



## Düşük Plastisiteli Bir Kilde Katkı Olarak Çelikhane Curufunun Kullanılması ve Kireç ile Etkileşimi

*Using Steel Slag as Soil Additive and Interaction with Lime in a - Low Plasticity Clay*

Gamze Bilgen<sup>1\*</sup>, Aydın Kavak<sup>2</sup>, Ömer Faruk Çapar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, Zonguldak

<sup>2</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

<sup>3</sup>Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü Zonguldak

### Özet

Çelikhane curufu (Basic Oxygen Furnace Slag-BOS) çelik üretimi esnasında ortaya çıkan ve üretici fabrikalarda yüksek tonajlı bir atık olarak istiflenen bir ara malzemedir. Bu çalışmada, çelikhane curufunun killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde katkı olarak kullanımı, kireç ile etkileşimi ve en uygun karışım oranı araştırılmıştır. Bu sayede, killi zeminlerin geoteknik özelliklerinde iyileştirme sağlanırken, yüksek tonajlı endüstriyel bir atığında geri dönüşümü sağlanmış olacaktır. Çalışmada, düşük plastisiteli kil olarak, Adapazarı-Kocaeli illeri arasında bulunan Uzunçiftlik beldesinden temin edilen kil kullanılmıştır. Uzunçiftlik kiline farklı oranlarda BOS ve kireç karıştırılarak hazırlanan numunelere, kimyasal zemin stabilizasyonunda uygulanması gereken deneylerle ilgili olan ASTM D4609 standardına uygun olarak deneyler uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, Uzunçiftlik kilinin serbest basınç değeri 279 kPa'dır ve bu basınç altında %15 oranında birim şekil değiştirme yapmaktadır. Uzunçiftlik kiline ağırlıkça %3.33 oranında BOS eklenmesi halinde, serbest basınç değeri 28 gün sonunda, 960 kPa'a çıkmaktadır. %5 kireç ile hazırlanan karışımda ise serbest basınç değeri 2700 kPa'ya yükselmektedir. %5 kireç ve %3.33 BOS ile hazırlanan karışım da ise serbest basınç 4000 kPa değerine yükseltmekte ve birim şekil değiştirme oranı %2'lere düşmektedir. Aynı karışım, %6 olan yaş Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değerini 23 kat artırarak %135 değerine yükseltmektedir.

Yaptığımız çalışma, henüz endüstriyel bir atık olarak anılan çelikhane curufunun, killerin mukavemet özelliklerinde istenilen yönde artışlar meydana getirdiği ve kireç ile birlikte kullanılması durumunda çok daha etkin bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Sözcükler:** Çelikhane curufu, Kil, Zemin iyileştirme, Kireç

### Abstract

In this study, the using as an additive of steel slag ((Basic Oxygen Furnace Slag-BOS)) was investigated with the aim of improving clayey soils. In this way, while improving geotechnical properties of clayey soils, ensuring a high tonnage industrial waste recycling will be provided. Investigation of effect of BOS on the low plasticity clay, behalf of the examination of interactions with different additives was investigated in combination with powder lime. Samples were reconstituted by adding various percentages (by weight) of BOS, lime and both of them. The experiments were applied on the samples in according to the ASTM D4609 which about chemical soil stabilization. According to experimental results, at the end of the 28 days, unconfined compression (qu) value of Uzunçiftlik clay is 350 kPa and its strain is 12%. When %5 lime and %3.33 BOS were added in clay, qu value increases approximately 11 times and takes on the value 4000 kPa and the strain values of the mixture are decrease %2. Same mixture increased approximately 23 times of soaked CBR values, reached from %6 to %135.

The results of this study show that, steel slag, currently known as an industrial by-produce, caused by increases on the strength of properties of clays in the desired direction and if it is used with lime, much more effective. So, steel slag can be used as an additive on the low plasticity clayey soil.

**Keywords:** Steel slag, Clay, Soil stabilization, Lime

\*Sorumlu yazarın e-mail adresi: [bilgamze@gmail.com](mailto:bilgamze@gmail.com)

## 1. Giriş

Killi zeminler, yol çalışmaları, dolgular gibi inşaat alanlarında bulunması istenmeyen, taşıma gücü düşük, su emme kapasitesi yüksek zeminlerdir ve genel olarak zayıf zeminler olarak adlandırılırlar. Bu yüzden, bu tip zeminle karşılaşılan çalışmalarda genellikle zemin değiştirme yöntemi kullanılır. Başka bir deyişle killi zeminler buldukları yerden kaldırılır ve yerine taşıma gücü yüksek, rötre veya şişme göstermeyen (geoteknik özellikleri daha iyi olan) bir zemin getirilir. Ancak bu yöntemde iş yükü ve maliyeti artmakta ve iş süresi uzamaktadır. Ayrıca nakliye amacı ile gelip giden araçların gerek yakıt tüketimi açısından gerek egzoz salınımı açısından çevreye verdiği zararlar artmaktadır. Problemlili zeminler için başka bir çözüm yöntemi de zeminin iyileştirilmesi ve kullanılır hale getirilmesidir. Zemin iyileştirme yöntemlerinde, fiziksel yöntemlerin yanı sıra, katkı malzemesi kullanılması gibi kimyasal yöntemler de bulunmaktadır. Katkı malzemesi kullanılması, geri dönüşüm malzemeleri üzerinde çalışan pek çok araştırmacının üzerinde durduğu bir konudur. Özellikle çağımızın en büyük sorunlarından olan küresel ısınma ve bunun en önemli sebeplerinden olan atıklar ve dolayısı ile çevre kirliliği konuları da göz önüne alınarak, hem atık malzemelerin geri dönüşümü hem de zemin iyileştirme amacı ile pek çok çalışma yapılmaktadır. Zeminde katkı malzemesi olarak kullanılmak üzere, kireç, inceltmiş çimento, bakır curufu, öğütülmüş yüksek fırın curufu, uçucu kül, jips üzerine pek çok çalışma bulunmaktadır. Çalışmalarda katkı malzemelerinin kullanımı araştırılırken, farklı katkıların birlikte kullanımının etkileri de araştırılmaktadır. Örneğin, çimento-yüksek fırın curufu karışımlarının veya benzer şekilde, kireç-yüksek fırın curufu karışımlarının, zemin üzerinde ayrı ayrı kullanılmalarına kıyasla, daha olumlu sonuçlar doğurduğu rapor edilmiştir (Emery vd. 1976, Imtiaz 1993, Wild vd. 1998, Al-Rawas vd. 2002, Ahnberg 2003, Bilgen 2004, Amu vd. 2005, Saride 2010).

Geri dönüşüm amacı ile zemin stabilizasyonunda kullanılan endüstriyel atıkların, ortaya çıkışları sürekli olan ve yüksek tonajlarda meydana gelen malzemelerden seçilmesini amaca daha uygundur (Edil 2011). Örneğin, yüksek tonajlı bir atık olan yüksek fırın curufu üzerinde yapılan yoğun çalışmalar sonucu, farklı alanlarda katkı malzemesi olarak kullanımının mümkün olduğu sabitlenmiş, başka bir deyişle yapılan çalışmalar amacına ulaşmış ve malzeme bir "atık" olmak durumundan çıkıp bir "ürün" durumuna geçmiştir. Çelik üretiminde dikkat çekici bir durum söz konusudur. Şöyle ki; çelik üretiminde yüksek fırın curufu kadar büyük miktarlarda ortaya çıkan başka bir yan ürün daha vardır ki oda

"Çelikhane Curufu" (BOS) olarak adlandırılan malzeme. Basic Oxygen Furnace teknolojisi ile çelik üreten Erdemir tesislerde bir ton çelik üretiminde yaklaşık olarak 125 kg BOS curufu ortaya çıkmaktadır. Erdemir'de, yılda yaklaşık 300,000 ila 350,000 ton arasında çelikhane curufu açığa çıkmaktadır (Erdemir 2005) ve şu ana kadar çelikhane cürufunun iyileştirme amacı ile kullanımı konusunda pek çalışma bulunmamaktadır.

Öte yandan, kirecin killi zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı oldukça yaygındır hatta kireç stabilizasyonu ile ilgili pek çok el kitabı, şartname ve standartlar bulunmaktadır. Kireç stabilizasyonu, özellikle yüzeysel iyileştirme uygulamalarında kolaylığı ve ekonomik olması yaygın olarak kullanım sebeplerindedir. (Kavak vd. 2008)

Bu çalışmada çelik üretimi esnasında ortaya çıkan çelikhane cürufunun (BOS), düşük plastisiteli bir kil olan Uzunçiftlik kilinin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde katkı malzemesi olarak kullanımı, aynı zamanda kireç gibi yaygın olarak kullanılan diğer bir katkı malzemesi ile etkileşiminin belirlenmesi amacı ile yapılmıştır.

## 2. Gereç ve Yöntem

### 2.1 Uzunçiftlik Kili

Çalışmada düşük plastisiteli kil grubunu temsilen kullanılan kil, Kocaeli ve Adapazarı illeri arasında bulunan Uzunçiftlik beldesinden, yüzeyin 2-2.5 m altından alınarak temin edilmiştir. Açık sarı görünümünde, organik madde miktarı %2 dir. Geoteknik özellikler Çizelge 1 de verilen Uzunçiftlik kili, Birleştirilmiş Zemin Sınıfı

Çizelge 1: Uzunçiftlik kili endeks özellikleri

Özellikler	Uzunçiftlik
Zemin Sınıfı	
USCS ye göre	CL
AASHTO (GI) ye göre	A-7-6 (12)
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.56
Likit limit (%)	48
Plastik limit (%)	20
Plastisite İndisi (%)	28
Elek analizi - USCS	
Çakıl (%) (76.2 - 4.76 mm)	2
Kum (%) (4.76 - 0.074 mm)	9
Silt (%) (0.02 < 0.074 mm)	62
Kil (%) (< 0.02 mm)	27
Organik madde miktarı (%)	2

landırma Sistemine göre (USCS-ASTM D2487) düşük plastisiteli kil (CL) grubuna girmektedir. Amerikan karayolları sistemine göre (AASHTO T27) ise A-7-6 (12) olarak adlandırılmaktadır.

## 2.2 Kireç

Katkı olarak kullanılan kireç, piyasalara 50 kg. lık torbalarda satılan söndürülmüş toz kireçtir. Kullanılan kirecin özgül ağırlığı  $2.3 \text{ gr/cm}^3$ , organik madde miktarı %0 dır. Zemin stabilizasyonunda katkı olarak kullanılacak kireçlerin taşınması gereken özellikler, ASTM C 977-10 standardında verilmektedir. Standartta, stabilizasyonda kullanılacak kirecin kimyasal kompozisyonunda "Kalsiyum Oksit" ve "Magnezyumu Oksit" toplam miktarının %90 olması, 75 mikrondan küçük tanelerin %25 den fazla olmaması uygun görülmektedir. Çalışmada kullanılan kireç ile ilgili özellikler Çizelge 2'de görüldüğü gibi standartta istenen değerler ile örtüşmektedir ve stabilizasyon amacı ile kullanımı uygundur.

## 2.3 Çelikhane Curufu (BOS)

Çalışmada kullanılan BOS, Ereğli Demir Çelik Fabrikalarından (Erdemir) temin edilmiştir ve 75 mikrondan

Çizelge 2: Kirece ait karakteristik özellikler

Özellikler	Kireç
Fiziki Görünüş	Kuru beyaz toz
Kaynama Derecesi,(°C)	100
Ergime Derecesi,(°C)	580
Yoğunluk,(kg/m <sup>3</sup> )	Max. 500
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1.2 - 1.5
(>90 µm),(%)	3 - 6
(>63 µm),(%)	7 - 10
pH,(25°C)	12.4
Ca(OH) <sub>2</sub> ,( %)	80 - 86
Aktif CaO,(%)	60.6 - 65.15
CaO + MgO,( %)	90 - 93
MgO	1 - 2
Çözünemeyen Madde,(%)	Max. 1
Sınırlı H <sub>2</sub> O	19.4 - 20.85
S	Max. 0.5
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ),(%)	Max. 1

Çizelge 3: Çelikhane Curufu (BOS)'a ait kimyasal analiz

Element	Fe	SiO <sub>2</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
%	20.49	13.30	2.70	5.02	46.57	5.25	0.02	0.32	0.14	0.17	0.47

küçük olacak şekilde öğütülerek kullanılmıştır. Kullanılan BOS' un özgül ağırlığı  $3 \text{ gr/cm}^3$ , organik madde miktarı %0 dır. BOS a ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3 de verildiği gibidir.

BOS, oksit ve silikatların oluşturduğu karmaşık bir kimyasal yapıya sahip, metalik olmayan yan ürünler olarak tanımlanmaktadır. Fiziksel olarak çelik curufları koyu gri renkte, kübik şekilli, yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahiptirler. Yüksek fırın curufuna kıyasla çok sert ve sıkıdırlar. (Erdemir 2005)

## 2.4 Yöntem

Çalışmada Uzunçiftlik kiline farklı oranlarda kireç ve BOS karıştırılarak numuneler hazırlanmış ve bu numuneler, kimyasal zemin stabilizasyonunda uygulanması gereken deneylerle ilgili olan ASTM D4609 standardına uygun olarak, deneylere tabii tutulmuştur. Karışım oranlarının belirlenmesinde standartlar ve literatür çalışmaları göz önüne alınmıştır. Nitekim kilerde katkı olarak en uygun kireç oranının belirlenmesinde ASTM C977 nolu standart, asitik denge (pH) yöntemi önermektedir. Standartta 12,4 değerini veren oranın en uygun kireç oranı olduğu ve genelde %2ila %6 arasındaki değerlerin bu değeri verdiği vurgulanmaktadır. Literatürde, kireç stabilizasyonu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde kireç oranının genelde %5 civarlarında kullanıldığı gözlenmiştir (Veith 2000, Eren vd. 2009). Bu sebeple Uzunçiftlik kiline ilk olarak pH deneyi uygulanmış ve en uygun kireç oranı tespit edilmiştir. Çizelge 4'de görüldüğü gibi 12,4 olan en uygun pH değerini veren kireç miktarı %5 dir.

Yüksek fırın curufu ile zemin stabilizasyonu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, kireç ve yüksek fırın curufu oranlarının (1:1.5) olmasının en iyi değerleri verdiği görülmüştür (Bilgen 2004, Kavak vd. 2007, Kavak vd. 2009). Bilgen ve Kavak,2011 de yapılan bir çalışmada %4 kireç ve %2.66 BOS ve %4 kireç %6 BOS ile karıştırılan kil standart Proctor enerjisi ile sıkıştırılarak deneylere tabii tutulmuştur ve kireç oranının değiştirilerek ve farklı enerji seviyelerinde de denemeler yapılması gerekliliği rapor edilmiştir. Literatürde bulunan bu veriler doğrultusunda, çelikhane curufu-kireç karışımlarının hazırlanmasında (1:1.5) oranı kullanılarak 7 farklı karışım hazırlanmıştır.

Hazırlanan karışımlarda, kireç miktarı %4 ve %5 olarak seçilmiş ve BOS miktarları seçilen kireç miktarının ağırlıkça 1.5 kat altında ve 1.5 kat üstünde olacak şekilde

düzenlenmiştir. Hazırlanan karışım numunelerinin kodlanmasında, ilk olarak kireç miktarları, daha sonra curuf miktarları verilmiştir.

Çizelge 5’de içerikleri ve kodları verilen karışımlara, kıvam limitleri deneyleri (ASTM 4318) uygulanmıştır. Daha sonra, modifiye kompaksiyon deneyi (ASTM D1557) ile optimum su muhtevaları ve en büyük kuru birim hacim ağırlığı değerleri belirlenmiş ve elde edilen optimum su muhtevalarında serbest basınç deneyi (ASTM D2166) için numuneler hazırlanmıştır. Numunenin hazırlandığı gün (0. gün), 1 gün sonra, 7 gün sonra ve 28 gün sonra kırılmak üzere her bir karışımdan her gün için en az üçer tane olacak şekilde toplamda 84 adet numune hazırlanmıştır. Kür aşamasında numuneler

Çizelge 4: pH deneyi sonuçları

Kireç Miktarı (%)	Uzunçiftlik Kili	
	Sıcaklık (°C)	pH
0	24.5	8.3
2	25.6	11.8
3	24.5	12.27
4	25.4	12.34
5	25.4	12.40
6	25.7	12.44
7	24.4	12.46
8	25.3	12.48
9	24.3	12.51
10	24	12.59

Çizelge 5: Çalışmada kullanılan karışımlar

No	Karışım İçeriği	Karışım Simgesi
1	%0 Kireç + %0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu	U
4	%0 Kireç + %3.33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu	U0-3
5	%5 Kireç + %0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu	U5-0
2	%4 Kireç + %2.66 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu	U4-2
3	%4 Kireç + %6 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu	U4-6
6	%5 Kireç + %3.33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu	U5-3
7	%5 Kireç + %7.5 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu	U5-7

Çizelge 6: Atterberg limitleri değerleri

	U	U0-3	U5-0	U4-2	U4-6	U5-3	U5-7
LL (%)	48	42	43	38	38	38	43
PL (%)	20	14	28	28	29	29	27
PI	28	28	15	10	9	9	16

önce poşete sonra alüminyum folyoya sarılarak 21°C ±3 sıcaklığında ve %95 rutubetli bir ortamda muhafaza edilmiştir. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi (ASTM D1883 - 07e2) için hazırlanan numuneler, deney uygulanmadan önce, 24 gün kür ortamında bekletildikten sonra, 4 gün de su havuzunda bekletilerek 28 günlük yaş CBR değerleri elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan su Erdemir Araştırma Laboratuvarında, kil numunelerine ait XRD ve SEM analizleri de Marmara Tubitak Araştırma merkezinde analiz ettirilmiştir.

### 3. Sonuçlar

#### 3.1 Kıvam limitleri

Karışımlara ait kıvam limitleri değerleri Çizelge 6’da görülmektedir. Literatürde bulunan bazı görüşlere göre, bir zeminin doğal su içeriğinin, likit limit (LL), plastik limit (PL) ve plastisite indisi (PI) değerinin bilinmesi, onun taşıma gücü hakkında fikir sahibi olmamız için yeterlidir ve killerde plastisite indisinin az olması tercih edilen bir durumdur. (Skempton ve Northey 1953, Wroth ve Wood 1978, White 1982, Sivapullaiah vd. 2000).

Yapılan deney sonuçlarına göre, %3.33 oranında kullanılan BOS, plastisite bir değişiklik yaratmamaktadır ve “Birleştirilmiş zemin sınıflandırma”(USCS) sistemine göre düşük “plastisiteli kil” (CL) olan Uzunçiftlik kil, yine aynı sınıfta kalmaktadır. Fakat %5 kireç 28 olan plastisite değerini 15, %5kireç ve %3.33 BOS kullanılan karışım da ise 9 değerine düşmektedir ve karışımın zemin sınıfı “siltli kil” (ML) olarak değiştirmektedir. %5 kireç %7.5 BOS kullanılan karışımda ise PI değeri katkısız hale göre düşük olmakla birlikte diğer karışımlara göre daha yüksek bir PI değeri vermektedir. Bu değerler

karışım oranlarında bir optimizasyon olduğu fikrini oluşturmaktadır. Kıvam limitleri değerlerine göre karışımların Atterberg çarkındaki yerlerini gösteren durum Şekil 1’de verilmiştir.

### 3.2 Kompaksiyon

Karışımlara ait optimum su içerikleri ve en büyük kuru birim hacim ağırlıkları, Çizelge 7’de verilmektedir. BOS düşük plastisiteli killerde optimum su muhtevasında bir değişikliğe yol açmamıştır.

Kuru birim hacim ağırlığını da etkilememektedir. Kireç BOS karışımlarında da optimum su muhtevalarındaki değişimde yok denecek kadar azdır. Şekil 2 de karışımlara ait kompaksiyon deney sonuçları görülmektedir.

### 3.3 Serbest Basınç

Uzunçiftlik kilinin 0 günlük serbest basınç değeri Şekil 3 de görüldüğü gibi 279 kPa dır ve bu basınç altında %15 lik bir birim şekil değiştirme yapmaktadır. Uygulanan fiziksel iyileştirme sebebi ile 28 gün sonunda değer 350 kPa’ a yükselmektedir. Görüldüğü gibi BOS ve kireç katkıları, Uzunçiftlik kiline gün birim şekil değiştirmede azalma ve serbest basınç değerinde artma meydana getirmektedir. Şekil 4’de görüldüğü üzere, Uzunçiftlik killine %3.33 oranında BOS eklendiğinde, 28 gün sonunda serbest basınç değeri 960 kPa, %5 kireç eklendiğinde ise serbest basınç değeri 2700 kPa değerine yükselmektedir. %5 kireç ve %3.33 BOS birlikte eklendiğinde ise serbest basınç değeri 28 sonunda 4000 kPa değerine yükseltmektedir. Birim şekil değiştirme miktarı ise %2’ye düşmektedir. Ancak %5 kireç ve %7.5 BOS eklenerek hazırlanan karışımda ise serbest basınç değerinin 2900 kPa olduğu görülmektedir.

Şekil 5’te görüldüğü gibi, kireç ve BOS un birlikte kullanımında, kireç ve BOS miktarının artırılması serbest basınç değerinde ilk önce bir artışa daha sonra azalmalara sebep olmaktadır. O halde düşük plastisiteli killerde iyileştirme amacı ile kireç ve BOS kullanımında bir opti-

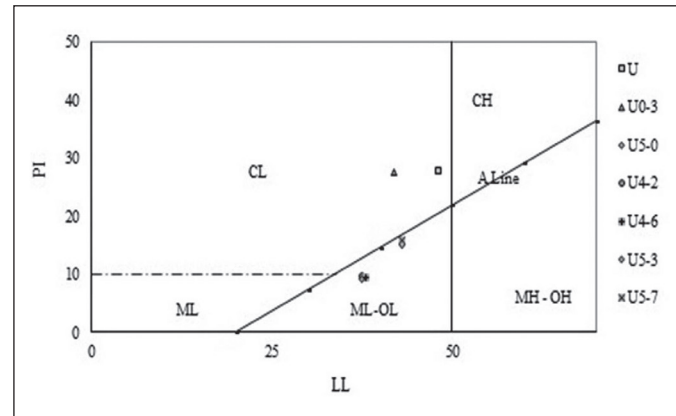
Çizelge 7: Kompaksiyon sonuçları

Karışım Simgesi	Opt. Su Muh. (%)	En Büyük Kuru Birim Hacim Ağ. (kN/m <sup>3</sup> )
U	17.0	18.1
U0-3	17.0	18.1
U5-0	17.6	17.0
U4-2	16.0	17.3
U4-6	16.0	17.6
U5-3	16.0	17.6
U5-7	17.0	17.6

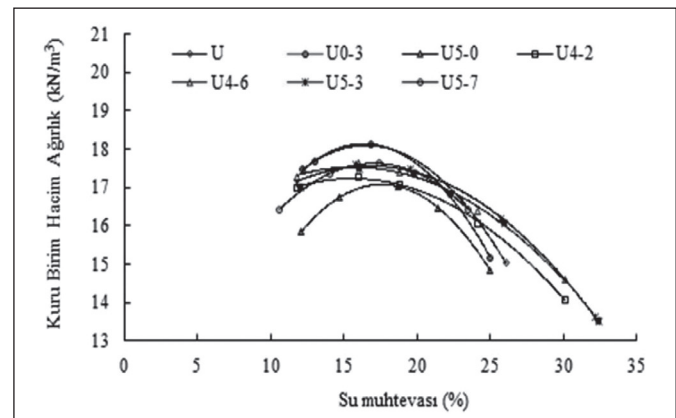
mum oran söz konusudur. Elde edilen deney sonuçları, düşük plastisiteli bir kil olan Uzunçiftlik kilinde, en yüksek serbest basınç değerini veren karışım oranı %5 kireç ve %3.33 BOS olduğunu göstermektedir.

### 3.4 Kaliforniya taşıma oranı (CBR)

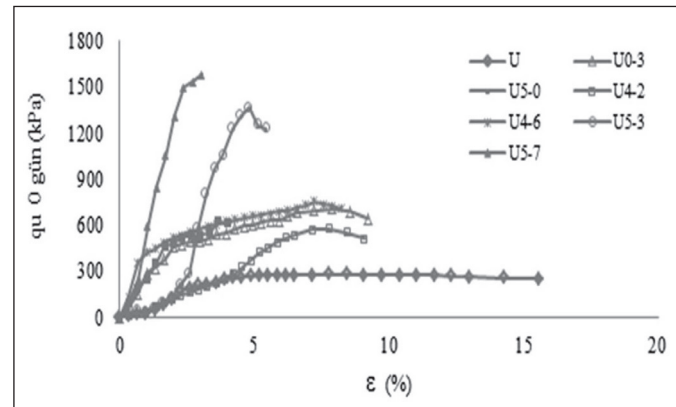
CBR oranı, özellikle yol yapımında kullanılacak olan malzemelerin uygunluğunun belirlenmesinde kullanılan, bir deneydir (Bowles, 1970). Yol altyapısı üstten



Şekil 1: Karışımların Atterberg grafiğindeki yerleri.



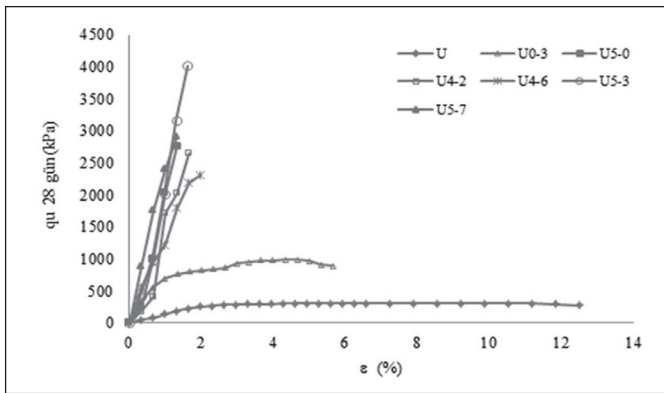
Şekil 2: Karışımların kompaksiyon eğrileri.



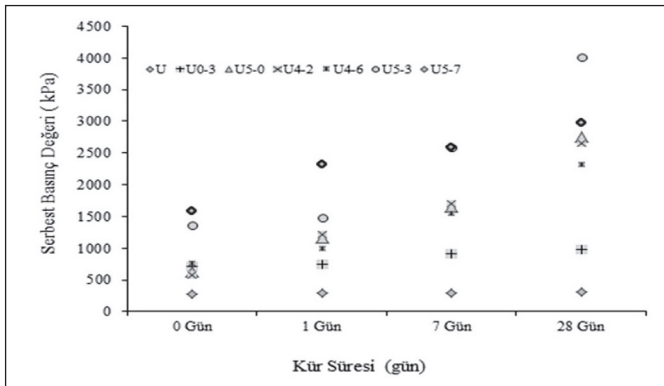
Şekil 3: Karışımların 0 günlük gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri.

aşağı doğru “temel”, “alt temel”, “yol altyapısı zemini” şeklinde tabakalardan meydana gelir. CBR değeri %0 ila %3 arasında olan zeminler çok zayıf zemin, %3-%7 arası zeminler zayıf zemin olarak adlandırılırlar. Yol yapımında alt temel malzemesi olarak kullanılacak zeminlerin en az %7-%20 CBR değerine sahip olması gerekmektedir. (Eren ve Filiz 2009).

Uzunçiftlik kilinin 28 günlük CBR değeri şekil 6 da görüldüğü üzere 6 dır. Bu değer, alt temel malzemesi olarak kullanılmayacak kadar düşük bir değerdir. %3.33 oranında BOS ile karıştırılmış olan Uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 21’dir. %5 kireç ve %3.33 oranında BOS ile karıştırılmış olan Uzunçiftlik kilinin, 28 günlük



Şekil 4: 28 günlük gerilme- birim şekil değiştirme eğrileri.



Şekil 5: Karışımların serbest basınç değerleri.

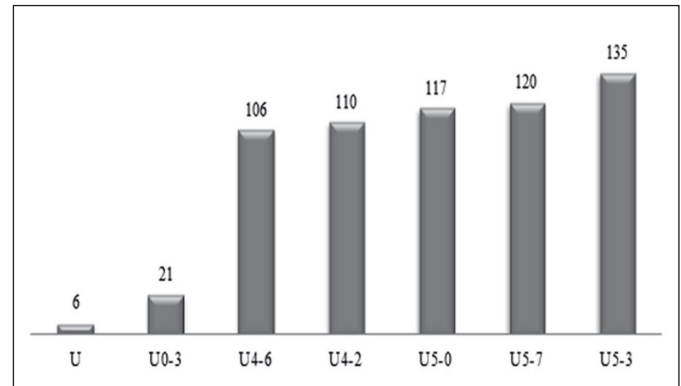
CBR değeri yaklaşık 23 kat artarak 135'e ulaşmaktadır. Bu CBR değeri, yol yapımında rahatlıkla kullanılabilir anlamına gelmektedir. Öte yandan dikkat çeken başka bir konu, %5 kireç ve %7.5 BOS ile karıştırılmış olan Uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 135'in altında kalmış ve 120 değerini almıştır.

### 3.5 XRD analizleri ve SEM görüntüleri

Tüm karışımlarının içeriğinde; kuvars, (SiO<sub>2</sub>), Kalsit, (CaCO<sub>3</sub>), Illite, ((K,H<sub>3</sub>O)Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>), Clinohlore, ((Mg,Fe)<sub>6</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>), Montmorillonite, (Ca<sub>0.2</sub>(Al,Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>4H<sub>2</sub>O) bulunmaktadır. Uzunçiftlik kilinin yapısında sodyum (Na) ve magnezyum (Mg) ve potasyum (K) bulunmaktadır. Na ve K bilindiği gibi alkali metallerdir; kolaylıkla eriyebilen, tepkimeleerde etkin elementlerdir ve suyla etkileşimleri çok güçlüdür.

Çizelge 8' de görüldüğü üzere, Uzunçiftlik kilinde BOS, kireç veya her ikisinde kullanıldığı durumlarda sodyum elementine rastlanmamaktadır. Magnezyum elementi sadece kireç kullanılması durumunda görülmezken kireç ve BOS un birlikte kullanılması durumunda tekrar göze çarpmaktadır.

Alüminyum miktarı sadece kireç kullanılması durumunda yarı miktara inerken cürufla birlikte kullanılması durumunda %60 civarında bir artış göstermektedir.



Şekil 6: Karışımların 28 günlük CBR değerleri.

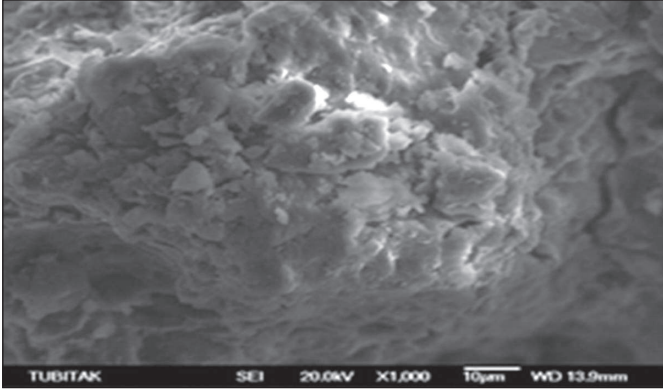
Çizelge 8: Karışımların içeriğinde bulunan elementlerin atomik ağırlıkça % değerleri

Element / Karışım	Atomik %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
U		63.63	2.39	0.68	7.66	21.17	0.80	2.22		1.45
U0-3	5.54	64.88		2.29	4.23	16.04	0.42	4.12	0.32	2.16
U5-0		66.00			3.01	25.49	0.54	2.75		2.20
U5-3		58.73		0.83	13.51	20.32	4.59	0.91		1.11
U5-7		69.10		0.61	4.74	18.30	0.42	5.06	0.20	1.59

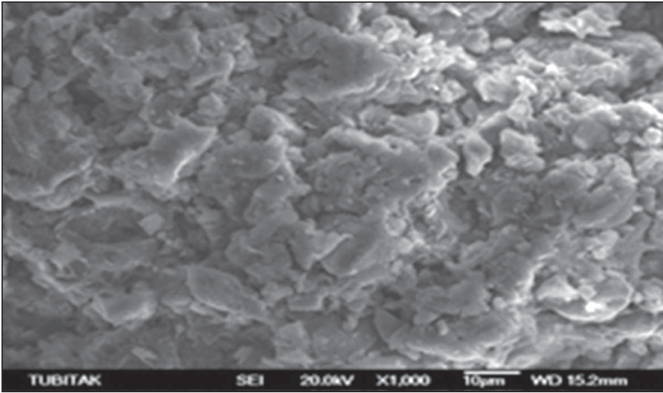
Potasyum miktarı sadece kireç kullanıldığında azalırken, kireç-BOS kullanıldığında yaklaşık 6 kat artmaktadır.

Katkıların birlikte kullanılması durumunda, kalsiyum miktarında azalma meydana gelmektedir. BOS yalnız kullanıldığında karbon elementi görülmekte, ancak kireç ile birlikte kullanıldığında karbona rastlanmamaktadır.

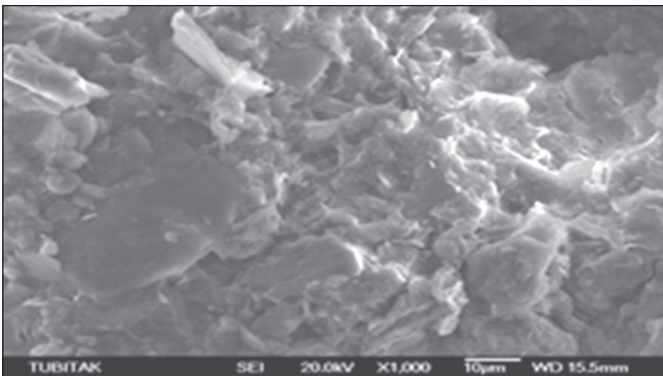
Şekil 7’de görülen Uzunçiftlik kiline ait fotoğrafta toprak halinde bulunduğu ve büyük yarıkların olduğu görülmektedir. Şekil 8’de BOS ile hazırlanan karışımda Uzun-



Şekil 7: U numunesine ait 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



Şekil 8: U0-3 numunesine ait 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



Şekil 9: U5-0 numunesine ait 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

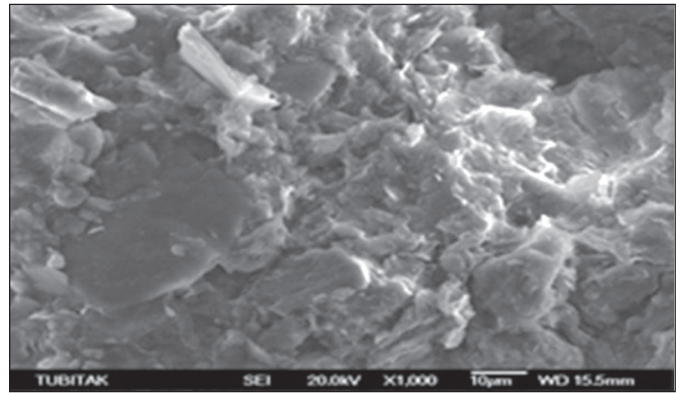
çiftlik kiline göre daha homojen bir yapı görülmektedir. Şekil 9’da kireç ile hazırlanan karışım, Şekil 10’da %5 kireç ve %3.33 BOS ile hazırlanan, Şekil 11’de ise %5 kireç ve %7.5 BOS ile hazırlanan karışıma ait SEM görüntüsü bulunmaktadır.

## 5. Tartışma

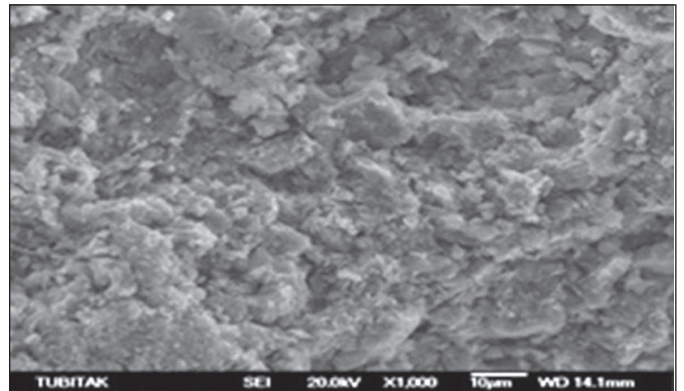
BOS düşük plastisiteli killerin plastisitesinde önemli bir değişikliğe yol açmamaktadır. Ancak kireç ile birlikte kullanıldığında plastisite üzerinde farklı etkiler göstermektedir. Ağırlıkça, %5 kireç ve %3.33 BOS ile karıştırılan kilde plastisite 28 den 9 a düşmektedir. Ancak kireç oranı %5 olarak tutulup, BOS oranı %7.5 değerine yükseldiğinde plastisite tekrar yükselmektedir.

BOS, düşük plastisiteli killerin optimum su muhtevasında önemli bir değişikliğe yol açmamaktadır. Kireç ile birlikte kullanılması durumunda da çok farklı sonuçlar meydana gelmemektedir.

BOS, düşük plastisiteli killerin serbest basınç değerinde 28 gün sonunda yaklaşık 2 katı aşkın bir artış sağlamaktadır. Ancak %5 kireç ve %3.33 BOS birlikte kullanıldığında serbest basınç mukavemeti 11 katı artmakta ve 4000 kPa değerine yükselmektedir. Bu oranda hazırlanan



Şekil 10: U5-3 numunesine ait 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



Şekil 11: U5-7 numunesine ait 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

karışımlarda birim şekil değiştirme miktarı %15 den %2 ye düşmektedir. Ancak, kireç oranı %5 olarak tutulup, BOS oranı %7.5 değerine yükseldiğinde serbest basınç değeri 3000 kPa değerini almaktadır.

Düşük plastisiteli kilin, katkısız halde 28 günlük yaş CBR değeri %6, %3.33 BOS ile karıştırıldığında 3 kat artarak %21 değerini almaktadır. %5 kireç ve %3.33 oranında BOS ile karıştırıldığında bu değer yaklaşık 23 kat artarak %135'e ulaşmaktadır. Ancak, kireç oranı %5 olarak tutulup, BOS oranı %7.5 değerine yükseldiğinde yaş CBR değeri %120 değerini almaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar, çelikhane curufunun, düşük plastisiteli killerin geoteknik özelliklerinde iyileşme meydana getirdiğini göstermektedir. Kireç ile birlikte kullanımında çok daha müspet sonuçlar doğurmaktadır.

Çelikhane curufu ile kirecin, düşük plastisiteli killerde kullanımında en iyi sonuçları alabilmek için karışım oranlarının doğru seçilmesi önemlidir. Bu oranların seçiminde ilk olarak, kullanılacak kil için ASTM C977 standardına göre en uygun kireç miktarı belirlenmeli daha sonra bu değer %66 sı kadar çelikhane curufu eklenmelidir. Başka bir deyişle 1.5 birim kireç için 1 birim BOS kullanılmalıdır.

Yaptığımız çalışma göstermektedir ki, henüz bir atık olarak adlandırılan ve sabitlenmiş bir kullanım alanı bulunmayan çelikhane curufunun, düşük plastisiteli killerde özellikle kireç ile birlikte katkı malzemesi olarak kullanıma uygundur.

Bu çalışma düşük plastisiteli bir kil üzerinde yapılmıştır. Çelikhane curufunun farklı plastisiteli killer üzerindeki etkisinin de incelenmesi çalışmanın ilerletilmesine yardımcı olacaktır.

## 6. Kaynaklar

- ASTM C977-10, 2010.** Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization. *American Test Methods Standards*.
- ASTM D 4609-01, 2001.** Standard Guide for Evaluating Effectiveness of Admixtures for Soil Stabilization. *American Test Methods Standards*.
- ASTM D1557-09, 2009.** Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Modified Effort. *American Test Methods Standards*.
- ASTM D1883-07, 2006.** Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. *American Test Methods Standards*.
- ASTM D2166-06, 2006.** Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *American Test Methods Standards*.
- ASTM D2487, 2000.** Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *American Test Methods Standards*.
- ASTM D4318-05, 2010.** Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *American Test Methods Standards*.
- Ahnberg, H., Johansson, SE., Pihl, H., Carlsson, T. 2003.** Stabilizing effects of different binders in some Swedish soils. *Ground Improv.*, 7(1): 9-23.
- Al-Rawas, A., Taha R., Nelson, JD., Al-Shab, TB., Al-Siyabi, H. 2002.** A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils. *ASTM Geotech. Test. J.*, 25(2): 199-209.
- Amu, OO., Adewumi, IK., Ayodele, AL., Mustapha, RA. 2005.** Analysis of California bearing ratio values of lime and wood ash stabilized lateritic soil. *J. Appl. Sci.*, 5(8): 147-1483.
- Bilgen, G. 2004.** Yüksek fırın curufu ve kireçle zemin stabilizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, 150 s.
- Bilgen G., Kavak A. 2011.** Düşük Plastisiteli Kilde Katkı Olarak Kireç ve Çelikhane Curufunun Kullanımı. 4. *Geoteknik Sempozyumu*, s. 429-436, Adana.
- Edil TB. 2011.** Sürdürülebilir geoteknik inşaata yaklaşım. 4. *Geoteknik Sempozyumu*, s. 56-65, Adana.
- Emery, JJ., Kim, CS., Cotsworth, RP. 1976.** Base Stabilization using pelletized blast furnace slag. *J. Test. Eval.*, 4(1): 94-100.
- Erdemir, AR-GE Raporu 2005.** Çelik üretim curuflarının asfalt üretiminde kullanılması. Ereğli Demir Çelik Fabrikası.
- Eren, S., Filiz M. 2009.** Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material. *Constr. Build. Mater.*, 23, pp. 2473-2480.
- Imtiaz, A. 1993.** Use of Waste Materials In Highway Construction. United States of America by Noyes Data Corporation, New Jersey, pp. 125
- Kavak, A, Güngör G., Avşar C., Atbaş B., Akyarlı, A. 2008.** Bölünmüş yol çalışmalarında bir kireç stabilizasyonu uygulaması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği, Onikinci Ulusal Kongresi*, Konya.
- Kavak, A., Akyarlı, A. 2007.** A field application for lime stabilization. *Environ. Geol.*, 51(6): 987-997.
- Kavak, A., Çapar, ÖF., Bilgen, G. 2009.** Problemler bir kilin kireç ve yüksek fırın curufu katkısı ile iyileştirilerek yol dolgularında kullanılması. 14. *Ulusal Kil Sempozyumu*, Trabzon.
- Saride, S., Puppala AJ., Williammee R. 2010.** Assessing recycled/secondary materials as pavement bases. *Proceed. Inst. Civil Eng. Ground Improv.*, 163: 3-12.
- Sivapullaiah, PV., Sridharan, A., Bhaskar R. 2000.** Role of amount and type of clay in the lime stabilization of soils. *Ground Improv.*, 4: 37- 45.



- Skempton, AW., Northey, RD. 1953.** The sensitivity of clays. *Geotechnique*, 3:1, pp. 30-53.
- Veith, G. 2000.** Essay competition: Green, ground and great: soil stabilization with slag. *Build. Res. Inf.*, 28(1): 70-72.
- White, IL. 1982.** Soil plasticity and strength—a new approach using extrusion. *Ground Engineering*, 15:1, pp. 16-24.
- Wild S., Kinuthia JM., Jones GI., Higgins DD. 1998.** Effects of partial substitution of lime ground granulated blast furnace slag GGBS on the strength properties of lime stabilized sulphate-bearing clay soils. *Eng. Geol.*, 51(1): 37-53.
- Wroth, CP., Wood, DM. 1978.** The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canad. Geotech. J.*, 15(2): 137- 44.