

UÇUCU KÜL PUZOLANİK AKTİVİTESİ İLE İLGİLİ BAZI MEVCUT STANDARTLARIN DEĞERLENDİRMESİ

Ahmet GÖKÇE
İnş. Y. Müh.
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul

Turan ÖZTURAN
Doç. Dr.
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul

ÖZET

Uçucu kül puzolanik aktivitesinin tayini ile ilgili mevcut bazı standartlar ele alınmış, bu standartlardan elde edilen test sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmış ve her standardın uygunluğu tartışılmıştır. Söz konusu uluslararası standartlar (TS 639), Amerikan (ASTM C-311) ve İngiliz (BS 3892) olmakla birlikte, TS 639 ayrıca modifiye edilmiş, böylece dört farklı test metodunu kapsayan bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Seyitömer ve Soma termik santrallerinden temin edilen uçucu küller kullanılmıştır.

Sonuçlar, TS 639'un öngördüğü test metodunun özellikle Seyitömer uçucu külü gibi harcın su ihtiyacını önemli ölçüde arttıran uçucu küller için uygun ve geçerli bir yöntem olmadığını göstermektedir. TS 639, eşit $S/(Ç+UK)$ oranı yerine ASTM ve BS standartlarında olduğu gibi eşit işlenebilme dikkate alınarak modifiye edildiğinde daha yüksek puzolanik aktivite sonuçları elde edilmiş, ancak yine de ASTM ve BS standartlarından elde edilen düzeye ulaşamamıştır. Standartlarda öngörülen farklı bağlayıcı malzeme miktarları da puzolanik aktivite değerlerinin değişik düzeylerde olmasının esas sebeplerinden biri olmuştur.

1. GİRİŞ

Puzolanik aktivite, puzolandaki aktif silisin ve portland çimentosunun hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kirecin varlığına bağlı bir reaksiyondur. Diğer bir değişle hidratasyon ürünü serbest kireç sulu ortamda sistemdeki puzolanik reaksiyonun başlaması ve ilerlemesi için uygun koşulları sağlar ve sonuçta benzer hidratasyon ürünleri meydana gelir. İşte benzer hidratasyon ürünlerinin ortaya çıktığı bu reaksiyonlar zinciri, puzolanın kullanıldığı betonun mekanik performansını zaman içerisinde artırmaktadır.

Uçucu kül ve diğer puzolanların puzolanik aktivitelerinin değerlendirilmesi kimyasal, fiziksel ve mekanik olmak üzere üç değişik yolla yapılabilir. Bu çalışmada mekanik test metodları ele alınmıştır. Bu metodlar, harç karışımlarında belirli miktarda çimento yerine ağırlıkça veya hacimce ikame edilen uçucu külün, harçların basınç mukavemeti gelişimlerine olan etkisini uçucu kül kullanılmayan kontrol harçlarının basınç mukavemeti gelişimleriyle karşılaştırarak test ederler. Puzolanik aktivite, uçucu küllü harcın basınç dayanımının kontrol harcının basınç dayanımına oranı olarak ifade edilir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Uçucu külün betonda kullanımı konusunda daha önce Seyitömer uçucu külü ile gerçekleştirilen bir çalışmada [1], bu külün betonla kıyaslandığında harcın su ihtiyacını önemli ölçüde arttırıcı bir etkiye sebep olduğu saptanmıştır. TS 639' da [2] öngörülen puzolanik aktivite test metodu gereği kontrol harcı ile eşit (su/toplam bağlayıcı malzeme) oranı ile üretilen uçucu küllü harcın, artan su gereksinimi sebebi ile işlenebilirliğinin oldukça azaldığı, bu işlenebilirlikteki harç ile yerleştirme problemlerine bağlı olarak test edilebilecek nitelikte numuneler elde edilemediği gözlenmiştir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak gerçekleştirilen araştırmada TS 639'un, Seyitömer gibi harcın su ihtiyacını arttıran uçucu küllerin puzolanik aktivitesini değerlendirmek için uygunluğunun irdelenmesi ve tartışmaya açılması amaçlanmaktadır. Diğer bazı uluslararası standartların puzolanik aktivite test metodları ile karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilen çalışma, TS 639'un daha gerçekçi değerlendirme yapmasını mümkün kılacak öneriler getirmektedir.

2.2. KULLANILAN MALZEMELER

TS 639'da kullanılması öngörülen PÇ 32,5 cinsi çimento Kartal Set Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Çimentonun özellikleri Tablo 1'deki gibidir. Araştırmada iki farklı uçucu kül ile çalışılmıştır. Uçucu küller Seyitömer ve Soma termik santrallerinden elde edilmiştir. Seyitömer ve Soma uçucu küllerinin özgül ağırlıkları sırasıyla 1,85 ve 2.18 g/cm³ 'dür. Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri Tablo 2'de verilmiştir. Üretilen harçlarda TS 819'a uygun Pınarhisar standart kumu kullanılmıştır.

Tablo 1. Portland Çimentosunun Özellikleri

KİMYASAL BİLEŞİM		
Oksit (%)	PÇ 32,5	TS 19 / 1984 Sınırları
Çözünmeyen Kalıntı	0.58	< 1.5
SiO ₂	19.12	
Al ₂ O ₃	5.20	
Fe ₂ O ₃	3.35	
CaO	62.59	
MgO	3.27	<5
SO ₃	3.01	<3.5
Kızdırma Kaybı	0.90	<4
FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLER		
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.10	
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3340	>2800
Priz Başlangıcı	1 saat 50 dak.	1 saatten fazla
Priz Sonu	2 saat 40 dak	10 saatten az
Genleşme (mm)	3	<10
2 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm ²)	26.1	>10
7 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm ²)	34.6	>21
28 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm ²)	42.4	>32.5

Tablo 2. Uçucu Küllerin Kimyasal Bileşimleri

Oksit (%)	Seyitömer	Soma	TS 639 Sınırları (%)
SiO ₂	48.13	50.48	-
Al ₂ O ₃	14.64	23.74	-
Fe ₂ O ₃	12.13	5.84	-
S+A+F	74.90	80.06	70
CaO	9.52	9.28	-
MgO	5.70	2.58	<5
SO ₃	4.32	1.41	<5
Na ₂ O+ K ₂ O	2.50	-	
Kızdırma Kaybı	2.36	2.17	<10

2.3. DENEYSEL YÖNTEM

Deneyisel çalışmalarda takip edilen yöntemler TS 639, Amerikan ASTM C311 ve İngiliz BS 3892 standartlarının [3,4] öngördüğü şekilde uygulanmıştır. Bu test yöntemlerine ilave olarak TS 639, eşit S/(Ç+UK) oranı yerine ASTM ve BS standartlarında olduğu gibi eşit işlenebilirliği baz almak suretiyle modifiye edilerek dördüncü bir yöntem (M. TS 639) kullanılmıştır. Her yaş için toplam 12 farklı seri harç üretilmiş, üretilen numuneler 7 ve 28. günlerde test edilmişlerdir.

2.3.1. Harçların Karıştırılması

Bütün standartlarda öngörülen harç karıştırma prosedürü TS 24'de [5] tariflenen yöneme uymaktadır. Harçların karıştırılması TS 24'e göre yapılmıştır.

2.3.2. Yayılmanın Tayini

Üretilen harçların işlenebilme özelliklerini saptamak ve kontrol harcının işlenebilirliği dikkate alınarak sabit işlenebilirliği sağlamak amacıyla yayılma tablası testi uygulanmıştır.

- Karıştırmanın tamamlanmasından sonra modifiye edilmiş TS 639, ASTM C-311 ve BS 3892 test metodları için harcın yayılması tayin edilmiştir. Uçucu küllü harcın yayılma

değeri, kontrol harcının yayılma değerine ± 5 mm yakın olacak şekilde harca gerekli su miktarı katılarak ayarlanmıştır.

- Yayılma testi tamamlanır tamamlanmaz harç yeniden karıştırma kabına konmuş ve ASTM C-311 standardına göre 15 saniye yüksek devirde, BS 3892 standardına ve modifiye edilmiş TS 639'a göre ise 30 saniye düşük devirde yeniden karıştırılmıştır.

2.3.3. Harcın Kalıba Yerleştirilmesi

- TS 639 ve BS 3892 standartlarına göre üretilen harç sarsma tablası üzerinde iki tabaka halinde $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlu kalıp bölmelerine doldurulmuş ve her tabaka 60 saniye içinde 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır.

- ASTM C-311 standardı numuneler için $50 \times 50 \times 50$ mm boyutlu küpleri esas almakta ve sıkıştırma sarsma yerine iki tabaka halinde tokmaklama ile yapılmaktadır. Tarif edilen şekilde kübün her tabakası 10 saniyede 32 kez tokmaklanmış ve bir küp tamamlandıktan sonra diğer kübün doldurulmasına başlanmıştır.

2.3.4. Numunelerin Bakımı

ASTM C-311 ve BS 3892 standartlarına ait numuneler musluk suyu yerine kirece doygun suda saklanırlar. Bunun dışında, tüm numunelerin bakımı üretildikleri andan kırılacakları güne kadar TS 24'de tarif edilene uygun şekilde yapılmıştır.

2.3.5. Basınç Dayanımı Testi ve Puzolanik Aktivitenin Tayini

- TS 639 ve BS 3892 standartları için iki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar 40×40 mm² 'lik başlıklar arasında kırılarak basınç dayanımları saptanmıştır. ASTM C-311 standardına ait numuneler için başlık gerekmez, küpler yan yüzlerinden yüklenerek deneye tabi tutulmuşlardır.

- Puzolanik aktivite aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\text{Puzolanik Aktivite} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (1)$$

Burada:

A = Uçucu küllü numunelerin ortalama basınç dayanımı, MPa

B = Kontrol numunelerinin ortalama basınç dayanımı, MPa

TS 639'a göre 28. gün için puzolanik aktivite 70'den az olmamalıdır. ASTM C-311 puzolanik aktiviteyi 7 ve 28. günlerde tayin eder ve her iki yaş içinde puzolanik aktivitenin en az 75 olması gereklidir. BS 3892'de, EN 196-1 standardının [6] öngördüğü yöntemi esas alarak belirlenen puzolanik aktivite için sağlanması gereken bir limit yoktur. Diğer yandan, EN 450 standardı (Fly ash for concrete) [7] puzolanik aktivitenin 28. günde en az 75, 90. günde ise 85 olmasını öngörür.

2.4. DENEY NUMUNELERİNİN ÖZELLİKLERİ

Kontrol ve uçucu küllü deney numunelerine ait karışım oranları ve bazı özellikler Tablo 3'de gösterilmiştir:

Tablo 3. Üretilen Harçların Karışım Oranları ve Bazı Özellikleri

Karışım	Çimento (g)	Uçucu kül (g)	Su (g)	Standart kum (g)	S/(Ç+UK)	Yayılma (cm)
TS Kontrol	450	-	225	1350	0.50	-
**M. TS Kontrol	450	-	225	1350	0.50	11.5
BS Kontrol	450	-	225	1350	0.50	11.5
ASTM Kontrol	500	-	242	1375	0.48	12.5
TS Seyitömer	293	*94	194	1350	0.50	-
M.TS Seyitömer	293	94	242	1350	0.63	11.5
BS Seyitömer	315	135	260	1350	0.58	11.5
ASTM Seyitömer	400	100	267	1375	0.53	13.0
TS Soma	293	*110	202	1350	0.50	-
M.TS Soma	293	110	225	1350	0.56	12.0
BS Soma	315	135	225	1350	0.50	11.0
ASTM Soma	400	100	242	1375	0.48	12.5

* TS 639 ağırlık olarak karışıma girecek uçucu kül miktarını $(157) \cdot \delta_{UK} / 3.1$ formülü ile belirlemektedir.
 δ_{UK} uçucu kül özgül ağırlığıdır.

** Modifiye edilmiş TS 639

3. DENEY SONUÇLARI

Deney numunelerinin test edildikleri yaşlardaki basınç dayanımlarına ait sonuçlar ve bu sonuçlara göre belirlenen puzolanik aktivite değerleri Tablo 4' de gösterilmiştir.

Tablo 4. Harç Numunelerin Basınç Dayanımı ve Puzolanik Aktivite Değerleri

Karışım	7 gün		28 gün	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Puzolanik Aktivite (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Puzolanik Aktivite (%)
TS Kontrol	28.2		38.3	
M. TS Kontrol	28.2		38.3	
BS Kontrol	28.5		38.0	
ASTM Kontrol	34.5		40.0	
TS Seyitömer	8.8	31	10.5	27 <70
M. TS Seyitömer	13.9	49	23.2	61 <70
BS Seyitömer	17.9	63	28.4	75
ASTM Seyitömer	22.3	65 <75	34.3	86 >75
TS Soma	17.7	63	25.0	65 <70
M. TS Soma	17.7	63	28.0	73 >70
BS Soma	21.1	74	31.5	83
ASTM Soma	28.3	82 >75	38.8	97 >75

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Harçların farklı işlenebilme özellikleri ve farklı su ve (çimento+uçucu kül) içerikleri elde edilen deney sonuçlarında belirleyici rol oynayan iki ana faktör olmuştur. Seyitömer uçucu külü ile TS 639' a göre üretilmiş olan harcın basınç dayanımı kontrol harcı ile karşılaştırıldığında çok düşük düzeyde olduğu görülmektedir. Bu külün 0.50 sabit S/(Ç+UK) oranında harcın su ihtiyacını oldukça arttırması sebebiyle ancak nemli kum kıvamında bir işlenebilirlik gözlenmiş, yayılma gerçekleşmemiştir. Harcın bu derece kuru bir kıvama sahip olması sarsma tablası üzerinde gerektiğince yerleştirilmesini ve sıkıştırılmasını mümkün kılmamıştır. Buna bağlı olarak elde edilen numuneler oldukça kritik görünümde boşluklu bir yapıya sahip olmuşlardır. Bu yapıdaki numuneler ile büyük dayanım kayıplarının nedeni kolaylıkla izah edilebilmektedir.

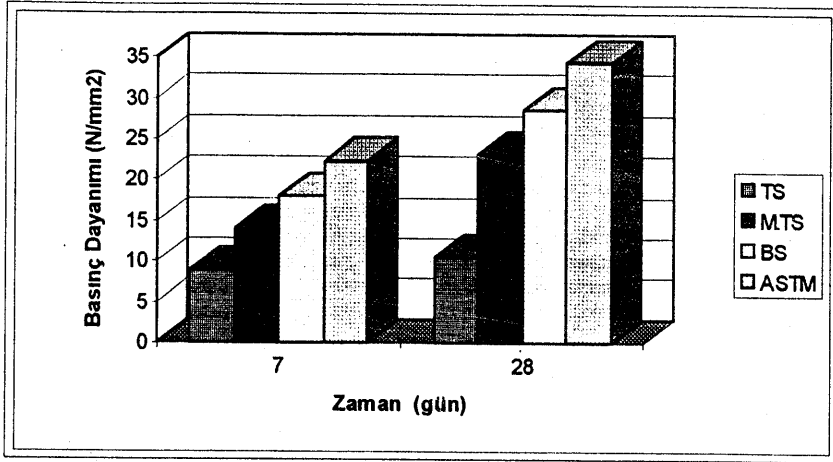
Düşük basınç dayanımının sarsma tablası ile gerektiğinde sıkıştırma yapılamamasına bağlı olduğunu netleştirmek amacıyla Seyitömer uçucu külü ile TS 639'a göre üretilen harç, sarsma tablası yerine vibratör üstünde vibrasyonla ve aynı zamanda tokmaklayarak sıkıştırılmıştır. Her ne kadar denenen bu yöntemle de numuneler bu kıvamda ideal olarak sıkıştırılamamış olsa da, standart sıkıştırma ile 28 günde basınç dayanımı 10.5 MPa, puzolanik aktivite değeri 27 olmuşken, vibrasyon ve tokmaklama ile sıkıştırma yapıldığında basınç dayanımı 19.0 MPa'a ve buna bağlı olarak puzolanik aktivite değeri de 50'ye yükselmiştir.

Bir başka açıdan, TS 639'a göre üretilen Seyitömer uçucu küllü harcın, 293 g çimento ve 94 g uçucu kül ile diğer standartlar ile karşılaştırıldığında en düşük bağlayıcı malzeme içerikli karışıma sahip olduğu görülmektedir. Bu farklılık da TS 639'a göre puzolanik aktivitenin daha düşük olmasında bir neden teşkil etmektedir.

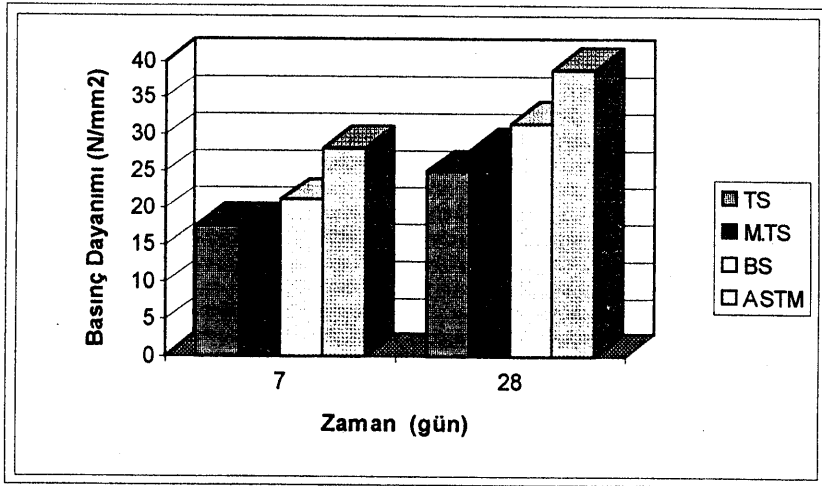
Yerleştirme problemini ortadan kaldırmak amacıyla TS 639 modifiye edilerek S/(Ç+UK) oranı yerine yayılma sabit tutulmuş, S/(Ç+UK) oranı 0.50'den 0.63'e çıkmış olmasına rağmen TS 639'dan daha tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, iki yöntemle de Seyitömer uçucu külü için standartta öngörülen 28. günde kontrol harcı basınç dayanımının en az %70'i olan düzey sağlanamamıştır.

TS 639'a göre Soma uçucu külü ile hazırlanmış harçta sabit S/(Ç+UK) oranında numunelerde yerleştirmeye bağlı gözlenen olumsuzluklar Seyitömer külü ile yaşananlar kadar çarpıcı olmamıştır. Bu uçucu kül ile üretilmiş harçta da sabit yayılma ile S/(Ç+UK) oranı 0.50'den 0.56'ya çıkmış olmasına rağmen modifiye edilmiş TS 639 yöntemi ile üretilen harcın 28 günlük basınç dayanımı kontrol harcını %73 ile karşılayarak standart limitini sağlayan bir sonuç vermiştir.

Farklı standartlara göre üretilmiş harçların basınç dayanımı gelişimleri Şekil 1 ve Şekil 2' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Farklı Standartlar İçin Seyitömer Uçucu Külü ile Üretilmiş Harçların Basınç Dayanımı Gelişimlerinin Karşılaştırılması

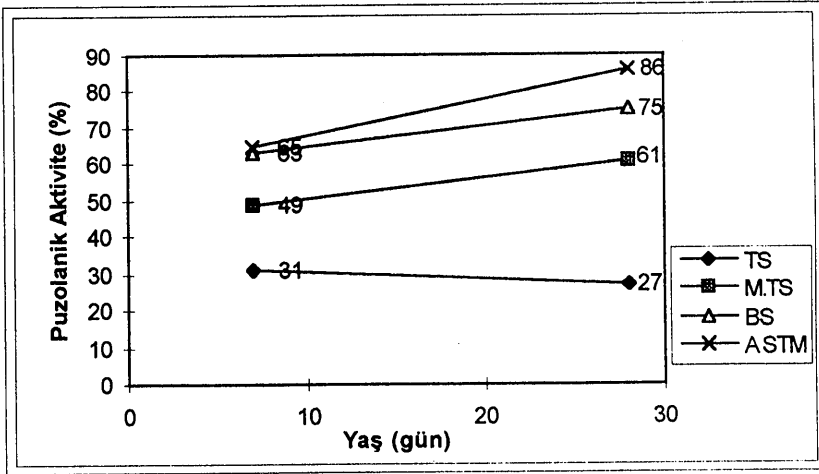


Şekil 2. Farklı Standartlar İçin Soma Uçucu Külü ile Üretilmiş Harçların Basınç Dayanımı Gelişimlerinin Karşılaştırılması

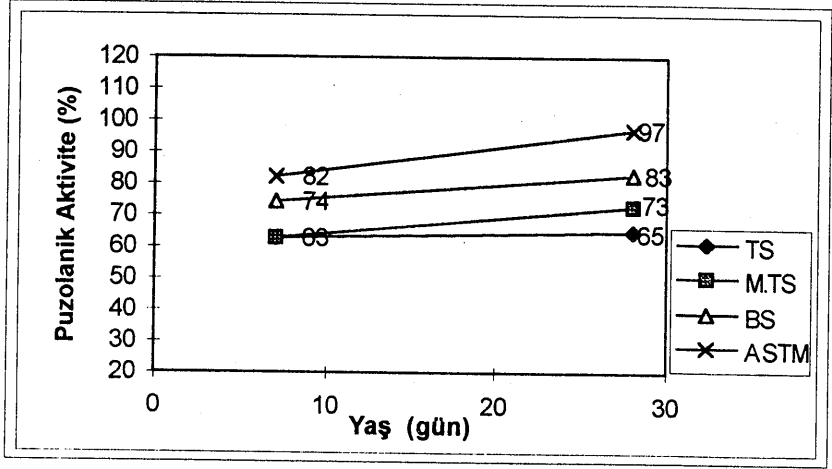
BS 3892 standardına göre üretilmiş olan harçlardan iki uçucu kül için elde edilen puzolanik aktivite sonuçları, bu standarttaki gibi sabit yayılmanın esas alındığı ve kontrol

harcı bileşiminin BS 3892'ninki ile aynı olduğu modifiye edilmiş TS 639 sonuçları ile kıyaslandığında daha yüksek oldukları görülmektedir. BS 3892' deki uçucu küllü harç karışımına ait bağlayıcı malzeme içeriğinin daha fazla olması doğal olarak bu sonucu doğurmaktadır.

ASTM C-311 uçucu küllü harçların bağlayıcı malzeme içeriği bakımından diğer standartlarla kıyaslandığında en zengin içeriğe sahip olan standarttır. Örneğin, ASTM C-311 uçucu küllü test harcında, kontrol harcında kullanılan çimento miktarının ağırlıkça %80'i kadar çimento kullanılırken, TS 639'da bu miktar kontrol harcındaki çimento miktarının ancak ağırlıkça %65'i kadardır. ASTM C-311'e göre Soma uçucu küllü ile üretilen harç 28. günde kontrol harcını %97 nispetinde karşılamış, bu nispet Seyitömer uçucu küllünün kullanıldığı harçta da %86 gibi yüksek bir düzeyde olmuştur. İki uçucu kül için 7 ve 28. günlerde farklı standartlardan elde edilen puzolanik aktivite değerleri ile bilgiler Şekil 3 ve Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. Seyitömer Uçucu Küllü için Farklı Standartlardan Elde Edilen Puzolanik Aktivite Değerleri



Şekil 4. Soma Uçucu Külü için Farklı Standartlardan Elde Edilen Pozolanik Aktivite Değerleri

5. SONUÇLAR

- TS 639'un öngördüğü biçimde yapılan pozolanik aktivite testinin özellikle Seyitömer gibi harcın su ihtiyacını arttıran uçucu küller için uygun bir yöntem olmadığı düşünülmektedir. Kontrol harcı ile eşit $S/(\text{Ç}+\text{UK})$ oranı yerine eşit işlenebilirlik (yayılma) esasına göre pozolanik aktiviteyi test etmek bu tür küller için daha gerçekçi bir değerlendirme yapmayı mümkün kılacaktır.

- TS 639'daki test yöntemi ile 28. günde her iki uçucu kül için de pozolanik aktivitenin standarttaki limiti sağlamamış olmasına karşın ASTM C-311 ve BS 3892 standartlarına göre bu uçucu küller yeterli pozolanik aktiviteye sahiptir.

- Kontrol harcında kullanılan bağlayıcı malzeme (çimento) miktarına karşılık standartların uçucu küllü harç için öngördükleri farklı bağlayıcı malzeme (çimento+uçucu kül) içerikli bileşimler, ele alınan test metodlarından farklı sonuçların ortaya çıkmasında önemli bir faktör olmuştur.

• TS 639, diğ er ÷ lke standartları ile karşılaştırdığında mevcut haliyle T÷ rkiye uçucu k÷ llerini cezalandırmaktadır. TS 639' da ö ngör÷ len puzolanik aktivite test metodunun, gerek uçucu k÷ ll÷ taze harę özelliğ leri gerekse uçucu k÷ ll÷ harcın bağlayıcı malzeme iğeriğ i yön÷ yle ele alınarak revize edilmesi gerektiğ ine inanılmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Gökçe, A. , Farklı İnceliklerdeki Uçucu K÷ llerin Betondaki Performanslarının Karşılaştırılması , Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul, Ağustos 1995, 118 Sayfa
2. Türk standartları, Uçucu K÷ ller (TS 639) , Türk Standartları Enstit÷ s÷ , Ankara, 1975, 7 Sayfa.
3. American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete (ASTM C 311) , ASTM, Philadelphia, 1994, pp 188-192.
4. British Standards Institution, Pulverized-Fuel Ash. Part 1. Specification for Pulverized-Fuel Ash for Use as a Cementitious Component in Structural Concrete (BS 3892) , British Standards Institution, London, 1993, pp 13-14.
5. Türk standartları, Çimentoların Fiziki ve Mekanik Deney Metodları (TS 24) , Türk Standartları Enstit÷ s÷ , Ankara, 1985, 28 Sayfa.
6. European Standard, Methods of Testing Cement (EN 196-1) , European Committee for Standardization, Brussels, December 1994, pp 13-14
7. European Standard, Fly Ash for Concrete - Definitions, Requirements and Quality Control (EN 450) , European Committee for Standardization, Brussels, September 1994, pp 5