

# Investigation of Stabilization of Clay Soil with Blast Furnace Slag and Fly Ash

**Arzu OKUCU**

Balıkesir University, Department of Civil Engineering, Balıkesir, Türkiye

**Tuğba Bilge GÜNDÜZ**

Seyrantepe Mah. Altınay Çaltı İş Merkezi No:29/6 Kağıthane İstanbul, Türkiye

## Abstract

In this study, the stabilization of clay soil with blast furnace slag and additionally fly ash was examined. For this purpose, blast furnace slag, blast furnace slag+fly ash were added to bentonite clay as additives. In the study, additive samples were prepared by adding 0, 5, 10, 15% additives to bentonite clay. Hydrometer, specific density, liquid limit, plastic limit, compaction, and unconfined pressure tests were performed on homogeneously mixed additive samples. As a result of experimental studies, it is thought that waste materials such as blast furnace slag and fly ash can be used as stabilization materials in ch class high plasticity clay soils and thus contribute to the economy and reduce environmental pollution.

**Keywords:** Stabilization, Bentonitr, Blast Furnace Slag, Fly Ash

# Kil Zeminin Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül ile Stabilizasyonunun Araştırılması

**Arzu OKUCU**

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Balıkesir, Türkiye

**Tuğba Bilge GÜNDÜZ**

Seyrantepe Mah. Altınay Çaltı İş Merkezi No:29/6 Kağıthane İstanbul, Türkiye

## Özet

Bu çalışmada kil zeminin yüksek fırın cürufu ile ve buna ilave olarak uçucu kül katılarak stabilizasyonu araştırılmıştır. Bu amaçla bentonit kiline katkı olarak yüksek fırın cürufu, yüksek fırın cürufu+uçucu kül katılmıştır. Çalışmada bentonit kiline %0, 5, 10, 15 oranlarında katkılar katılarak, katkılı numuneler hazırlanmıştır. Homojen olarak karıştırılan katkılı numuneler üzerinde hidrometre, özgül yoğunluk, likit limit, plastik limit, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda, CH sınıfı yüksek plastisiteli killi zeminlerde atık malzeme olan yüksek fırın cürufu ve uçucu külün stabilizasyon malzemesi olarak değerlendirilebileceği ve bu sayede ekonomiye ve çevre kirliliğine katkı sağlanabileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Stabilizasyon, Bentonit, Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül

## 1.GİRİŞ

Zemin stabilizasyonu genel olarak zemini daha stabil hale getirmek için, zeminin olumsuz özelliklerini düzeltmek amacıyla yapılan işlemlerdir. Zeminin olumsuz özelliklerini gidermek amacıyla kireç, uçucu kül, çimento vb. katkı malzemeleri katarak yapılan iyileştirme kimyasal stabilizasyondur [1]. Yüksek fırın cürufu çelik üretiminden sonra çıkan bir atık malzemedir. Her üretilen 1 ton çelikten 300 kg cüruf oluşmaktadır. Yüksek fırın cürufunun aslında atık malzeme olarak adlandırılmasının ana sebeplerinden biri zemin güçlendirici olarak kullanılmasıdır. Yüksek fırın cürufu yapı olarak çimentoyla benzer özellik taşımaktadır, puzolanik bir malzemedir. Bu sebepten dolayı yüksek fırın cürufu iyileştirme katığı olarak kullanılabilir [2, 3].

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek amacıyla yakıt olarak kullanılan öğütülmüş kömür, yanma sonucu atık olarak farklı tiplerde kül ve cüruf ortaya çıkarmaktadır. Uçucu küllerin yanı sıra, taban külü olarak adlandırılan, gazlarla birlikte yükselemeyen ve yanma sonucu fırın tabanında biriken küllerle birlikte bir miktar da cüruf oluşabilmektedir. Ortaya çıkan atık malzemenin yaklaşık %75-80'ini uçucu küller oluşturmaktadır [25]. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri kullanılan kömürün mineral tipi ve miktarına bağlıdır. Genellikle uçucu küllerin %85'ini  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  ve  $MgO$  oluşturmaktadır [26]. Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu atıklar, puzolan olmaları nedeniyle hem çimento hem de beton üretiminde katkı ve ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bilindiği gibi Türkiye, elektrik enerjisinin yarıya yakını termik santrallerde üretmektedir. Bu üretim sırasında termik santrallerin bacalarından elde edilen atık UK miktarı, 13,5 milyon ton/yıl dolayındadır [24]. ASTM C 618'e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denir. [4]

## 2. METARYAL VE METOD

Bu çalışmanın amacı zemin stabilizasyonunda yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanım olanaklarının araştırılmasıdır. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Ereğli Demir Çelik (Erdemir) fabrikasından elde edilmiş ve öğütülerek boyutu 150 mikronun altına indirilmiştir. Çalışmada kullanılan uçucu kül Gürler Beton'dan alınmıştır. Gürler Beton da Kütahya Çimento A.Ş.'den temin etmektedir. Kullanılan uçucu kül Seyitömer termik santralinde üretilmiştir. Seyitömer uçucu külünün düşük kireçli ( $CaO < \%10$ ), silikoaluminöz bir uçucu kül (ENV 197-1'e göre V sınıfı) olduğu görülmektedir. Ayrıca linyit kömürünün yakılmasıyla elde edildiğinden, ASTM C-618 C sınıfı uçucu küldür. Tablo 1'de yüksek fırın cürufunun ve uçucu külün analiz raporu verilmiştir.

Tablo 1. Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Külün Analiz Raporu

	YFC	UK
Özellik	(%)	(%)
$SiO_2$ (%)	37.38	53.14
$Fe_2O_3$ (%)	0.93	11.36
$Al_2O_3$ (%)	16.00	20.77
$CaO$ (%)	37.22	4.44
$MgO$ (%)	5.98	1.19
$SO_3$ (%)	2.12	0.98
Kızdırma Kaybı (%)	5.38	2.26
Özgül Yoğunluk	2.85	2.225

Çalışmada bentonit kiline %0, 5, 10, 15 oranlarında yüksek fırın cürufu (YFC) ve bu oranlarda uçucu kül (UK) de ilave edilerek katkılı numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan 7 farklı numune ve katkı oranları Tablo 2’de verilmektedir. Hazırlanan katkı numuneler üzerinde özgül yoğunluk, hidrometre, likit limit, plastik limit, kompaksiyon, günlük-7günlük-28günlük serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır [5, 6, 7, 8]. Deney sonuçlarına göre numunelerin zemin sınıfı, özgül yoğunlukları, plastisite indisi, maksimum kuru birim hacim ağırlığı, optimum su içeriği ve serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan bentonit kilinin kimyasal ve geoteknik özellikleri Tablo 3 ve 4’ te verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan Katkı Oranları

Numune No	Katkılı Numuneler
1	%100 Kil
2	%100 Kil + %5YFC
3	%100 Kil + %10YFC
4	%100 Kil + %15YFC
5	%100 Kil + %5YFC + %5UK
6	%100 Kil + %10YFC + %10UK
7	%100 Kil + %15YFC + %15UK

Tablo 3. Bentonit Kilinin Kimyasal Özellikleri

Özellik	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
(%)	20	1.4	1.9	4.5	3.2	0.55	0.12	59.5

Tablo 4. Bentonit Kilinin Geoteknik Özellikleri

Geoteknik Özellikleri	Deney Sonuçları
Silt (%)	48.48
Kil (%)	51.52
Likit Limit (w <sub>L</sub> ) (%)	113.18
Plastik Limit (wp) (%)	44.10
Plastisite İndisi (PI) (%)	69.08
Özgül Yoğunluk (Gs)	2.82
Zemin Sınıfı (TS 1500)	CH
Optimum Su Muhtevası (w <sub>opt</sub> ) (%)	49
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ <sub>kmaks</sub> ) (kN/m <sup>3</sup> )	10.90
Serbest Basınç Deneyi Kayma Dayanımı q <sub>u</sub> (Günlük) (kPa)	61.10
Serbest Basınç Deneyi Kayma Dayanımı q <sub>u</sub> (7 Gün Kürlü) (kPa)	527.91
Serbest Basınç Deneyi Kayma Dayanımı q <sub>u</sub> (28 Gün Kürlü) (kPa)	594.50

## 2.1. Hazırlanan Zemin Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları

Hazırlanan katkılı numuneler üzerinde özgül yoğunluk ( $G_s$ ), hidrometre, likit limit ( $w_L$ ), plastik limit ( $w_p$ ), kompaksiyon, günlük-7günlük-28günlük serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyi için karışımlar optimum su içeriği değerlerinde hazırlanmış ve normal şartlarda küre bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre numunelerin zemin sınıfı, özgül yoğunluğu, plastisite indisi ( $I_p$ ), maksimum kuru birim hacim ağırlığı ( $\gamma_{kmax}$ ), optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) ve serbest basınç dayanımları ( $q_u$ ) belirlenmiş ve deney sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur. Zemin sınıfları TS 1500'e göre belirlenmiştir.

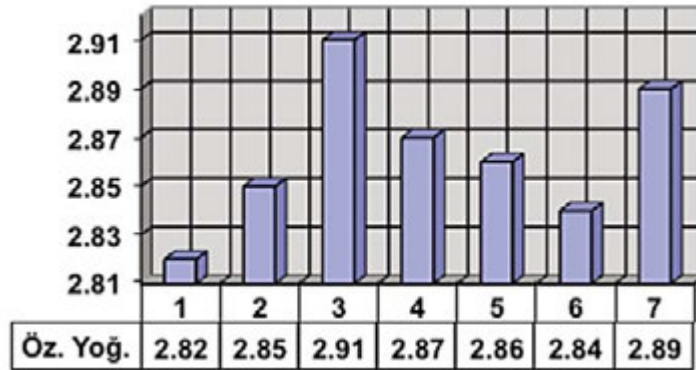
Tablo 5. Deney Sonuçları

Numune No	Zemin Sınıfı	$G_s$	$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	PI (%)	$\gamma_{kmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)	$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )		
								Günlük	7 Günlük	28 Günlük
1	CH	2.82	113.18	44.10	69.08	10.90	49.0	61.09	527.91	594.50
2	CH	2.85	91.22	37.50	53.72	11.79	41.7	172.01	580.08	700.61
3	CH	2.91	90.74	46.20	44.54	13.40	30.6	176.53	597.54	921.56
4	CH	2.87	121.23	53.19	68.04	13.14	38.0	173.58	465.44	954.71
5	CH	2.86	115.31	46.40	68.91	11.38	43.2	118.27	604.79	1042.29
6	CH	2.84	104.51	48.00	56.51	11.24	45.2	78.75	501.82	1014.53
7	CH	2.89	92.69	42.90	49.79	11.66	45.0	94.44	777.31	1112.80

## 3. DEĞERLENDİRME

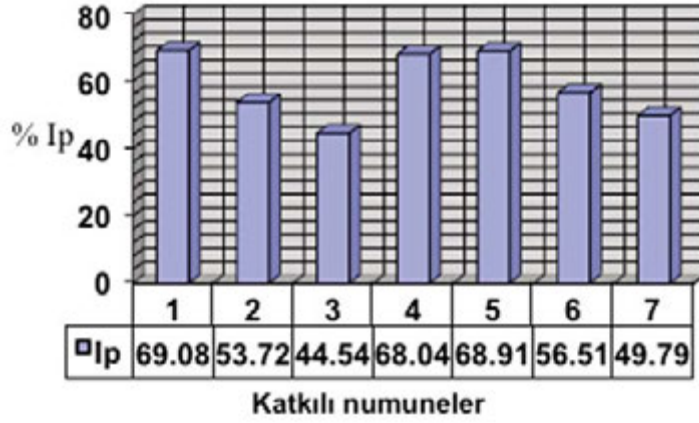
Hazırlanan katkılı numunelerin Tablo 5 te verilen deney sonuçlarına göre aşağıda verilen grafikler çizilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

**Özgül yoğunluk deney sonuçları:** %100 kile göre YFC ve YFC+UK katkılı numunelerin özgül yoğunluklarında büyük artış gözlenmemiştir. En yüksek değer %100Kil+%10YFC karışımında bulunmuştur (Şekil 1). Bu yükselmenin YFC kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



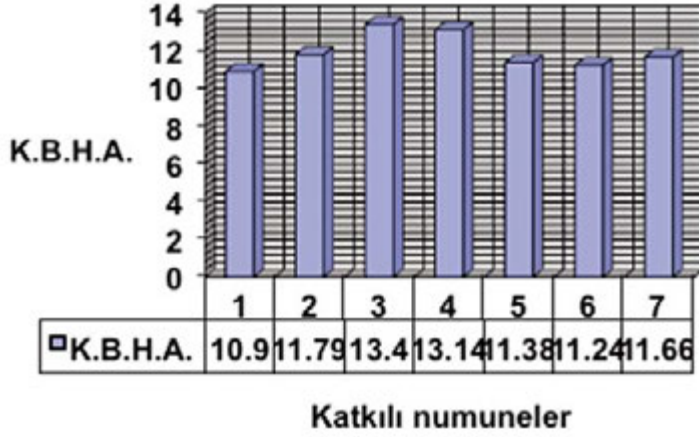
Şekil 1. Numunelerin Özgül Yoğunluk Grafiği

**Kıvam limitleri deney sonuçları:** %100Kil'e göre YFC ve YFC+UK katkıları genel olarak plastisite indislerini düşürmüştür. En düşük plastisite indisi %100Kil+%10YFC karışımında görülmüştür (Şekil 2).

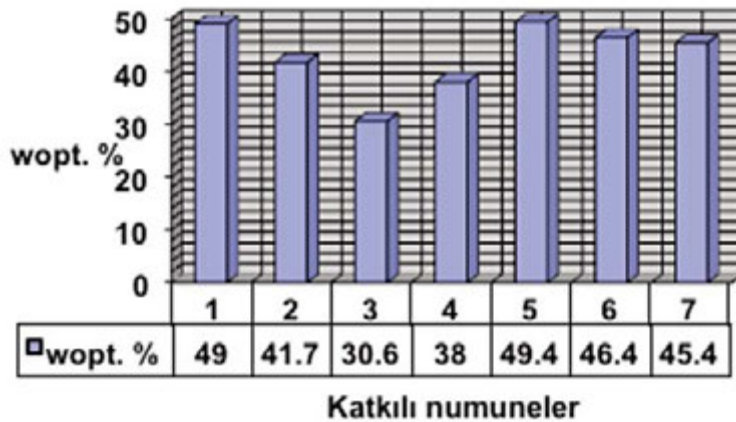


Şekil 2. Numunelerin Plastisite İndisi Grafiği

**Kompaksiyon özellikleri:** %100Kile göre YFC ve YFC+UK katkıları kuru birim hacim ağırlıkları arttırmış (Şekil 3) ve optimim su içeriklerini düşürmüştür (Şekil 4). YFC katkıli numunelere göre YFC+UK katkıli numuneleri su içeriği artmıştır.

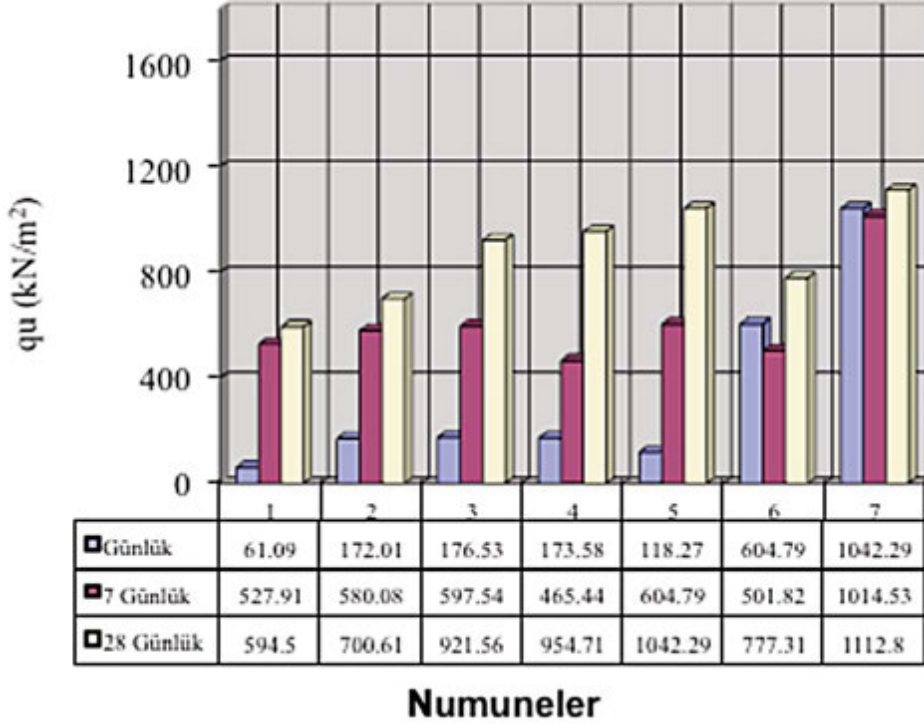


Şekil 3. Numunelerin K.B.H.A. Grafiği



Şekil 4. Numunelerin Optimum Su İçeriği Grafiği

**Katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları:** %100Kil'e göre YFC ve YFC+UK katkılı numunelerde günlük, 7 ve 28 günlük numunelerin genel olarak serbest basınç dayanımları arttırmıştır. En yüksek dayanımlar 28 günlük kürde bekleyen numunelerde görülmüştür. En yüksek dayanım 28 günlük kürde bekleyen %100Kil+%15YFC+%15UK karışımında görülmüştür (Şekil 5).



Şekil 5. Numunelerin Serbest Basınç Dayanımı Grafiği

#### 4. SONUÇLAR

- Hidrometre analiz sonuçlarına göre killi zeminin (bentonit kilinin) ve karışımların zemin sınıfı CH olarak belirlenmiştir. Zemine, katkı maddeleri katıldığında %100Kil'e göre plastisite indislerinin azaldığı görülmüştür. Plastisite indisinin azalması işlenebilirliği (zemin serme gibi) artırır, bu da istenilen bir özelliktir. Zeminin plastisitesinin artması, sıkışma ve şişme potansiyelinin artmasına, kazı ve dolgu işlerinde zorlukların ortaya çıkmasına yol açmaktadır [9].
- Karışımların %100Kil'e göre özgül yoğunlukları artış göstermiştir. YFC'nin özgül yoğunluk yüksek olduğu için özgül yoğunlukların %100Kil'e göre artması olası bir durumdur.
- Genel olarak kil zemine YFC ve YFC+UK katkısı maksimum kuru birim hacim ağırlıkları arttırmış (ykmaks) optimum su içeriklerini (wopt.) azaltmıştır. Kompaksiyonla; zeminin yükler altında deformasyonu azaltılır, su muhtevastaki değişme karşısında, hacim değişmeleri azaltılır. Kuru birim hacim ağırlığındaki artış zeminin taşıma gücünün artmasına, geçirimsizliğin, boşluk oranı ve porozitenin azalmasına ve oturmaların engellenmesine neden olur [10].
- Karışımların günlük, 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları %100Kil numunesine göre daha yüksek değerler almıştır. En yüksek dayanımlar 28 günlük kürde bekleyen numunelerde görülmüştür. En yüksek dayanım 28 günlük kürde bekleyen %100Kil+%15YFC+%15UK karışımında görülmüştür. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül puzolanik malzeme olduğu için dayanımını daha geç alır. Bu sebepten

en yüksek mukavemet değerlerinin 28 günlük kürde bekleyen numunelerde görülmesi beklenen bir durumdur. Uçucu kül katkısı mukavemetlerde artış göstermiştir. Uçucu kül katkılı karışımların stabilize edilecek zeminlerde temel tabakası olarak kullanımı düşünülebilir. Stabilize için en iyi sonuçlar %100 Kil+%15YFC+%15UK karışımında görülmüştür.

Bu çalışmada sonuç olarak yüksek fırın cürufunun ve uçucu külün yüksek plastisiteli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceği, böylece ekonomiye katkı sağlanabileceği ve çevre kirliliğinin azaltılabileceği düşünülmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] Ilıcalı, M., Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1998).
- [2] Bilim, C., Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2006).
- [3] Alataş, T., Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (1996).
- [4] Alkaya, D., "Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının incelenmesi", Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Denizli, (2009).
- [5] Değirmenci, N., Okucu, A. ve Turabi, A., "The Using Possibilities of Phosphogypsum by-Product Phosphoric Acid Production as a Stabilization Material", The 18th International Conference on Solid waste Technology and Management, Proceedings CD, session 3B, Industrial Wastes 1, Philadelphia, PA, USA, March 23-26, (2003), pp.314-323.
- [6] Aydın, S. Yenikent (Ankara) Yerleşim Alanı Killerinin Kireç ve Uçucu Kütle Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2010).
- [7] TSE 1900-1, "İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm1: Fiziksel Özellikleri Tayini", Ankara, (2006).
- [8] TSE 1900-2, "İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm2: Mekanik Özellikleri Tayini", Ankara, (2006).
- [9] Özaydın, K., "Zemin Mekaniği" kitabı, Birsen yayınevi, İstanbul (2016).
- [10] Uzuner, B. A., "Temel Mühendisliğine Giriş" kitabı, Derya kitabevi, Trabzon (2016). ■