

YÜKSEK HACİMDE C SINIFI UÇUCU KÜL İÇEREN BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE SÜLFÜRİK ASİT DAYANIKLILIĞI

Halit YAZICI

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca-İzmir

Geliş Tarihi : 18.10.2004

ÖZET

Bu çalışmada, yüksek oranda C sınıfı uçucu kül içeren beton karışımlarının bazı fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Su içerisinde kür ve havada kür olmak üzere iki farklı kür yöntemi kullanılmıştır. Çimento yerine % 40, % 50, % 60 ve % 70'e kadar uçucu kül ikame edilerek hazırlanan; beton numunelerinin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü, sülfürik asit etkisine karşı dayanıklılığı, harç çubuğu örneklerinin hacim sabitliği ve bağlayıcı hamurların priz süreleri ölçülmüştür. Sonuçlar bağlayıcı olarak sadece Portland çimentosu içeren kontrol betonu ile kıyaslamalı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler : C sınıfı uçucu kül, Basınç dayanımı, Elastisite modülü, Sülfürik asit, Priz süresi

MECHANICAL PROPERTIES AND SULFURIC ACID RESISTANCE OF HIGH VOLUME CLASS C FLY ASH CONCRETE

ABSTRACT

In this study, some physical and mechanical properties of concrete mixtures containing high volume Class C fly ash have been investigated. Two different curing conditions, standard curing in water and curing in air were applied to the specimens in which 40 to 70 % cement was replaced with fly ash. Compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and sulfuric acid resistance of concrete mixes, the volume stability of mortar bar specimens and setting times of pastes were investigated. Test results are presented comparatively with control specimens which have only Portland cement as a binder.

Key Words : Class C fly ash, Compressive strength, Modulus of elasticity, Sulfuric acid, Setting time

1. GİRİŞ

Ülkemizde açığa çıkan uçucu küllerin büyük bölümü yüksek kireç içeriklidir ve uçucu kül özellikleri santralden santrale, hatta aynı santralde zamana bağlı olarak büyük değişiklikler gösterebilmektedir. Son yıllarda İzmir yöresindeki bir çok çimento fabrikası ve hazır beton tesisi Soma Termik Santraline ait uçucu külü kullanmaktadır. Buna karşılık betonda yüksek oranda uçucu kül kullanımı,

silindirle sıkıştırılmış bazı beton uygulamaları dışında ülkemiz açısından nispeten yeni bir konudur. Bu konuda yurtdışında geniş araştırmalar yapıldığı göze çarpmaktadır. Ancak, söz konusu çalışmaların hemen hepsinde F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır (Malhotra, 1986; Sivasundaram, 1992; Bilodeau et al., 1994; Ramezaniyanpour and Malhotra, 1995; Bouzoubaa, 2000; Bouzoubaa, 2001).

Uçucu kül puzolanik özelliği olan ve betonun bir çok özelliğini olumlu etkileyen değerli bir beton

katkısıdır. Genellikle F sınıfı uçucu kül küresel yapısı nedeniyle betonun işlenebilirlik özelliğini iyileştirmekte, taze betonda su kusmayı (terleme) azaltmakta, betonun hidrasyon ısısını azaltarak sıcak havalarda kütle betonunu dökümüne imkan tanımakta, puzolanik reaksiyon sayesinde betonun uzun dönemli mukavemetine katkıda bulunmakta, betonun geçirimsizliğini azaltmakta ve betonun iç ve dış kaynaklı yıpratıcı etkilere dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu yararlı özellikleri uçucu külün beton üretiminde yaygın olarak kullanımına ve araştırmaların bu konu üzerinde yoğunlaşmasına yol açmıştır (Malhotra and Mehta, 2002). Buna karşılık, uçucu kül betonun erken dayanımını düşürebilmekte ve özellikle yüksek kireç içerikli (C sınıfı) uçucu külün betonda yüksek oranda kullanımı ise betonun hacim sabitliğinin bozulmasına yol açabilmektedir (Baradan ve ark., 2002).

Bu çalışmada, çimentonun uçucu kül ile yüksek oranlarda (% 40, 50, 60, 70) yer değiştirilmesinin betonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü tayini için 100/200 mm'lik silindir beton örnekler kullanılmıştır. Ayrıca, kür koşullarının etkisini araştırmak amacıyla, iki tür kür koşulu seçilmiştir; laboratuvar ortamında havada kür ve 23±2 °C su içerisinde kür.

Uçucu kül kullanımının, betonun sülfürik asit saldırısına karşı kalıcılığına etkisinin belirlenmesi amacıyla, beton karışımlarından alınan 71 mm ayrıtlı küp örnekler 28 günlük standart kür periyodundan sonra % 5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılmış,

örneklerin basınç dayanımı ve ağırlık kayıpları suda kür edilen kontrol örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, aynı oranlarda çimento ile yer değiştirme yapılan uçucu küllü harç çubuğu örnekleri (25 x 25 x 285 mm) hazırlanarak hacimsel kararlılıkları periyodik boy değişimi ölçümleriyle tespit edilmiştir. Uçucu kül içeren bağlayıcı hamurlar üzerinde ise priz deneyleri yapılarak, uçucu külün ve süperakışkanlaştırıcı katkının priz süresi üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilen PÇ 42.5 çimentosu kullanılmıştır. Uçucu kül, Soma Termik Santralinden temin edilmiş olup özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. İri agrega olarak kireçtaşı, ince agrega olarak ise doğal kum ve kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Kullanılan 0-5 mm, 5-15 mm ve 15-25 mm kırma kireçtaşı agregalarının özgül ağırlıkları sırasıyla 2.59, 2.70 ve 2.69'dur. Doğal kumun özgül ağırlığı ise 2.56 olarak bulunmuştur. 0-5 mm, 5-15 mm ve 15-25 mm kırmataş agregalarının kütlece su emmeleri sırasıyla % 1.21, % 0.39 ve % 0.24'tür. Doğal kumun su emmesi % 1.63'tür. Katkı olarak naftalin sülfonat formaldehid bazlı bir süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Kimyasal katkı, ASTM C 494-81, tip F ve TS EN 934-2 standartlarına uygundur. Kimyasal katkı için üretici firma tarafından önerilen kullanım oranı çimento ağırlığına % 1.2-3.0 aralığındadır.

Tablo 1. Çimento ve Uçucu Külün Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (%)			Çimentonun Fiziksel Özellikleri	
	Çimento	Uçucu kül	Özgül ağırlık	3.15
SiO ₂	19.3	42.14	Priz başlangıcı (dak)	119
Al ₂ O ₃	5.57	19.38	Priz sonu (dak)	210
Fe ₂ O ₃	3.46	4.64	Hacim genleşmesi (mm)	1.00
CaO	63.56	26.96	Çimento ve Uçucu Külün Özgül Yüzeyi (Blaine)	
MgO	0.86	1.78	Çimento (m ² /kg)	352
Na ₂ O	0.13	--	Uçucu kül (m ² /kg)	290
K ₂ O	0.80	1.13	Çimentonun Basınç Dayanımı (MPa)	
SO ₃	2.91	2.43	2 gün	27.2
Cl	0.013	--	7 gün	42.4
Kızdırma kaybı	2.78	1.34	28 gün	52.7
Çözünmez kalıntı	0.42	--	Uçucu Külün Puzolanik Aktivite İndeksi (%)	
Serbest CaO (%)	1.22	4.34	7 gün	79
			28 gün	88

Karışımların basınç dayanımları ve elastisite modülleri 100/200 mm silindir örnekler kullanılarak belirlenmiştir. Beton karışımları yatay eksenli mikser kullanılarak hazırlanmış ve numuneler

sarsma tablası kullanılarak sıkıştırılmıştır. Tüm karışımların çökme değeri (80 ± 20 mm) arasında kalacak şekilde ayarlanmış, bu amaçla çeşitli oranlarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

Beton karışım miktarları Tablo 2’de verilmiştir. Tüm karışımlarda toplam bağlayıcı miktarı 360 kg/m^3 ve su/bağlayıcı oranı 0.40’tır. Basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve elastisite modülleri

her karışım için üç örnek üzerinde yapılan deneylerle belirlenmiştir. Basınç deneyi TS 3114, yarmada çekme dayanımı TS 3129 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. 1 m^3 için Malzeme Miktarları ve Karışım Özellikleri

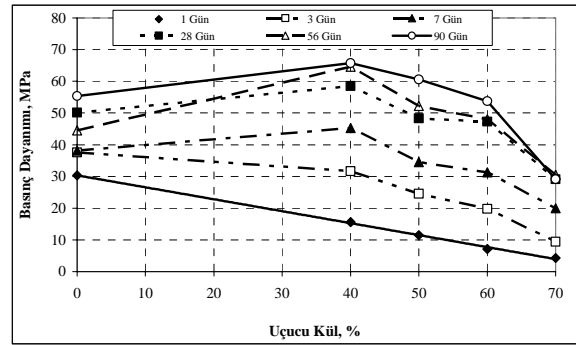
Bileşen (kg/m^3)	UK0	UK40	UK50	UK60	UK70
Uçucu kül (%)	0	40	50	60	70
Uçucu kül (kg)	0	144	180	216	252
Çimento (kg)	360	216	180	144	108
Su (L)	143	143	143	143	143
Su /Çimento	0.40	0.66	0.79	0.99	1.32
Su/Bağlayıcı	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Kum (kg)	460	452	449	447	444
0-5 mm Kireçtaşı (kg)	463	454	452	449	446
5-15 mm Kireçtaşı (kg)	671	660	656	652	648
15-25 mm Kireçtaşı (kg)	286	281	280	278	276
Süperakışkanlaştırıcı (L)	8.50	9.47	9.47	10.80	12.17

Betonda yüksek oranda C sınıfı uçucu kül kullanımının betonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkileri hakkında elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

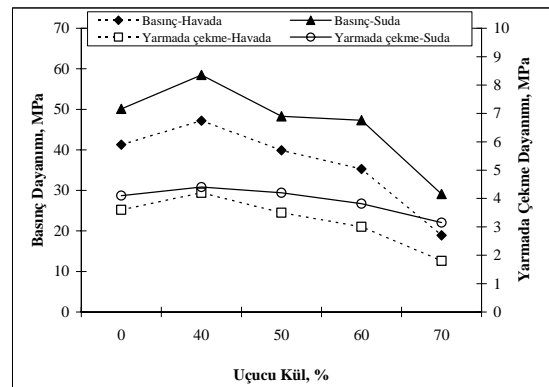
2. 1. Yüksek Oranda Uçucu Kül Kullanımının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi

Şekil 1, su içerisinde standart kür yapılmış betonların uçucu kül oranına bağlı olarak basınç dayanımlarının zamanla değişimini göstermektedir. Uçucu kül oranının artışı ile betonun 1 günlük basınç dayanımı büyük oranda azalırken, çimento yerine % 40 uçucu kül ikame edilmiş karışım, bağlayıcı olarak sadece çimento içeren kontrol karışımının dayanım seviyesine 7 günde ulaşmaktadır. 28 günlük dayanımlar incelendiğinde, % 50 ve % 60 ikame oranında bile kontrol karışımı dayanımına oldukça yakın dayanımlar elde edilmiştir. % 70 ikame oranında ise uzun dönemde de olsa kontrol karışımı ile dayanım farkı kapanmamaktadır.

Şekil 2’de laboratuvar ortamında havada ve kirece doymun suda bekletilmiş 28 günlük örneklerin basınç ve yarmada çekme dayanımlarının uçucu kül içeriği ile değişimini göstermektedir. Buna göre; uçucu kül oranının artmasıyla kürlü ve kürsüz örneklerin benzer davranış gösterdiği, kontrol karışımının kür edilmemesi halinde oluşan dayanım kaybı 8.8 MPa iken, % 60 uçucu küllü karışımda bu farkın 12.0 MPa değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, uçucu kül oranı arttıkça kürlü ve kürsüz örnekler arasındaki yarmada çekme dayanım farkı daha belirgin bir şekilde artmaktadır. Bu durum yüksek oranda uçucu kül kullanımının kür hassasiyetini arttırdığı şeklinde yorumlanabilir.



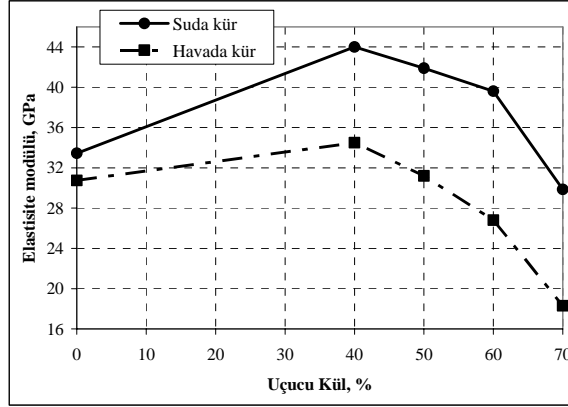
Şekil 1. Yüksek oranda uçucu kül kullanımının basınç dayanımlarına etkisi (standart kür koşulunda)



Şekil 2. Kür şartlarının ve uçucu kül kullanımının 28. günde basınç ve yarmada çekme dayanımına etkisi

Şekil 3’te kürlü ve kürsüz karışımların 28 günlük elastisite modülleri gösterilmiştir. Buna göre, % 40, % 50 ve % 60 ikame oranlarında örneklerin suda kür edilmesi halinde elastisite modülünde kontrol karışımına kıyasla artış söz konusudur. Kürsüz örneklerde ise bu durum sadece % 40 uçucu kül

kullanımı için geçerlidir. Uçucu kül kullanımının kür hassasiyetini önemli ölçüde artırdığı söylenebilir.



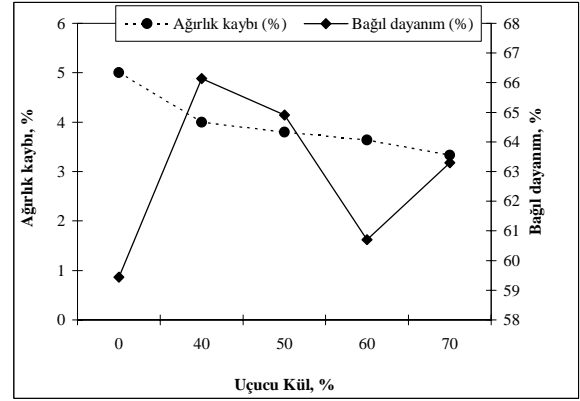
Şekil 3. Elastisite modülü-uçucu kül ilişkisi

2. 2. Uçucu Külün Betonun Sülfürik Asit Dayanıklılığına Etkisi

Uçucu külün betonun asit dayanıklılığı üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla 71 mm ayrıtlı küp numuneler kullanılmıştır. 28 gün süreyle su içerisinde kür edilen örneklerden bir kısmı ağırlıkça % 5'lik H_2SO_4 çözeltisine konulmuş ve 60 gün süreyle asit çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Diğer kısmı ise, su içerisinde bekletilmeye devam etmiştir. 60 günün sonunda örneklerin basınç dayanımları ve ağırlıkları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, uçucu kül içeriğinin artması, ağırlık kayıplarını azaltırken bağıl basınç dayanımlarını arttırmıştır. Bağıl basınç dayanımı asit etkisine maruz bırakılan betonların basınç dayanımının, sürekli su içerisinde bekletilen örneklerin basınç dayanımına oranıdır. Tüm karışımlar sülfürik asit etkisine maruz kaldıktan sonra % 34-41 arasında basınç dayanımı kaybına uğramışlardır. Uçucu kül oranı arttıkça dayanım kayıplarında bir miktar azalma söz konusudur. Uçucu külün bu yararlı etkisi, puzolanik reaksiyon ile $Ca(OH)_2$ 'in bağlanması ve bunun neticesinde daha geçirimsiz bir beton üretilmesi ile açıklanabilir.

Tablo 3. 1 m³ Harç Karışımı İçin Malzeme Miktarları ve Karışım Özellikleri

Bileşen (kg/m ³)	UK0	UK40	UK50	UK60	UK70
Uçucu kül (%)	0	40	50	60	70
Uçucu kül (kg)	0	160	200	240	280
Çimento (kg)	400	240	200	160	120
Su (L)	162	162	162	162	162
Su /Çimento	0.40	0.67	0.81	1.01	1.35
Su/Bağlayıcı	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Kum (kg)	430	419	416	414	412
0-5 mm Kireçtaşı (kg)	1303	1269	1260	1254	1246
Süper akışkanlaştırıcı (L)	8.50	9.47	9.47	10.80	12.17
Yayılma (%)	115	120	116	120	115

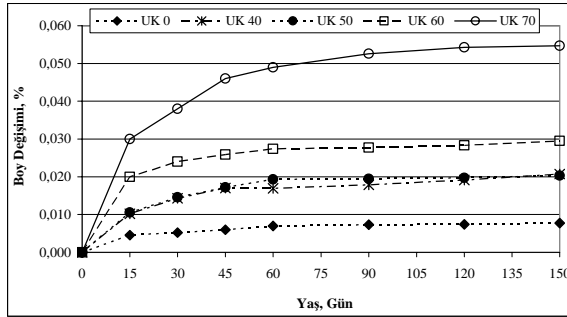


Şekil 4. Uçucu kül kullanımının sülfürik asit etkisiyle oluşan dayanım ve ağırlık kaybına etkisi

2. 3. Uçucu Kül Kullanımının Harçların Hacim Sabitliğine Etkisi

Beton içinde yüksek hacimde C sınıfı uçucu kül kullanımı, uçucu küde bulunabilen serbest kireçten dolayı betonda hacim sabitliği probleminin oluşması riskini gündeme getirebilmektedir. Bu etkiyi belirleyebilmek amacıyla 25 x 25 x 285 mm boyutlu harç çubukları hazırlanmış, örnekler 150 gün süreyle su içerisinde bekletilmiş ve boy değişimleri periyodik olarak ölçülmüştür. Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları ve karışımların bazı özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur. Harç ve beton karışımları arasındaki temel farklılıklar; iri agrega yerine 0-5 mm kırma kireçtaşı kullanılması ve bağlayıcı miktarının 360 kg/m³ değerinden 400 kg/m³ değerine çekilmesi olarak gösterilebilir. Yapılan ön çalışmada uçucu kül içermeyen harç karışımının 5 mm küp örnekler kullanılarak 28 günlük basınç dayanımı 57.1 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer beton karışımında 50.1 MPa'dır. Harçların basınç dayanımının küçük boyutlu örneklerle ölçüldüğü de dikkate alınarak, dayanım açısından aradaki farkın kabul edilebilir mertebede olduğu düşünülmektedir.

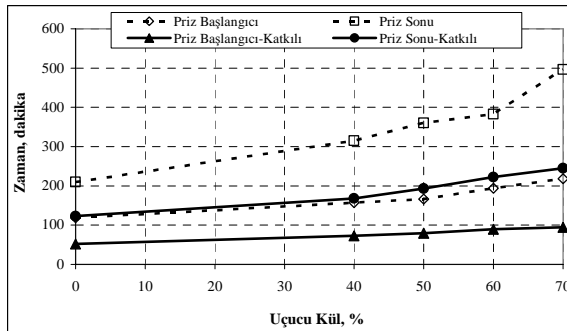
Şekil 5'ten de görüldüğü gibi, uçucu kül oranının artması ile harç çubuklarının genleşme oranları da artmaktadır. Ayrıca, ilk günlerde harç çubuklarının boy değişimleri birbirine oldukça yakınken bu farklar ilerleyen yaşlarda artarak belirginleşmiştir. Uçucu kül içermeyen % 0 UK karışımının boy değişiminin 60 günden sonra fazla değişmediği, bununla birlikte uçucu kül içeren karışımların boylarında zamanla artışın sürdüğü görülmektedir. Çimento veya uçucu külde bulunan serbest kireç yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldığı için beton içinde çok yavaş ve uzun sürede hidrate olabilir. Bu nedenle, hacim sabitliği deney sonuçlarının otoklav ve Le Chatelier deney sonuçları ile kıyaslanması faydalı olacaktır. Ayrıca, bu konuda beton örnekleri kullanılarak daha uzun süreli ve daha ayrıntılı deneysel çalışmalar yürütülmesi de önerilebilir.



Şekil 5. Suda bekletilen harç çubuğu örneklerinin zamana bağlı genleşmesi

2. 4. Uçucu Külün Priz Süresi Üzerindeki Etkisi

Bağlayıcı hamurların priz süreleri Vicat iğnesi kullanılarak belirlenmiştir ve sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Bağlayıcı hamurların priz süreleri

Bağlayıcı hamurlarda normal kıvam için gerekli su miktarı da uçucu kül içeriğinin artışı ile artmıştır. Örneğin sadece çimentodan oluşan bağlayıcıda normal kıvam için gerekli su miktarı çimento ağırlığının % 28'i iken, bu değer % 70 uçucu kül

ikamesinde % 32'ye çıkmaktadır. Bağlayıcı hamurların priz süreleri, uçucu kül içeriğinin artması ile uzamaktadır. Bu durum hem uçucu kül oranının artmasıyla çimento miktarındaki azalmaya, hem de normal kıvam için gerekli su miktarının artmasına bağlanabilir. Bununla birlikte, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak (betonda kullanılan oranda) üretilen çimento hamurlarının priz sürelerinin önemli derecede kısaldığı görülmektedir. Bu durum süper akışkanlaştırıcı içeren hamurların su/bağlayıcı oranlarının daha düşük olması ile açıklanabilir.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmadan elde edilen sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Betonda yüksek oranda C sınıfı uçucu kül kullanımı erken dayanımları önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak, su/bağlayıcı oranının 0,4, çökme değerinin 80 ± 20 mm olduğu bu çalışmada, çimentonun uçucu kül ile % 50 ve % 60 oranında yer değiştirilmesi halinde 28 günlük dayanımların fazla etkilenmediği görülmüştür. Uçucu külün % 70 oranında kullanımı durumunda ise dayanım farkı uzun vade de kapanmamaktadır. Karışım dizaynının değişmesi halinde bu bulguların da değişmesi beklenir.
- Havada kür yapılan örneklerin basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve elastisite modülleri su içerisinde standart kür yapılan numunelere kıyasla önemli oranda düşük çıkmıştır. Dayanım ve elastisite modülleri arasındaki fark uçucu kül oranı arttıkça artmaktadır. Bu durum uçucu kül içeren karışımların kür hassasiyetinin daha fazla olduğunun bir göstergesidir.
- Uçucu kül kullanımı, betonun sülfürik asit etkisine karşı dayanıklılığını olumlu yönde etkilemiştir. Ancak, betonun diğer fiziksel ve kimyasal etkiler altındaki uzun dönemli performansının gözlenmesi yararlı olacaktır.
- Uçucu kül oranının artması ile harç çubuklarının genleşme miktarı artmaktadır. Bu nedenle kullanımdan önce bu sonuçların, Le Chatelier, otoklav deneyleri ve beton örnekleri üzerinde yapılacak çalışmalarla kıyaslanması gereklidir.
- Bağlayıcı hamurların priz süreleri uçucu kül oranının artması ile artmaktadır. Ancak, süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı

halinde, priz süreleri su/çimento oranındaki düşme sebebiyle oldukça kısalmaktadır.

- Yüksek oranda uçucu kül kullanımı kütle betonu imalinde, sıcak havalarda beton dökümünde, taşıyıcı özellikten çok dayanıklılık özelliğinin ön planda tutulduğu deniz yapısı vb. yapılar için tavsiye edilebilir. Ancak bu tür betonun uzun süre ıslak küre olan ihtiyacı göz önünde bulundurulmalıdır. Farklı bir C sınıfı uçucu kül kullanımı halinde bu çalışmada elde edilen bulguların tamamen değişebileceği de dikkate alınmalıdır.

4. KAYNAKLAR

Baradan, B., Yazıcı, H, Ün, H. 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). 282. DEÜ. Müh. Fak. Yayın No: 298, DEÜ., İzmir.

Bilodeau, A., Sivasundaram, V., Painter K. E., Malhotra, V. M. 1994. Durability of Concrete Incorporating High Volume Fly Ash from Sources in The U.S., *ACI Mater J* 91, 3-12.

Bouzoubaa, N., Zhang M. H., Malhotra, V. M. 2000. Laboratory Produced High-Volume Fly Ash Blended Cements; Compressive Strength and

Resistance to the Chloride-ion Penetration of Concrete, *Cem. Concr. Res.* 30, 1037-1046.

Bouzoubaa, N., Zhang, M. H, Malhotra, V. M. 2001. Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with High-Volume Fly Ash Blended Cements Using a Coarse Fly Ash, *Cem. Concr. Res.* 31, 1393-1402.

Malhotra, V. M. 1986. Superplasticized Fly Ash Concrete For Structural Concrete Application, *Concr Int* 8 (28), 28-31.

Malhotra, V. M., Mehta, P. K. 2002. High Performance, High Volume Fly Ash Concrete 101 s. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa.

Ramezaniapour, A. A., Malhotra, V. M. 1995. Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume, *Cem. Concr. Comp.* 17, 125-133.

Sivasundaram, V., Currence, G. G., Malhotra, V. M. 1992. Concrete Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ashes: Mechanical Properties and Resistance to Deicing Salt-scaling and to Chloride-ion Penetration, *Am. Concr. Inst. SP* 132 (1), 319-349.