmacılar uçucu külün büyük miktarlarda kullanıldığı yöntemler bulmaya çalışmaktadırlar. Misra ve arkadaşları etkili ve ekonomik atık kullanımı için külün fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğru belirlenmesi ve iyi tanıtılmasının şart olduğunu belirtmişlerdir. Şu ana kadar külün fiziksel ve mekanik (fiziko-mekanik) özellikleri hakkında giderek artan ancak kısıtlı bilgi mevcuttur. Bu nedenle bu özelliklerin detaylı incelenmesine ihtiyaç vardır. Ayrıca uçucu külün bir yapı malzemesi olarak yaygın kabulü için şunlar vurgulanmalıdır: (1) Özellikleri değişiklik gösteren bir yan üründür. Düzensizlikleri anlaşılmalı buna göre önlemler alınmalıdır. (2) Kül kullanımı için tasarım kısıtları yeterli olmalı, kalite kontrol basamakları tam uygulanmalı, kalite kontrol

işlemleri için belirlenen zaman aralıklarına uyulmalıdır.

Genellikle uçucu külür tabiatında açık kül barajlarında depolanır ve kireç miktarlarına bağlı olarak kendiliğinden sertleşirler. Genelde serbest kireç içeriği fazla olan uçucu külür C sınıfı uçucu kül olarak adlandırılır. Bunlar depolama alanlarında kısa bir süre sonra kendiliğinden katılaşır, sertleşir. Bu olaya kendiliğinden çimentolaşma (self-cementing) denir. İçerdiği kireç (CaO) %10'dan az ve içerdiği silisyum, alüminyum ve demir oksitlerinin toplamı ( $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ) % 70'ten fazla olan uçucu kül F sınıfı ismini alır ve kendiliğinden çimentolaşma süresi daha uzundur [5]. Bu nedenle F sınıfı külürin çevre kirlenme potansiyeli daha yüksektir.

Araştırmalar kendinden sertleşme özelliği olmayan F sınıfı külün daha çabuk sertleşmesi ve daha iyi dayanım elde edilebilmesi için karışımlara %5–20 arasında kireç katılmasının faydalı olduğunu ortaya koymuştur [1, 2, 4, 5, 6].

Lee ve arkadaşları [7], kireç katılmış F sınıfı uçucu kül karışımının elastik modülünün, F sınıfı uçucu külün elastik modülünden yüksek ve plastik şekil değiştirmesinin ise F sınıfı uçucu külün değerinden düşük olduğunu göstermişlerdir. F sınıfı uçucu kül ve kireç karışımlarında, doğru dayanım kazancı için, F sınıfı uçucu kül ve kirecin gerçek miktarlarının doğru ölçülmesi önemlidir. Bu gibi durumlarda plastisite indeksi metodu, katkı maddelerinin gerçek miktarlarının ölçülmesinde kullanılabilir [8]. Günümüzde, yol alt temel stabilizasyonu için, yaygın kabul görmüş bir uçucu kül ve kireç oranı yoktur. Buna rağmen, araştırmacılar, zeminin %15'i kadar kireç ve ağırlığının 1:3 oranında uçucu kül ile stabilize edildiğinde, CBR değerinde %4 den %20'ye ve serbest basınç dayanımında 0,3 MPa'dan 0,68 MPa'ya varan bir artışın mümkün olduğunu göstermişlerdir [1].

Dünyada uçucu kül, puzolanik özelliklerinden ötürü, geoteknik mühendisliğinde birçok uygulama alanı bulmaktadır. Düşük özgül ağırlığa ve sıkıştırılabilirliğe sahip olan bu maddeler dolgu zemini ve kireç ile optimum su içeriğinde homojen olarak karıştırılmakta ve yol tabanlarına uygulanmaktadır [9, 10]. Standart ıslak CBR deneyinde (TS 1900-2) sıkıştırılan örnek 4 gün suda bekletilmektedir. Bu süre puzolanik reaksiyonun tamamlanması için yetersizdir [6]. Dolayısıyla puzolanik stabilizasyon işlemlerini içeren CBR deneylerinde kür süresi uzatılmalı ve kil-çimento veya

kil-uçucu kül karışımları arasındaki reaksiyonun büyük oranda tamamlanması sağlanmalıdır.

Okyay ve Dias [11] iyileştirme yapılan zeminlerin mekanik özelliklerini araştırmak için laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Kireç ile yapılan iyileştirmelerde kür süresinin önemli olduğunu ve iyileştirme etkisinin uzun süreli olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla beraber çimento iyileştirmelerinin reaksiyon süresinin çok daha kısa olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca atık katkı oranlarının iyileştirme yapılan zeminlerin mekanik özellikleri üzerine büyük oranda etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Atık malzemelerin yeniden kullanımı ile birçok fayda sağlanabilir. Bunlardan bazıları: a) Depolama maliyetleri azalacaktır, b) Depolama için ayrılacak sahalara çok daha faydalı başka amaçlar için kullanılabilir, c) Atık malzemelerin kullanımının artması sonucu bu malzemeler satılarak bir miktar gelir elde edilebilir, d) Atık malzemeler bazı tükenmekte olan veya pahalı doğal malzemelerin yerine kullanılabilir [12].

Bu araştırmada matris olarak biri kaolin (K), diğeri kaolin+bentonit (KB) iki farklı yapay zemin tipi üzerinde çalışılmıştır. Bu matrislere %5 kireç, farklı oranda uçucu kül ve çimento katılarak stabilize edilmiştir. Karışımlara farklı kür süreleri sonunda fiziksel ve mekanik deneyler yapılarak kür süresinin fiziksel özellikler ve taşıma oranı (CBR), serbest basınç ve üç eksenli (UU) basınç dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1 Materyal (Material)

#### 2.1.1 Kaolin (Kaolin)

Bu çalışmada kaolin kili kullanılmış olup bu kil (K), Bilecik yöresine ait doğal kilden, kimyasal madde kullanılmadan, suyla incelti olarak üretilmektedir. Seramik fabrikaları için üretilen kilin firmadan alınan mineral içeriği Tablo 1’de verilmiştir.

Bilecik kilinin % 80’i kaolinit mineralidir. Aktivitesi düşük olan bu kil plastisite diyagramında A eğrisinin altına düşen aktif olmayan bir mineraldir. Bu killer, teknik anlamda bir kil olsa da silt gibi davranış göstermektedir [13]. Laboratuvarında belirlenen Bilecik kilinin diğer indeks özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Plastik olmayan ve düşük  $I_p$  değerli zeminler için tek başına kireç kullanımı yeterli olmamaktadır. Bu durumda uçucu kül ilave edilirse zeminin kireçle reaksiyonu mümkün olabilmektedir [14].

#### 2.1.2 Uçucu kül (Fly ash)

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül Bursa, Orhaneli termik santrali işletmesinden alınmış, işletme laboratuvarında TS 639’a göre tespit edilen basınç dayanım oranı ve puzolanik aktivite değeri Tablo 2’de standart sınır değerleriyle karşılaştırılmıştır. Uçucu küllün 28 gün kür sonundaki basınç dayanım oranı % 76,0 ve puzolanik aktivitesi %70,9 çıkmıştır [15, 16]. Bu sonuçlara göre Orhaneli uçucu külü TS 639 ve ASTM C618 standartlarına göre dayanım ve aktivite

**Tablo 1.** Bilecik kilinin mineral ve indeks özellikleri (Mineral and index characteristics of Bilecik clay)

Mineral*	İçeriği (%)	İndeks Özellikleri**	Değeri
Kaolinit	79–83	Likit limit ( $w_L$ )	39,1
Serbest kuvars	12–14	Plastik limit ( $w_p$ )	22,6
İllit	2	Plastisite indisi ( $I_p$ )	16,5
Diğerleri	3–6	Özgül ağırlık (Gs)	2,54
Bileşen**	Miktarı (%)	Zemin sınıfı (TS 1500)	CL
Kum	0,0	Kızdırma kaybı, (%)	10–14
Silt	52,4	Optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ), (%)	21,1
Kil	47,6	En büyük kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ), ( $kN/m^3$ )	15,88

\* Firmadan alınmıştır. \*\* Laboratuvarında tespit edilmiştir.

**Tablo 2.** Uçucu küllün basınç dayanım oranı ve puzolanik aktivitesi (Compressive strength ratio and pozzolanic activity of fly ash)

Kür Süresi (gün)	Basınç Dayanım Oranı			Puzolanik Aktivite	
	Uçucu Kül (%)	Standartlar		Uçucu Kül (%)	Standart
		TS 639	ASTM C618		
7	61,2	-	-	58,0	-
28	76,0	En az 75%	En az 75%	70,9	En az 70%
90	86,2	En az 85%	-	78,5	-

özelliklerinin yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Uçucu külün işletmeden alınan kimyasal analiz değerleri ve standartlarla karşılaştırması Tablo 3'de gösterilmiştir [15, 16, 17]. %80,2  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriği ve %0,2 serbest kalsiyum oranıyla F sınıfına giren Orhaneli uçucu külü, MgO,  $\text{SO}_3$ , klorit ve kızdırma kaybı miktarları bakımından da üç standart için istenen koşulları sağlamıştır.

Tablo 4'te uçucu kül ve kalsiyum kirecinin özgül ağırlık, dane çapı dağılımından elde edilen kum, silt ve kil yüzdeleri, üniformluk sayısı (Cu) ve eğrilik katsayısı (Cc) verilmektedir. Burada katkılarının herhangi bir kimyasal reaksiyona girmeden önce büyük oranda silt danelerinden oluştuğu görülmektedir.

Puzolanik reaksiyon silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ile kalsiyum (Ca) arasında oluşan ve çimentolaşma diye tanımladığımız ve betona benzer kalsiyum silikatlar (CS) veya kalsiyum alüminatlar (CA) oluşturan yeni bir karışım elde edilmesi olayıdır. Bu reaksiyon zamana, ortamın sıcaklığına ve su içeriğine bağlıdır [4]. Puzolanik bir reaksiyonda, koloidal ve çimentolaşma olmak üzere genelde iki türlü reaksiyon meydana gelir. Ortamdaki  $\text{Ca}^{++}$  iyonları çok ince partiküller (koloidler) ve özellikle kil yüzeyleri üzerindeki diğer iyonlarla yer değiştirir. Kil yüzeyi pozitif değerlikli hale gelir ve yüzey-uç çekimi

nedeniyle daneler birbirini tutarlar. Zemin daha iri yapıli hale gelir. Likit limit azalır yani karışım daha az plastik hale gelir. Bu şekilde meydana gelen ani tepkime koloidal reaksiyon olarak adlandırılır ve zamana bağlı değildir. Diğer tarafta, kil yüzeyindeki silikatlar ( $\text{Si}^{++}$ ) kalsiyum ( $\text{Ca}^{++}$ ) iyonları ile reaksiyona girer. Neticede camı (jelatin) bir malzeme olan kalsiyum silikatlar (CS) oluşur ve zamanla sertleşir. Bu suda erimeyen oldukça dayanıklı bir yapıdır. Ortamda silikat yok ise CS teşekkül etmez. Bu tip tepkime zamana bağlıdır ve çimentolaşma reaksiyonu olarak isimlendirilir [18].

### 2.1.3 Çimento, kalsiyum kireci, Na-bentonit (Cement, calcium lime and Na-bentonite)

Türk standartlarına uygun CEM I 42,5R Portlant çimentosu dökme olarak temin edilmiştir [19]. Kalsiyum kireci CL80 sınıfı ve TS EN 459-1'e uygun bir kireçtir [20]. Özgül ağırlığı 2,42 olarak belirlenen kirecin, dane çapı dağılımı Tablo 4'te verilmiştir. Na-bentonit (B) Ankara Karakaya Kil Fabrikasından sağlanmış ve torbalardan alınarak kullanılmıştır. Bu kilin Koyuncu tarafından belirlenen fiziko-kimyasal ve geoteknik parametreleri Tablo 5'te verilmiştir [18].

### 2.1.4 Karışım hazırlama (Preparing mixtures)

Fabrikadan sağlanan 0,5-1,0 cm çapında silindirler şeklindeki hava kurusu Bilecik kili karışımlara hazır

**Tablo 3.** Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri (Chemical and physical properties of fly ash)

Madde	Miktar (%)	Standartlar		
		TS 639	ASTM C618	TS EN 450-1
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	80,2	En az 70%	En az 70%	-
MgO	1,5	En çok 5,0%	-	-
Kükürt Trioksit ( $\text{SO}_3$ )	1,6	En çok 5,0%	En çok 5,0%	En çok 3,0%
Kızdırma Kaybı	0,7	En çok 10%	En çok 6,0%	En çok 5,0%
Serbest CaO	0,2	-	-	En çok 1,0%
Klorit	0,03	-	-	En çok 0,1%

**Tablo 4.** Uçucu kül ve kirecin özgül ağırlık ve dane çapı dağılımı (Specific gravity and grain size distribution of fly ash and lime)

Malzemeler (kürsüz)	Gs	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	Cu	Cc
Uçucu Kül	2,13	20,00	64,32	15,68	1,56	1,34
Kalsiyum Kireci	2,42	5,75	89,61	4,64	18,00	1,58

**Tablo 5.** Na-bentonitin özellikleri (Characteristics of Na-bentonite)[18]

İlaveler	pH	KDK (meq/100g)	Eİ (mS/cm)	Sİ (%)	OMM (%)	Gs	$\gamma_{kmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Dane Çapı Dağılımı (%)				
								Kum	Silt	Kil	Cu	Cc
Na-Bentonit	9,50	90,22	2,69	12,7	6,82	2,76	13,50	2	46	52	40	0,8

KDK: Katyon Değişim Kapasitesi, Eİ: Elektriksel İletkenlik, Sİ: Su İçeriği,

OMM: Organik Madde Miktarı, Gs: Özgül Ağırlık,  $\gamma_{kmax}$ :En büyük Kuru Birim Hacim Ağırlık

hale getirmek için No.10 elekten geçinceye kadar lastik tokmakla ufalanmıştır. Malzemeler en az bir gün  $110\pm 5^\circ\text{C}$  etüvde kurutulduktan sonra karışımlarda kullanılmıştır. Bu sayede etüv kurusu hale getirilen malzemelerle hazırlanacak karışımlara optimum su içeriği kadar su katıldığından emin olunur. Karışımların optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) sıkıştırma deneyi ile tespit edilmiştir [21]. Karışım hazırlanırken önce karışımlara  $w_{opt}$  su katılarak suyun malzemelere işlenmesi için 24 saat desikatörde bekletilmiştir [22]. Sonra sıkıştırma düşü yüksekliği, sayısı ve ağırlığı ayarlanabilen, düşü sayısı bitene kadar numune (proktor veya CBR) kalıbını düşey ekseninde döndürebilen otomatik kompaktörle yapılmıştır.

Serbest basınç deneyi (SB) ve konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli deneyi (UU) için 3,6 cm çaplı 7,2 cm boyunda silindir numuneler hazırlanmıştır. Karışımlar Proktor kalıbında standart enerji ile sıkıştırılmış karışıma 3,6 cm çapında üç numune alma silindiri (tüp) batırılmıştır. Silindir numuneler tüplerden metal pistonla itilerek çıkarılmış, boyları 7,2 cm olacak şekilde uçları düzeltilmiştir (Şekil 9). Numuneler SB ve UU deneyi için ağızları bağlı plastik poşette desikatörde kürlenmiştir.

Kür işleminde Türkiye Karayolu Teknik Şartnamesi'ne (KTŞ) bağlı kalınmıştır. KTŞ çimento ilaveli alttemel karışımlarının üzerinden trafik geçirilmeden 7 gün ve 28 gün kürendikten sonra yoldan alınan örneklere Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve serbest basınç deneylerinin uygulanarak kalite kontrolünün yapılması istenmektedir [23]. KTŞ katkı ilave edilmiş temel tabakasını kürlenmek için üç yöntem önermiştir. Bunlardan biri, yola serilen tabakanın naylon ile örtülmesidir. KTŞ'de belirtilen şartı sağlamak için desikatöre sığmayan CBR kalıp ve içindeki numuneler ağızı bağlı plastik poşet içinde ve ani ısı değişiminden etkilenmeyecekleri ahşap dolapta kürlenmiştir. Bu şartlarda numuneler  $20\pm 1^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki laboratuarda optimum su içeriğini

kaybetmeden kürlenmesi amaçlanmıştır.

Kür sürelerinin tespitinde benzer çalışmalarda olduğu [1, 4, 6, 7] ve KTŞ'de istendiği gibi 7 ve 28 günler esas alınmıştır. UU deney kür sürelerine 28. günden sonra küre devam edildiğinde dayanımın seyri hakkında fikir edinmek için 56. gün kür süresi ilave edilmiştir. Ayrıca bir gece bekletilip sıkıştırılan ve hemen deneyi yapılan UU numuneleri kür süresi "1.gün" (1 gün kürlü) şeklinde gösterilmiştir. CBR deneylerinde, numune hazırlama işlemi sırasıyla optimum su içeriği ile karıştırılıp 24 saat bekletilen, sıkıştırıldıktan sonra 4 gün suya bırakılan CBR numuneleri kür süresi "1+4 gün" (*kısa kür*) şeklinde, karışımı 24 saat bekletildikten sonra sıkıştırılan ve 28 gün kürendikten sonra 4 gün suya bırakılan CBR numuneleri kür süresi "28+4 gün" (*uzun kür*) şeklinde gösterilmiştir.

Böylece numuneler UU için 1, 7, 28 ve 56 gün ve SB için 28 gün ve CBR için 1+4 ve 28+4 gün kürlenmiş, bu sürede numunelere direk güneş ışığı gelmesi önlenmiş, ilave ısı ve nem uygulanmamıştır.

Bu çalışmada kullanılan 14 farklı karışım oranları kuru ağırlığa göre tespit edilmiş ve Tablo 6'da gösterilmiştir. Karışımlar üzerinde yapılan deney sonuçlarını karşılaştırmak için iki kontrol numunesi hazırlanmıştır. Bunlardan birincisi %100 Bilecik kili (K) ve diğeri %90 Bilecik kili+% 10 bentonit kilinden (KB) oluşmaktadır. Karışımlara katkılar K ve KB matris ağırlığının kuru yüzdesi kadar ilave edilmiştir (Tablo 6). Örneğin numune ağırlığı, KBL-10C için 9,000 kg kil, 1,000 kg bentonit, 0,050 kg kireç ve 0,100 kg çimentodan oluşur ve toplam kuru ağırlığı 10,150 kg'dır. Kuru ağırlıklara  $w_{opt}$  ağırlığı ilave edilmiş, bulunan değerden karışıma girecek kuru madde ağırlıkları, deneydeki numune ihtiyacına göre orantıyla hesaplanmıştır.

**Tablo 6.** Karışım oranları (Mixture percentages)

Matrisler (%)		Katkılar (%)			Sembol
Bilecik kili	Bentonit	Kireç	Uçucu kül	Çimento	
100	-	-	-	-	K (Kontrol numunesi)
100	-	5	5	-	KL-5F
100	-	5	10	-	KL-10F
100	-	5	15	-	KL-15F
100	-	5	-	5	KL-5C
100	-	5	-	10	KL-10C
100	-	5	-	15	KL-15C
90	10	-	-	-	KB (Kontrol numunesi)
90	10	5	5	-	KBL-5F
90	10	5	10	-	KBL-10F
90	10	5	15	-	KBL-15F
90	10	5	-	5	KBL-5C
90	10	5	-	10	KBL-10C
90	10	5	-	15	KBL-15C

K=Bilecik Kili, L=Kireç, F=Uçucu Kül, C=Çimento, B=Bentonit

**Tablo 7.** Karışımların özgül ağırlık, optimum su içeriği ve en büyük kuru birim hacim ağırlıkları (Specific gravity, optimum water content and maximum dry unit weights of the mixtures)

Karışımlar	$G_s$	$W_{opt}$ (%)	$\gamma_{kmax}$ ( $kN/m^3$ )	Karışımlar	$G_s$	$W_{opt}$ (%)	$\gamma_{kmax}$ ( $kN/m^3$ )
K	2,54	21,1	15,88	KB	2,66	25,9	14,94
KL-5F	2,58	25,4	14,50	KBL-5F	2,58	25,6	14,37
KL-10F	2,57	24,9	14,53	KBL-10F	2,56	24,9	14,43
KL-15F	2,56	24,8	14,52	KBL-15F	2,54	24,3	14,38
KL-5C	2,61	24,9	14,77	KBL-5C	2,65	24,5	14,49
KL-10C	2,62	23,8	15,00	KBL-10C	2,63	24,6	14,78
KL-15C	2,63	24,1	15,09	KBL-15C	2,62	24,7	14,86

$G_s$ : Özgül Ağırlık,  $w_{opt}$ : Optimum Su İçeriği,  $\gamma_{kmax}$ : En büyük Kuru Birim Hacim Ağırlık, K: %100 Kil

## 2.2. Metot (Method)

28 gün kür sonunda karışım özelliklerinin değişimini tespit etmek için; likit limit, plastik limit, hidrometre, ıslak eleme gibi fiziksel; CBR, SB ve UU deneyi gibi mekanik deneyler yapılmıştır. Deneyler KTŞ ve TS 1900-1 ve 1900-2 standardı doğrultusunda yapılmıştır [21, 22, 23].

## 3. DENEY SONUÇLARI (TEST RESULTS)

Karışımların özgül ağırlıkları ve deney numunelerini hazırlamak için gerekli olan optimum su içerikleri ve en büyük kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiş ve Tablo 7'de verilmiştir. Silt ve daha küçük tanelerden oluşan katkıları K ve KB matrislere katıldığında kuru birim hacim ağırlığı azalmaktadır. Katkıların taneler arası (çimento) veya tanelerin içindeki (uçucu kül) boşluk miktarı ve birim yüzey alanları fazladır. Bu sıkışma için gerekli  $w_{opt}$  ihtiyacını arttırmış ve KL-katkı karışımlarında K matrisine göre optimum su içeriği daha büyük çıkmıştır. Uçucu kül tanelerin çoğu içi boşluklu kürelerden oluştuğu için F katkılı K matriste  $w_{opt}$  yüksek çıkmıştır. KBL-F karışımlarında katkı miktarı arttıkça optimum su içerikleri azalmış, KBL-C karışımlarında çok az artmıştır.

Tablo 7'deki kuru birim hacim ağırlıkları uçucu kül ve çimento katkılı karışımlar için sırasıyla 14,37–14,53 ve 14,49–15,09  $kN/m^3$  aralığında çıkmıştır. Karışımların kuru birim hacim ağırlıkları K ve KB matrislerin kuru birim hacim ağırlıklarından küçük

çıkmıştır. Bunun sebebi, karışımlara konan suyun da etkisiyle ani gelişen kolloidal reaksiyon ve kil tanelerinin daha büyük danelere dönüşmüş olmasından kaynaklanabilir. Özgül ağırlığı düşük uçucu kül katkılı karışımlarda kuru birim hacim ağırlıklardaki bu azalma daha fazla olmuştur. Killi zeminlerde su içeriği sürekli değişiyorsa kireçle stabilize edilerek hacim sabitliğini sağlamak mümkün olmaktadır [14]. %5 kireç ilavesi nedeniyle karışımların kuru birim hacim ağırlıkları birbirlerine

yakın çıkmıştır. Karışıma katılan kil karışıma katılan kil yüzdesinin azalmasına rağmen likit limit değerinde önemli değişimlerin olmamasının nedeni karışıma katılan uçucu kül ve kireçten kaynaklandığı düşünülmektedir.

## 3.1 Karışımların indeks özellikleri ve tane çapı dağılımı (Index properties and grain size distribution of mixtures)

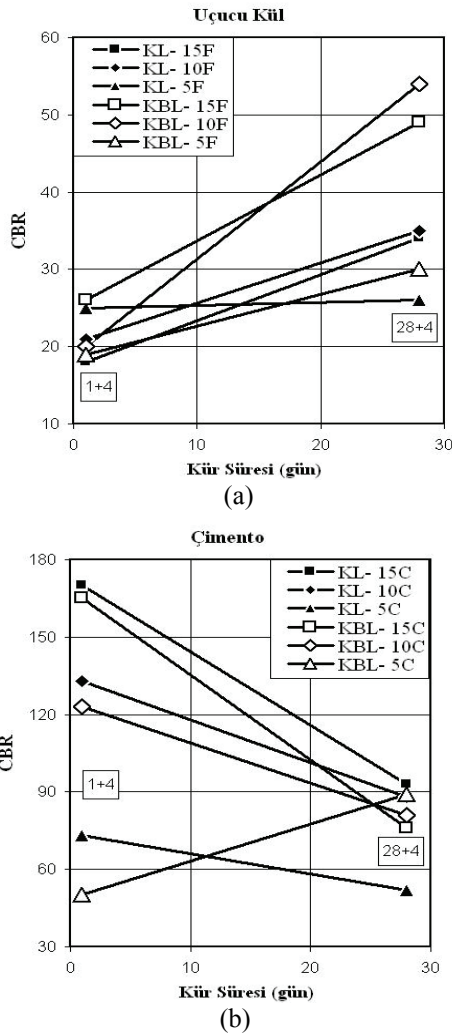
28 gün küre tabi tutulan karışımlar ıslak eleme, hidrometre, likit limit, plastik limit deneylerine tabi tutulmuştur. Karışımların kum, silt ve kil miktarları, likit limit, plastik limit, plastisite indisi değerleri ve zemin sınıfları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8'de katkısız ve kürsüz K ve KB matrislerinin silt ve kil oranları ile 28 gün kür sonrası katkılı matrisler karşılaştırıldığında, silt oranında artış kil oranında ise azalma görülmektedir. 28 gün kürlü karışımlardaki silt miktarı artışı, zamana bağlı çimentolaşma reaksiyonu sonucu meydana gelmektedir. Kil daneleri bu reaksiyon sonucu kalsiyum silikatları oluşturarak irileşir ve böylece silt miktarı artar [18]. Kireç zeminle reaksiyona girerek kil tanelerini birbirine bağladığında zeminin  $w_L$ ,  $w_P$  ve  $I_P$  değerlerini (kıvam limitleri) önemli ölçüde azaltır [14]. KBL-katkı karışımlarında sonuçların çoğu bu duruma uygun çıkmıştır. KL-katkı karışımların K'ya göre optimum su içeriğinin daha fazla oluşu  $w_L$ ,  $w_P$  ve  $I_P$  değerlerinin K matrisinden büyük çıkmasına da neden olmuştur. KL-katkı'lar kendi aralarında karşılaştırıldığında beklendiği gibi katkı miktarı arttıkça kıvam limitleri genelde azalmıştır. KBL-katkı'larda  $w_L$  ve  $w_P$  yüzdeleri, KBL-15C hariç, F ve C katkılarında azalmıştır.

**Tablo 8.** Kürsüz matrislerin ve karışımların 28 gün kürlendikten sonra geoteknik özellikleri (Geotechnical properties of uncured matrices and mixtures after cured 28 days)

Karışımlar	Kum %	Silt %	Kil %	Likit Limit w <sub>L</sub> %	Plastik Limit w <sub>p</sub> %	Plastisite İndisi I <sub>p</sub> %	Zemin Sınıfı (USCS)
K*	0,0	52,4	47,6	39,1	22,6	16,5	CL
KL-5F	1,0	56,7	42,3	53,1	31,6	21,5	MH
KL-10F	2,0	58,8	39,2	48,1	30,3	17,8	ML
KL-15F	3,0	60,5	36,5	47,2	31,6	15,6	ML
KL-5C	0,0	53,6	46,4	50,3	29,4	20,9	MH
KL-10C	0,0	60,5	39,5	51,1	34,5	16,6	MH
KL-15C	0,0	60,2	39,8	48,4	34,7	13,7	ML
KB*	0,0	45,2	54,8	54,2	31,4	22,8	MH
KBL-5F	1,0	47,4	51,6	54,3	37,0	17,3	MH
KBL-10F	2,0	58,1	39,9	52,3	33,8	18,5	MH
KBL-15F	3,0	54,8	42,2	50,9	31,5	19,4	MH
KBL-5C	0,0	56,1	43,9	50,8	37,4	13,4	MH
KBL-10C	0,0	63,4	36,6	48,7	37,1	11,6	ML
KBL-15C	0,0	61,3	38,7	50,8	39,1	11,7	MH

\* Kürsüz Matris

**Şekil 1.** Kür süresinin CBR'a etkileri a) Uçucu kül katkıları b) Çimento katkıları (Curing time effects on CBR a) Fly ash additive b) Cement additive)

### 3.2 Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deney sonuçları (Test results of California bearing ratio (CBR))

Kaliforniya taşıma oranı deneyi çeşitli katkılarla iyileştirilen dolguların taşıma özelliklerini tespit etmek için de kullanılan önemli bir deneydir. CBR deneyi TS 1900-2 standardında anlatıldığı gibi uygulanmıştır [22]. Matris+katkılar kuru olarak harmanlanıp optimum su içeriği kadar su katılıp karışım bir gün desikatörde bekletilmiştir. Bu zemin karışımı CBR kalıbına kompaksiyon cihazı ile üç kademe halinde, her kademeye 2,5 kg'lık tokmakla 31,5 cm yükseklikten yapılan 61 vuruş ile sıkıştırılmıştır. Karışımlar ya hemen (1. gün) yada 28 gün kürlendikten sonra su havuzunda 4 gün bekletilmiş CBR şişme yüzdesi ölçülmüştür. Kısa (1+4 gün) ve uzun (28+4 gün) kürlenmiş CBR numunelerinde KTŞ limitlerini aşan şişme yüzdesi gözlenmemiş en büyük CBR şişme yüzdesi %0,1 ile kısa kürlü KBL-5F'de elde edilmiştir. Bentonit içeren numunelerde de çimento ve uçucu kül katkılarından dolayı aşırı şişme oranı tespit edilmemiştir. Kalıp içindeki numunelere her iki yüzünden de CBR deneyi uygulanmıştır. Koyuncu ve arkadaşları malzemelerin CBR değerine göre, %20 ve %30 arasında "çok iyi bir üst yapı tabanı", %30 ve %50 arasında "iyi bir alt temel" olabileceğine işaret etmişlerdir [24]. Bunlara ilaveten KTŞ yol "temel" tabakasında kullanılacak malzemenin CBR değerinin, %100-120'den az olmaması istenmektedir [23].

#### 3.2.1 Uçucu kül (F) katkı karışımları (The fly ash (F) added mixtures)

Şekil 1a'da sıkıştırmadan önce bir gün ve 4 gün suda (kısa kür), standart CBR şeklinde kürlenmiş K matrisi taşıma oranı %9'dur. K'ya ilave edilen uçucu kül (F) miktarı (%5, 10, 15) arttıkça CBR azalarak sırasıyla %25, 21, 18, KB'de F miktarı artarken CBR artarak

sırasıyla %19, 20, 26 olmuştur. Kısa kür uygulanan karışımlarda en yüksek taşıma oranı KL-5F'te %25 ve KBL-15F'te %26 elde edilmiştir. Taşıma gücü azalan, KL-F karışımlarında artan F miktarı ile kum yüzdesi artmış, CBR'm F miktarı ile birlikte artış gösterdiği KBL-F karışımlarında tek fark matrisin % 10'unu oluşturan bentonittir. Bentonit KB-katkı karışımlarda taşıma gücünü düşüren etkiyi tersine çevirmiştir. CBR iki matrisle yapılan karışımda da %25-26'yı geçmemiştir. Böylece kısa kür sonunda KL-5F ve KBL-15F karışımlarının "çok iyi bir üst yapı tabanı" oluşturabileceği görülmektedir.

Şekil 1a'da, optimum su içeriğini kaybetmemesi için 28 gün çift plastik torbada kürlenmiş ve şişme ölçümü için 4 gün su havuzunda (*uzun kür*) bekletilen karışımların taşıma oranları, karışımların kendi standart CBR değerlerinden daha yüksek bulunmuştur. Kür süresi uzatılınca KB matrislerin CBR'ı iki kat artmış ve KBL-F karışımların CBR'ı KL-F serisini büyük farkla geçmiştir. Böylece uzun kürde K ve KB'nin %10 ve 15 F katkılı karışımlarının %30-50 aralığında CBR vererek yol yapımında daha üst tabakada kullanılabileceği ve "iyi bir alt temel" oluşturabileceği tespit edilmiştir.

Uzun kür (28+4 gün) süresi sonunda yapılan CBR deneyi, F katkılı K ve KB karışımların, yolun taşıma gücü daha yüksek olması gereken bir tabakasının yapımında kullanılabileceğini göstermiştir.

### 3.2.2 Çimento (C) katkılı karışımlar (The Cement (C) added mixtures)

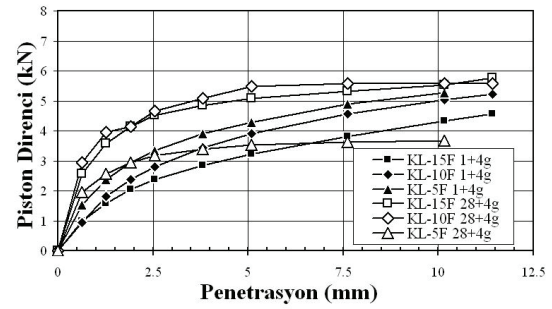
Şekil 1b'de verilen kısa kürlü K matrislerde CBR'ı C katkısı arttıkça (%5, 10, 15) artmış, sırasıyla K matrisinde %73, 133, 173, KB matrisinde %50, 123, 165 bulunmuştur. Bunlardan en yüksek CBR % 15C katkılı karışımlarda elde edilmiştir. %10-15C katkılı karışımların CBR'ı %120-160 aralığında çıkarak KTŞ limitlerine göre yol tabakaları içinde "temel" yapımında kullanılabilecek CBR değeri vermiştir.

Şekil 1b'deki CBR deney sonuçlarına göre uzun kürlü K ve KB matrislerin hepsi, kısa kürlü numunelere göre taşıma gücü kaybına uğramıştır. Böylece uzun kürde KL-5C hariç bütün karışımlar %85-95 aralığında CBR vermiş, bu karışımlar yol tabakası olarak ancak "alt temel" yapımında kullanılabileceği görülmüştür.

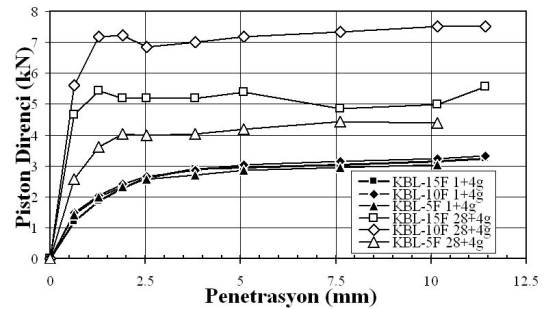
Bu bulgular sonucunda C katkılı K ve KB matris iyileştirmelerde standart CBR deneyindeki kür süresinin yanıltıcı sonuçlar elde edilmesine neden olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 2'den Şekil 7'ye kadarki grafiklerde karışımların ıslak CBR deneylerinde ölçülen, penetrasyon (batma) miktarlarına karşı gösterdiği piston dirençleri verilmiştir. Deneyler 12,0 mm batma derinliğine kadar sürdürülmüş, piston dirençleri kN

cinsinden yük halkası ile okunmuştur.



Şekil 2. K+kireç+uçucu kül karışımların 1+4 ve 28+4 gün dayanım karşılaştırması (Comparison of K+lime+fly ash mixture for 1+4 and 28+4 days strengths)



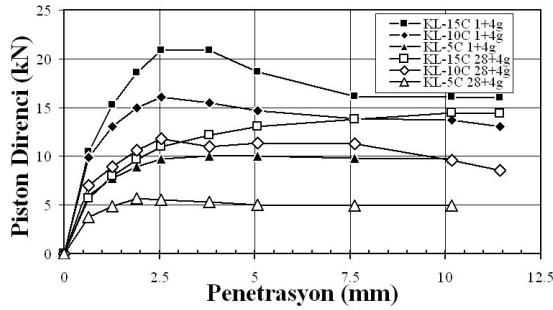
Şekil 3. KB+kireç+uçucu kül karışımların 1+4 ve 28+4 gün dayanım karşılaştırması (Comparison of KB+lime+fly ash mixture for 1+4 and 28+4 days strengths)

Şekil 2'de K matrislerde 1+4 gün (kısa) kür sonunda F oranı %5 ile en yüksek piston dirençleri göstermiş, 28+4 gün (uzun) kür sonunda %10 katkılı karışım en yüksek dayanımları vermiştir. Şekil 3'te KB matrislerde F oranı artarken, kısa kürde piston direnci artmamış uzun kürlenmiş karışımlarda % 10 katkı oranlı malzeme en yüksek direnci vermiştir. Uzun kürde, iki matrisde de en yüksek piston dirençleri %10F katkılı karışımlardan alınmıştır. Şekil 2 ve Şekil 3 karşılaştırılırsa kısa kürlü K ve KB matrislerde B içeriği numunelerin dayanımına sabitleyici etki yapmıştır. KB matrisler uzun küre tabi tutulduğunda ise katkı miktarları % 10'a kadar artış göstermiş, %15 F katkısında dayanım %10F'den az olmuştur.

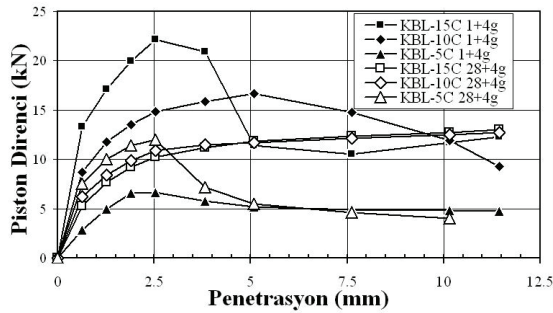
K matrislerinde C oranı arttıkça piston dirençlerinin arttığı Şekil 4'te görülmektedir. Karışımların hepsi uzun küre tabi tutulunca piston dirençleri azalmıştır. Kısa ve uzun kür serilerinde en yüksek dayanım % 15C katkılı matrislerde gözlenmiştir. İstisna olarak uzun kürlenmiş numunelerde KL-10C karışımı 2,5 mm batma derinliğine gelinceye kadar en iyi dirençleri göstermiştir.

Şekil 5'te KBL-C karışımların piston dirençleri görülmektedir. Karışımlardan kısa kürlü %15, uzun kürlü %5 C katkılı karışım piston dirençleri, 2,5 mm batma derinliğine gelinceye kadar kendi kür serileri içinde en yüksek dirençleri göstermişlerdir. Bu derinlikten sonra en iyi dirençler kısa kürlü %10 uzun

kürlü %10 ve 15 C katkılı karışımlardan elde edilmiştir. Deney bitiminde (12,0 mm batma) kısa kürlü %15 C ve uzun kürlü %10 ve 15 C katkılı karışımlar 10-12 kN piston direnci ile ve ani azalma göstermeden deneyi bitirmişlerdir.



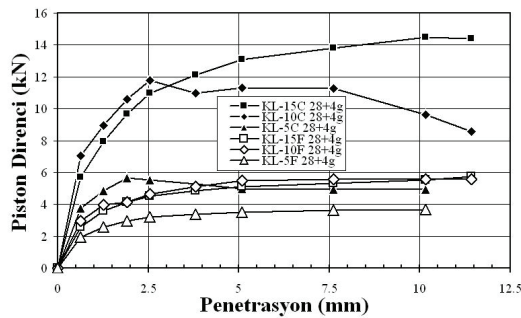
Şekil 4. K+kireç+çimento karışımlarının 1+4 ve 28+4 gün dayanım karşılaştırması (Comparison of K+lime+cement mixture for 1+4 and 28+4 days strengths)



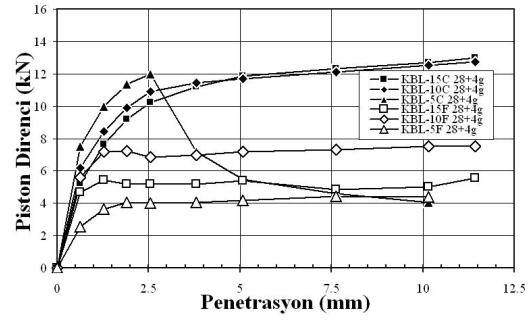
Şekil 5. KB+kireç+çimento karışımlarının 1+4 ve 28+4 gün dayanım karşılaştırması (Comparison of KB+lime+cement mixture for 1+4 and 28+4 days strengths)

Şekil 4 ve 5'te görüldüğü gibi kısa kürlü %10-15 C katkılı karışımlar uzun kürlenince piston dirençleri daha düşük çıkmıştır.

Şekil 6 ve Şekil 7'de uzun kür etkileri karşılaştırılmıştır. Şekil 6'da C katkılı karışımlarda katkı oranı arttıkça piston direnci artmıştır. KL-C karışımlarında en yüksek piston direnci %10-15 C katkılı karışımlarda gözlenmiştir. Diğer karışımlar birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 6. 28+4 gün kürlü K+kireç+uçucu kül ve K+kireç+çimento karışımlarının karşılaştırması (Comparison of 28+4 days cured K+lime+fly ash and K+lime+cement mixtures)



Şekil 7. 28+4 gün kürlü KB+kireç+uçucu kül ve KB+kireç+çimento karışımlarının karşılaştırması (Comparison of 28+4 days cured KB+lime+fly ash and KB+lime+cement added mixtures)

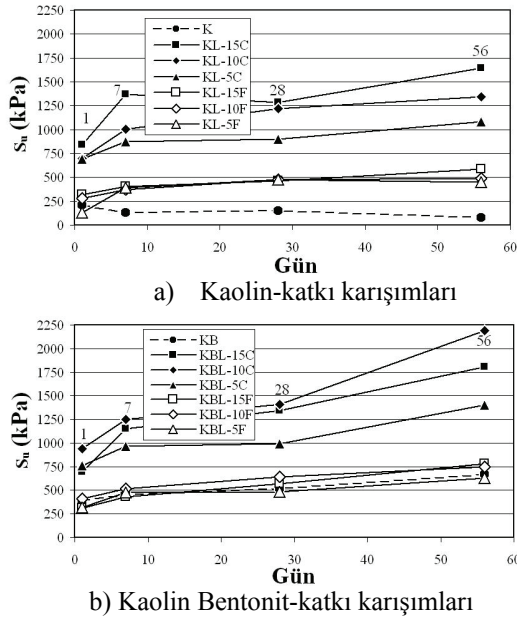
Şekil 7'de C katkılı matrislerde beklenen aksine katkı oranı arttıkça piston direnci azalmıştır. Piston batma derinliği 2,5 mm kadar en yüksek dayanım %5 C katkılı karışımdan okunmuştur. Bundan sonra %10 ve %15 C katkılı karışımlar dayanım artışlarını deney sonuna kadar sürdürmüştür. F katkılı karışımlar deney sonuna kadar 2,5 mm batmada ulaştıkları piston direncini göstermişlerdir. Bunlarda en yüksek piston direnci %10 F katkılı karışımda elde edilmiştir.

### 3.3 Üç eksenli basınç deneyi (Triaxial compression test)

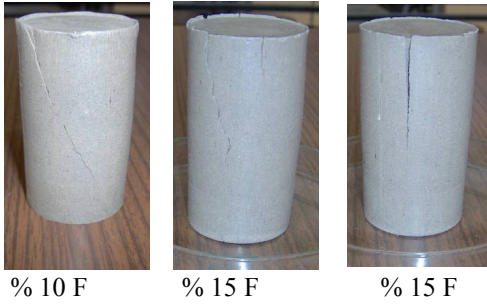
Üç eksenli deneylerden konsolidasyonsuz drenajsız basınç deneyi (UU) TS 1900-2'de önerilen metoda uygun olarak ve 100 kPa ve 200 kPa olmak üzere iki hücre basıncı altında yapılmıştır [22]. UU deneyi killerin arazideki drenajsız kayma dayanımını tespit etmekte kullanılır. Karışımlardan elde edilen silindirik hücrelere UU deneyi ile uygulanan düşey ve deviyör gerilmeler ile çizilen Mohr-Coulomb yenilme zarfından kayma dayanımı parametreleri olan drenajsız kayma direnci ( $S_u$ ) ve kayma açısı ( $\phi_u$ ) hesaplanır. 1, 7, 28, 56 gün kürlenmiş karışımların UU deney sonuçları ile hesaplanmış drenajsız kayma dayanımları ( $S_u$ ) Şekil 8a ve 8b'de birbiri ile, 28 gün kürlü olanları Şekil 10'da SB deneyinden hesaplanmış serbest basınç dayanımları ( $q_u$ ) ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 8a'da verilen dayanımlarda, K matrisi C oranı arttıkça  $S_u$  artmıştır. En yüksek  $S_u$  1640 kPa ile %15 C katkılı matrisde gözlenmiştir. F katkılı matrisler 7 gün ve 28 gün kürede ve bütün katkı miktarlarında (%5, 10 ve 15) yaklaşık aynı dayanım değerini vermiş, 56 gün kürede ise %15 katkılı karışımda dayanım artmış, %10 ve %5'te ise az miktarda düşme görülmüştür.

Şekil 8b'de verilen karşılaştırmada KB matrisin F veya C katkı oranı %10'a kadar arttıkça dayanım da artmış, en yüksek  $S_u$  değerini 2190 kPa ile KBL-10C vermiştir. %15 katkı oranlı karışımlara beklenen yüksek dayanımı vermemiştir. Bunun nedeni %15 katkı miktarının matrislerin plastik şekil değiştirme özelliğini azaltmış olmasıdır.



Şekil 8. Farklı kür sürelerine göre UU drenajsız kayma dayanımları ( $S_u$ ) (UU undrained shear strengths ( $S_u$ ) in different curing times)



Şekil 9. Üçeksenli deneylerde %10 ve 15 uçucu kül katkıli matrislerde elde edilen tipik kırılmalar (Typical failure of 10–15 % fly ash additive mixtures for triaxial tests)

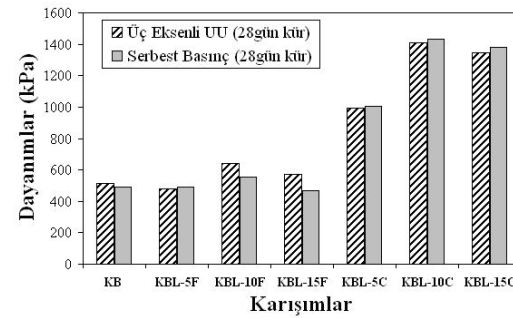
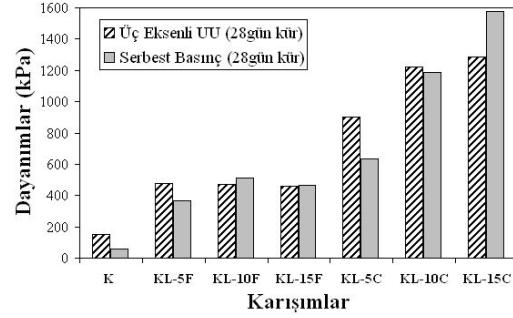
UU deneyinde 28 ve 56 gün kürlü %15 F ve daha çok %15 C katkıli matrislerde dik doğrultuda derin çatlaklar oluşarak yenilme meydana gelmiştir. Çatlakların nedeni matrislerin plastisitesini yitirmesi ve gevrek bir yapıya dönüşmesidir. Deney sonu numunelerin tipik kırılma şekilleri Şekil 9’da görülmektedir. UU deneylerinde K matrisine ait %15 katkıli, KB matrislerinde %10 katkıli karışımlar en yüksek kayma dayanımı değerini vermişlerdir.

### 3.4 Serbest basınç deneyi (Unconfined compressive strength test)

Serbest Basınç (SB) deneyi, karışımların serbest basınç dayanımını ( $q_u$ ) hesaplamak için yapılmıştır. Şekil 10’da 28 gün kürlenmiş numunelerin SB deney verileriyle hesaplanan  $q_u$  değerleri ile UU deneyinden hesaplanan  $S_u$  değerleri karşılaştırılmıştır.

28 gün kürede en yüksek  $q_u$  değerleri KL-F, KBL-F,

KBL-C serilerin %10 katkıli karışımlarında elde edilmiştir. %15 katkıli karışım KL-C serisinde en yüksek serbest basınç dayanımı vermiştir. Deneyler sırasında K ve KB matrislerin %15 F ve C katkıli numunelerinde gözlenen dikey doğrultudaki tipik çatlaklar Şekil 9’da verilen resimdekilerle aynıdır. Bu çatlaklar zeminin gevrek bir malzeme haline geldiğini göstermektedir. Dolayısıyla KL-C karışımı hariç %10 katkı miktarı tüm karışımlarda optimum dayanımları vermektedir.



Şekil 10. Üç eksenli (UU) ve serbest basınç deneyi dayanımları (Strengths of triaxial compression tests (UU) and unconfined compressive strength tests)

Şekil 10’da görüldüğü gibi, katkıli K ve KB matrisleri SB ve UU deneyleri sonuçları karşılaştırıldığında, çimento katkıli K matrisleri hariç, SB ve UU deneylerinde yakın dayanımlar elde edilmiştir. Buna göre uçucu kül ve çimento katkıli zeminlerin dayanımını tespit için, tek başına serbest basınç deneyinin yeterli olduğu sonucuna varılabilmektedir.

## 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Kaolin ve kaolin bentonit matrislerinin uçucu kül ve çimento ile farklı kür sürelerinde stabilize edilmesi sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 28 gün kürendikten sonra çimento, uçucu kül ve kireç ilavesi K ve KB matrislerinde dane çapı dağılımını değiştirmiştir. Matrislerin silt oranı artmış, kil oranı azalmıştır.
- Optimum su içeriği Bilecik kili için % 21, karışımlar için ise % 23–25 arasında tespit edilmiş, en büyük kuru birim hacim ağırlıklar ise Bilecik kili için  $15,88 \text{ kN/m}^3$  iken karışımlar için  $14,37$ – $15,09 \text{ kN/m}^3$  arasında tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan katkıli ince maddelerdir ve

ilave edildikten sonra karışımların birim yüzey alanlarını arttırmalar. Bu nedenle karışımlar daha iyi sıkışma için daha fazla suya ihtiyaç gösterir. Bu da optimum su içeriğinin artmasına sebep olmaktadır. Kuru birim hacim ağırlık değerinin azalması, karışımların dane dağılımındaki silt yüzdesinin artması ve/veya özgül ağırlığın azalmasından, bu yüzden birim hacmindeki daneler arası boşluk miktarının ve/veya boşluklu tanelerin artmasından kaynaklanmaktadır.

- Karışımların hepsinde 28 gün kürde kil miktarı azalıp silt miktarı artmıştır. KL-katkı'lar kendi aralarında karşılaştırıldığında katkı miktarı arttıkça  $w_L$ ,  $w_P$  ve  $I_P$  yüzdeleri (kıvam limitleri) genelde azalmıştır. KBL-katkı'larda kıvam limitleri, KBL-15C hariç, F ve C katkılarında azalmıştır.
- Standart CBR (kısa kür) deney sonuçlarına bakılarak uçucu kül katkılı karışımların hepsinin "çok iyi bir üstyapı taban" zemini olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir. Aynı numuneler uzun kürlendiğinde "çok iyi alt temel malzemesi" olarak yolun taşıma gücü daha yüksek olması gereken bir tabakasının yapımında kullanılabilmesi tespit edilmiştir.
- Çimento katkılı karışımlarda kısa kürde "temel tabakası" malzemesine uygun olduğu çıkan karışımlar uzun kür sonunda kısa kürlü numunelere göre taşıma gücü kaybına uğramış bunların "alt temel malzemesi" olarak kullanılabilmesi görülmüştür.
- Sonuçlar, uçucu kül veya çimento gibi puzolanik maddelerle stabilize edilen zemin-katkı karışımlarında kısa kür süresinin malzeme özelliğini doğru ölçülmek için yeterli olmadığını göstermektedir. CBR deneyi için bu tür karışımlarda kür süresinin 28 gün gibi bir süreye uzatılması daha isabetli sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.
- SB ve UU deney neticelerinden elde edilen dayanımlar yakın değerler vermiştir. Uçucu kül ve çimento katkılı zeminlerin dayanım tespiti için, tek başına serbest basınç deneyinin yeterli olduğu görülmüştür. KTS'de kalite kontrolü için istenen SB deneyinde 28 günlük kür süresinin yeterli bir süre olabileceği diğer deneylerin sonuçlarıyla da desteklenmiştir.
- SB ve UU deneylerinde, % 15 katkılı matrislerde deneyin ilk anlarında dayanım hızla yükselmekte, devamında plastiklik özelliğini yitirmiş numune oldukça dik bir kayma açısıyla (90°-80°) ani olarak kırılmaktadır. Bu göçmenin haber vermeyen bir göçme olduğu için tehlikeli bir bitiş olduğu düşünülmüştür.

Zemin türleri aynı oranda katkı maddesi ile aynı iyileşmeyi göstermemektedirler. Bu nedenle ön deneyler yapılarak projede istenen dayanım için gerekli katkı oranı tespit edilmelidir. Kullanılacak zemine çeşitli oranlarda katkı maddesi karıştırılmalı ve özellikle uçucu kül ve çimento gibi katkılarla zemin iyileştirmelerinin en az 4 hafta (28 gün) süre ile

kürlendikten sonra dayanımları ölçülmeli ve davranışları tespit edilmelidir. Bu çalışmada, kür süresi arttıkça, katkı maddesi uçucu kül olan matrislerin taşıma gücünde artma, katkı maddesi çimento olan matrislerde ise azalma tespit edilmiştir. Yinede 28 gün kürlü karışımlar içinde dayanım düşmesi görülmesine rağmen bu süre sonunda çimento katkılı matrisler en yüksek CBR değerlerini vermişlerdir. Çalışmada puzolanik özelliğe sahip bağlayıcılarla stabilize edilen zeminlerde taşıma gücü değerinin kür süresi ile her zaman artmadığını, K ve KB matrisleri için katkı toplamı (kireç+uçucu kül veya kireç+çimento) %15 olduğunda, plastiklik özelliğini tamamen kaybetmeden zeminin diğer katkı oranlarına göre daha yüksek dayanım ve taşıma gücü verdiği tespit edilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Misra, A., Biswas, D. ve Upadhyaya, S., "Physico-Mechanical Behavior of Self-Cementing Class C Fly Ash-Clay Mixtures", **Fuel**, Cilt 84, No 11, 1410-1422, 2005.
2. Türker, P., Erdoğan, D., Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A., **Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri**, TÇMB, Ar-Ge Enstitüsü, Ankara, 2004.
3. <http://www.euas.gov.tr> Elektrik Üretim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü resmi web sitesi, Termik Santrallerimiz.
4. Misra, A., Upadhyaya, S. ve Biswas, D., "Utilization of Soil Stored and Poned Class C Fly Ash in Road Bases", **2003 International Ash Utilization Symposium**, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 2003.
5. ASTM C 618, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", Annual Book of ASTM Standards, 2005.
6. Cömert, A.T., Koyuncu, H. ve Fırat, S., "Uçucu Kül ile Stabilize Edilmiş Zeminlerde Kür Süresinin Taşıma Gücü Üzerine Etkileri", **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2006.
7. Lee, Seung, W. ve Fishman, K.L., "Resilient and Plastic Behavior of Classifier Tailings and Fly Ash Mixtures", **Transport Res Rec 1418**, 51-59, October 1993.
8. Chang ve Dave, Ta-Teh., "Resilient Properties and Microstructure of Modified Fly Ash-Stabilized Fine-Grained Soils", **Transport Res Rec 1486**, 88-96, 1995.
9. Yarbaşı, N., Kalkan, E. ve Akbulut, S., "Modification of the Geotechnical Properties, as Influenced by Freeze-Thaw, of Granular Soils with Waste Additives", **Cold Regions Science and Technology**, Cilt 48, 44-54, 2007.
10. Senol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, Md.S. ve Acosta, H.A., Benson, C.H., "Soft Subgrades"

- Stabilization By Using Various Fly Ashes”, **Resources, Conservation and Recycling**, Cilt 46, 365-376, 2006.
11. Okyay, U.S. and Dias, D., “Use of lime and cement treated soils as pile supported load transfer platform”, **Engineering Geology**, 114, 34-44, 2010.
  12. Ahmaruzzaman M., “A review on the utilization of fly ash”, **Progress in Energy and Combustion Science**, 36, 327-363, 2010.
  13. Day, R.W., **Geotechnical Earthquake Engineering Handbook**, McGraw-Hill, 385-392, 450, 2001.
  14. Tunç, A., **Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları**, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 253-263, 2002.
  15. TS 639/T1, “Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Nisan 1998.
  16. ASTM C618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, Annual Book of ASTM Standards, 2005.
  17. TS EN 450-1, “Uçucu Kül - Betonda Kullanılan - Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
  18. Koyuncu, H., **Stabilizasyon/Solidifikasyon Yöntemi ile İyileştirilmiş, Petrollü Sondaj Atıklarının Geoteknik, Fiziko-Kimyasal ve Mikro-Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi**, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1998
  19. TS EN 197-1, “Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Şubat 2005.
  20. TS EN 459-1, “Yapı Kireci - Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Nisan 2005.
  21. TS 1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
  22. TS 1900-2, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
  23. Karayolu Teknik Şartnamesi. Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü. Ankara, 475-478, 82-92, 2004.
  24. Koyuncu, H., Tuncan, A. ve Tuncan, M., “Sondaj Atıkların Stabilize Alt Malzemesi Olarak Kullanılması”, **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu**, 121-136, Eskişehir, 1998.

Copyright of Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University is the property of Gazi University, Faculty of Engineering & Architecture and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.