

İNCELIĞE BAĞLI OLARAK UÇUCU KÜLLÜ BETONLARIN SU İHTİYACINDAKİ DEĞİŞİM

Ahmet GÖKÇE
İnş. Y. Müh., Doktora Öğrencisi
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

Mehmet UYAN
Prof. Dr.
İ.T.Ü.
İstanbul, Türkiye

Erbil ÖZTEKİN
Prof. Dr.
Sakarya Üniversitesi
Sakarya, Türkiye

ÖZET

Çalışmada Seyitömer termik santralından üç ayrı incelikte uçucu kül sağlanmıştır. Tane büyüklüğünün medyan değeri sırası ile 22, 48 ve 82 mikron olmuştur. 300 kg/m³ çimento dozajlı şahit betonda, çimentonun yerine ağırlık cinsinden %10, %20 ve %30 uçucu kül ikame edilerek toplam 10 seri beton üretilmiş, betonun çökmesi sabit (12 ± 0.5 cm) tutulmuştur. Üretilen betonların sabit kıvam için gereksindikleri su miktarı belirlenmiş, birim ağırlıkları ölçülerek gerçek bileşimleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışmaların neticesinde, uçucu kül tanesi irileştikçe ve ikame oranı arttıkça betonun sabit işlenebilme için gereksindiği su miktarının arttığı, artış miktarının 19 kg'a (% 8) kadar çıktığı saptanmıştır. Bu çarpıcı ve paradoksal sonuç üzerine uçucu küller taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. İnceleme uçucu kül tanesinin irileştikçe dolu ve küresel yapıdan uzaklaşıp gelişigüzel bir biçime ve süngersi bir yapıya sahip olduğunu göstermiş, bu dönüşüm su ihtiyacında gözlenen değişimi açıklamıştır.

1.GİRİŞ

Betonun karıldıktan sonra yerine yerleştirilebilmesi için belirli bir işlenebilirlik düzeyini sağlaması gerekir. Bu düzeye betonun reolojik davranışına bağlı olarak ulaşılır ki bu davranış tüm bileşenlerden etkilenir. Bu nedenle bileşenlerden biri olarak kullanılan uçucu külün özelliklerinden optimum şekilde yararlanabilmek için uçucu külün taze beton

reolojisindeki rolünü iyi anlamak gerekir [1]. Konu ile ilgili bu güne kadar yapılmış olan çalışmalar uçucu kül inceliğinin bu rolde belirleyici unsurlardan biri olduğunu göstermiştir. Uçucu külün inceliği, uçucu küllü betonların su ihtiyacını etkileyen önemli bir faktördür.

Çoğunluğu 45 mikrondan ince olmakla birlikte uçucu kül tane boyutu aralığının 1 mikrondan daha ince, 150 mikrondan daha iri ölçülerde olduğu kabul edilmektedir [2]. Bir uçucu kül kaynağının tane boyutu dağılımı, elde edildiği termik santralin teknolojisi ile yakından ilgilidir. İri tane miktarı fazla olan uçucu küller ele alındığında bu tür uçucu küllerin mekanik yöntemlerle bloke edilmiş, eski termik santrallara ait atıklar olduğu dikkati çekmektedir [3]. Şimdilerde ise mevcut uçucu küllerin çoğu yanmanın yüksek randımanla gerçekleştiği, kömürü toz halinde öğütme ekipmanına sahip, tanelerin daha ince ve homojen olarak tutulduğu elektrostatik filtreli termik santrallardan elde edilmektedir. Bir termik santralin kullanılan kömür kaynağında, kömür işleme, öğütme ve yakma tekniklerinde önemli değişiklikler olmadığı takdirde o termik santraldan elde edilen uçucu külün inceliği de hemen hemen sabit kalacaktır [3].

Genel olarak puzolan olarak betonda kullanılmaya namzet bir uçucu külün kullanıma uygunluğu, taneciklerinin yüzde olarak belirli bir çoğunluğunun 45 mikronluk elek altına geçip geçmediğine bakılarak değerlendirilmektedir. Bazı ülkelerin 45 mikronluk elek üstünde olabilecek maksimum kalıntı miktarı için standart olarak tayin ettikleri değerler yüzde olarak aşağıdaki gibidir [1]:

Almanya	50
Avustralya	50
Amerika	34
Kanada	34
Japonya	25
İspanya	14
İngiltere	12.5

Bu araştırmada uçucu kül katılmış betonun su ihtiyacındaki değişimin uçucu külün inceliğine bağlı olarak incelenmesi planlanmıştır. Literatürde bu konuda yapılmış araştırmalar sınırlı kalmış, elde edilen sonuçlar da çelişkiler göstermiştir. Uçucu külün

özellikleri kaynaktan kaynağa büyük farklılıklar gösterdiğinden tam anlamıyla ortak ve net bir yargıya varılamasa da yeterince ince, pürüzsüz ve küresel biçimdeki taneciklerin kayganlaştırıcı bir etkiye sahip oldukları var sayılarak (Lubricant Effect) belirli çoğunlukta bu tür tanecikleri içeren uçucu küllerin su ihtiyacını azaltıcı bir tesire sahip olduklarına dayanan bir kanı hakimdir. Araştırmada kullanılan Seyitömer Termik Santralı uçucu külü ile ilgili elde edilmiş sonuçların aynı sınıf tüm Türkiye uçucu küllerine maledilemeyeceğini ve bu tür çalışmaların diğer uçucu kül kaynakları için de yapılarak her kaynağın kendi çerçevesi içinde değerlendirilmesi gerektiğini belirtmekte fayda vardır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. KULLANILAN MALZEMELER

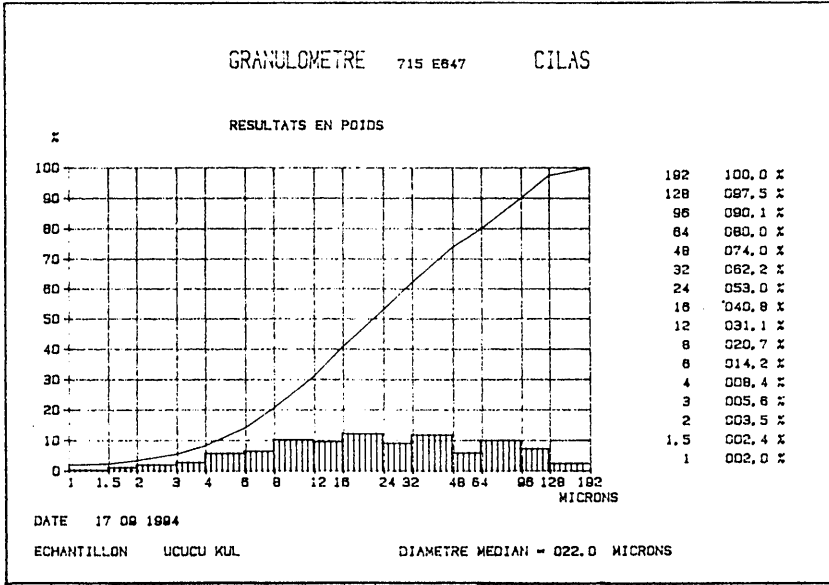
2.1.1. Uçucu Kül ve Çimento

Deneyisel çalışmalarda kullanılan uçucu küller Seyitömer termik santralından elde edilmiştir. Deneyisel sonuçları etkileyebilecek faktörleri en aza indirmek amacıyla uçucu kül numuneleri Seyitömer'e gidilerek kaynağından temin edilmiştir.

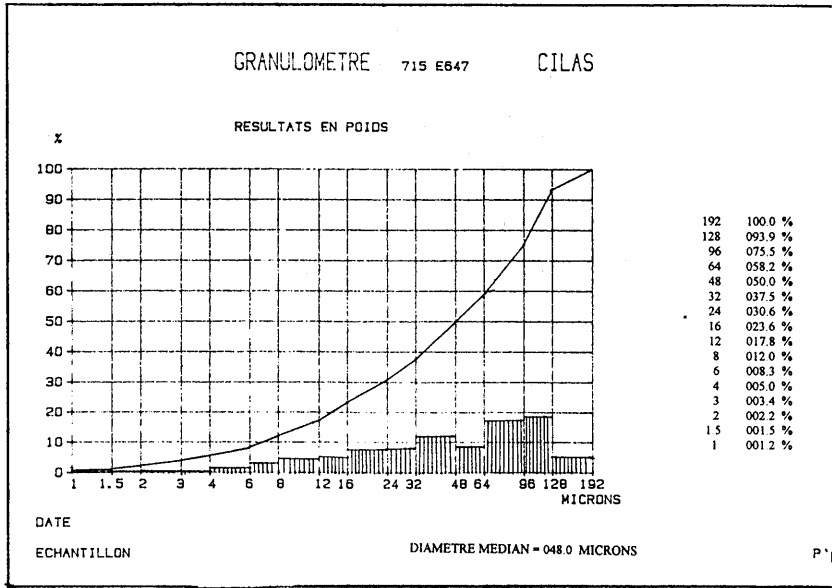
Termik santralin yanma kamarasında brülörden püskürtülerek yakılan kömürün külü ya büyük parçacıklar halinde aşağıya çökmekte ya da ince parçacıklar halinde yanma gazlarıyla sürüklenerek elektrofiltrelere gelmektedir. Uçucu kül önce ön filtre olarak adlandırılan I nolu filtreden geçmektedir. I nolu filtrede tutulamayan ve sürüklenmeye devam eden kül parçacıkları II nolu filtrede bloke edilmektedir. Bu son kademede tutulan küller bunkerlerde biriktirilmektedir. Farklı inceliklerde uçucu kül numuneleri elde etmek amacıyla öncelikle bunkerlerde hazır olarak bulunan II nolu filtrede tutulmuş ince uçucu kül temin edilmiştir. Daha iri numune elde etmek için I nolu ön filtrede tutulan kül parçacıkları hat üzerindeki bir tahliye vanası vasıtası ile dışarıya tahliye edilmiştir. Laboratuvarında yapılan analizlerde iri gruba ait tanelerin 1 mm den daha küçük çapta olduğu saptanmıştır. Makul bir incelik elde etmek amacıyla iri uçucu kül numuneleri eleme işlemine tabi tutulmuş ve deneyisel çalışmalarda elek altına geçen kısım kullanılmıştır. Yaş yöntemle yapılan granülometri analizinde elek altı uçucu kül numunesinin %100'ünün 192 μm 'nin altında olduğu saptanmıştır. Granülometriyi belirleyen cihaz iri uçucu kül için medyan değerini 82

μm olarak tayin etmiştir. İnce numune grubunun medyan değeri ise $22 \mu\text{m}$ 'dir. Üçüncü bir grup uçucu kül de ince ile iri külün bire bir oranda karıştırılması ile elde edilmiştir. Bu karışımın medyan değeri $48 \mu\text{m}$ olmuştur. İnceliklerine göre sınıflandırılmış uçucu kül gruplarına ait granülometrik eğrileri ve yüzdeleri içeren veriler Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3' de gösterilmiştir.

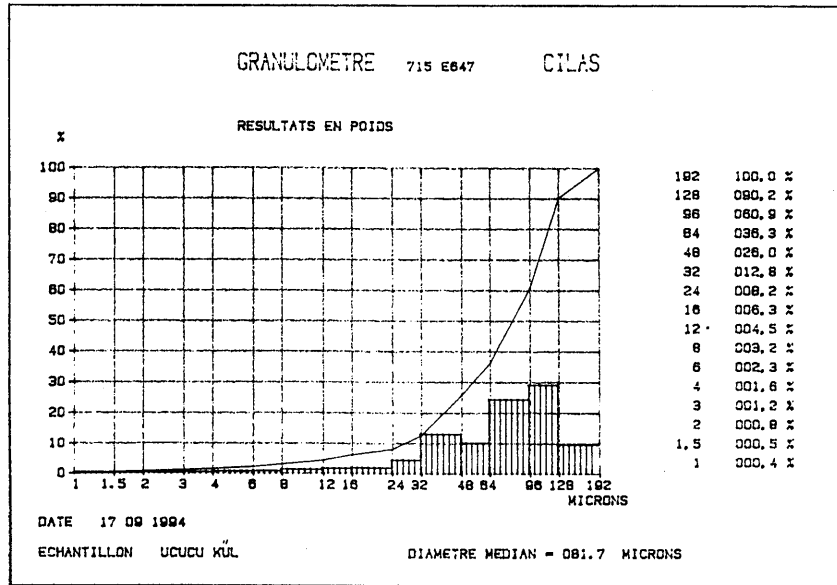
Uçucu kül numunelerinin kimyasal bileşimlerinin analizi Aslan Çimento fabrikasında yapılmıştır. Çalışmada kullanılan PÇ 32.5 cinsi çimento Büyükçekmece Akçimento fabrikasından temin edilmiştir. Uçucu küller ve çimentonun kimyasal bileşimleri ile ilgili veriler Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İnce Uçucu Küle Ait Granülometrik Analiz



Şekil 2. Orta İncelikteki Uçucu Küle ait Granülometrik Analiz



Şekil 3. İri Uçucu Küle ait Granülometrik Analiz

214

Tablo 1. Uçucu Kül ve Çimento Numunelerinin Kimyasal Kompozisyonları

Bileşen (%)	PÇ 32.5	İnce U. Kül	Orta U. Kül	İri U. Kül	TS 639 Sınırları
Çözünmeyen Kalıntı	0.65	—	—	—	—
SiO ₂	21.21	48.13	50.75	53.37	—
Al ₂ O ₃	5.55	14.64	15.10	15.55	—
Fe ₂ O ₃	3.31	12.13	12.92	13.70	—
S+A+F	—	74.90	78.76	82.62	>70
CaO	64.16	9.52	8.67	7.82	—
MgO	1.15	5.70	5.11	4.52	<5
SO ₃	2.66	4.32	2.44	0.56	<5
Na ₂ O	—	0.50	0.47	0.44	—
K ₂ O	—	2.00	1.69	1.38	—
Kızdırma Kaybı	0.98	2.36	2.85	3.33	<10

2.1.2. Agregalar

Agrega maksimum tane çapı 16 mm olarak seçilmiştir. Kırmataş II, kırmataş I, kırma kum ve doğal deniz kumu olmak üzere dört çeşit agrega kullanılmıştır. Bu agregalara ait granülometrik bileşimler ile agrega özgül ağırlık değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Agregaların granülometrik bileşimleri ve özgül ağırlık değerleri

Elek boyutu (mm)	Elekten Geçen Malzeme (%)							Özgül Ağırlık (kg/dm ³)
	16	8	4	2	1	0.5	0.25	
Kırmataş II	100	19	5	3	2	2	1	2.66
Kırmataş I	100	74	20	7	6	5	4	2.71
Kırma kum	100	100	99	65	43	24	9	2.70
Doğal kum	100	100	100	97	96	91	16	2.63
Karışım	100	73	49	37	33	29	7	

2.2. Üretilen Betonların Özellikleri

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmada biri kontrol (uçucu külsüz) , üçü ince uçucu kül içeren , üçü orta incelikte uçucu kül içeren , üçü de iri uçucu kül içeren seri olmak üzere toplam 10 seri beton üretilmiştir. Her incelikte %10, %20 ve %30 olmak üzere üç ayrı uçucu kül ikame oranı ile çalışılmıştır. Kontrol betonu için çimento dozajı ve uçucu küllü betonlar için toplam bağlayıcı miktarı 300 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Çimento ile yer değiştiren uçucu küllün (ağırlıkça) çimentoya göre daha fazla hacim kaplaması sebebiyle bu hacim fazlalığı kum hacmi kısıtlanarak dengelenmiştir. Deneylerde kimyasal katkı kullanılmamıştır. Üretilen 10 seri betona ait gerçek bileşimler Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 3. Üretilen betonlara ait gerçek bileşimler

Seri no	Çimento	Uçucu Kül			Agrega				Su
	Miktar (kg)	İkame Oranı (%)	Grup	Miktar (kg)	Kt II (kg)	Kt I (kg)	K. Kum (kg)	D. Kum (kg)	Miktar (kg)
1	300	0	—	0	359	721	273	443	228
2	270	10	İnce	30	360	720	273	428	232
3	241	20	İnce	60	358	719	273	409	232
4	210	30	İnce	90	356	715	271	390	237
5	272	10	Orta	30	358	719	273	421	232
6	240	20	Orta	60	355	713	270	396	236
7	210	30	Orta	90	352	709	270	373	244
8	272	10	İri	30	358	720	273	414	232
9	239	20	İri	60	350	704	267	375	241
10	211	30	İri	90	352	707	266	345	251

2.3. Deneysel Yöntem

Beton üretimleri gerçekleştirilirken kıvam sabit tutularak $12 \pm 0.5 \text{ cm}$ ’lik çökme değerinde çalışılmıştır. Üretilen her seri için miktarca 30 litre betona karşılık malzeme kullanılmıştır.

Her serinin istenilen sabit işlenebilirlik için su ihtiyacını tespit etmek amacıyla karıştırma esnasında su azar azar katılmış, hedeflenen çökme değerini aşmamak için çökme deneyi gerektiğinde tekrarlanmış ve bu deneye hedeflenen çökme değerine 0.5 cm toleransla ulaşmaya kadar devam edilmiştir. Su ihtiyacı karşılanan karışımların birim ağırlık değerleri ölçülmüştür.

3. DENEY SONUÇLARI

Üretilen serilerin sabit işlenebilirlik için ihtiyaç duydukları su miktarlarını ve diğer taze beton özelliklerini içeren deney sonuçları Tablo 4’de gösterilmiştir.

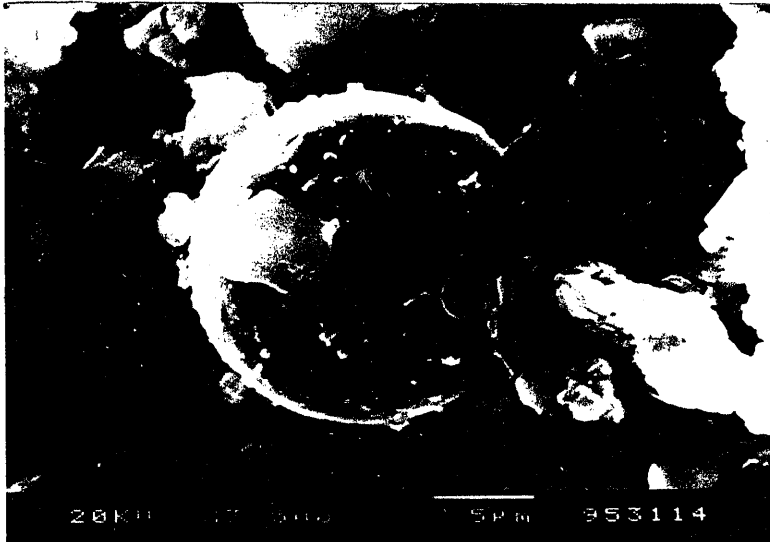
Tablo 4. Betonların sabit işlenebilirlik için ihtiyaç duydukları su miktarları ve diğer taze beton özellikleri

Seri no	U. Kül Grubu	U.K. İkame Yüzdesi (%)	Su İhtiyacı (kg/m ³)	Çökme (cm)	Su/Toplam Bağlayıcı Malzeme	Birim Ağırlık (kg/m ³)
1	—	0	228	12	0.76	2324
2	İnce	10	232	11.5	0.77	2313
3	Orta	10	232	11.5	0.77	2305
4	İri	10	232	11.5	0.77	2299
5	İnce	20	232	12	0.77	2292
6	Orta	20	236	11.5	0.79	2270
7	İri	20	241	12.5	0.81	2236
8	İnce	30	237	12	0.79	2269
9	Orta	30	244	12	0.81	2248
10	İri	30	251	12	0.83	2222

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Tablo 4’de görüldüğü gibi karışım suyuna en az ihtiyaç duyan üretim kontrol betonu olmuştur. Uçucu kül ikamesi, ikame yüzdesine ve uçucu külün inceliğine bağlı olarak su ihtiyacını artırmıştır. %10 nispetinde uçucu kül ikame edilen serilerde su ihtiyacı aynı olmuştur. Bunun ötesindeki ikame oranlarında ikame oranı ve irilik arttıkça işlenebilirlik

için gerekli su miktarı da artmıştır. %10 oranında ince uçucu kül ikame edilen beton ile %30 oranında iri uçucu kül ikame edilen betonun sabit kıvam için ihtiyaç duydukları su miktarları arasında 19 kg'a (%8) varan bir fark ortaya çıkmıştır. Çalışmanın başındaki tane küçüldükçe artan yüzey alanına bağlı olarak su ihtiyacının daha fazla olması gerekeceği kanısını desteklemeyen bu çarpıcı ve paradoksal sonuç , üzerinde düşünölmeye değör bulunmuştur. Uçucu külün irileşmesi ile kullanıldığı karışımın daha fazla suya ihtiyaç duymasının makul bir açıklamasını yapabilmek için uçucu kül taneciklerinin fiziksel özelliklerinin daha kapsamlı olarak aydınlatılması gerektiği düşünölmüştür. Bu düşünöceden yola çıkarak ince ve iri uçucu kül numunelerinin taramalı elektron mikroskobu altında büyöültölmüş görüntöleri elde edilmiş ve bu görüntöler ışığında iri uçucu külün inceye göre neden daha fazla su ihtiyacına sebep olduğu açıklanabilmiştir. Şekil 4'de göröldüğü gibi ince uçucu kül taneleri küresel forma sahiptir. Uçucu kül taneleri irileştikçe bu dolu ve küresel formu kaybedip gelişigözel, şekilsiz ve poroz bir yapıya dönöşmektedirler.

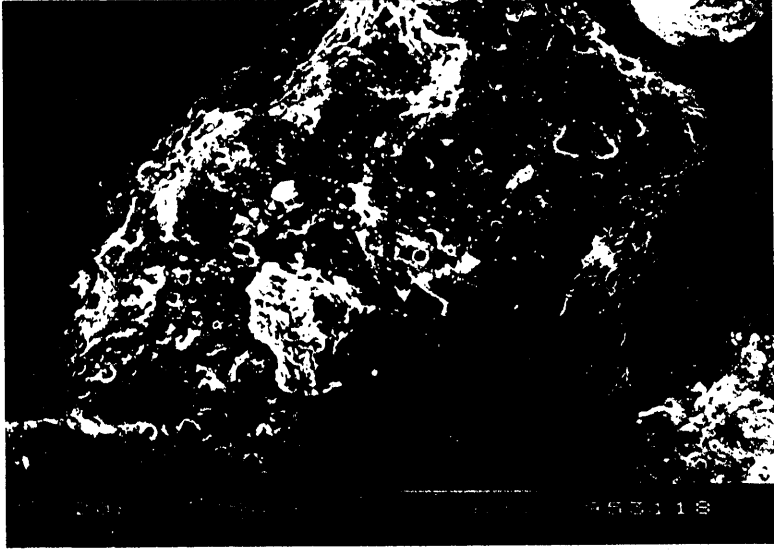


Şekil 4. İnce Uçucu Kül Tanelerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Tipik Görüntüsüne Ait Resim

Mora ve arkadaşlarının ifade ettiğı gibi [4] tanelerin birbiri üzerindeki kayganlaştırıcı, hareket etmeyi kolaylaştırıcı etkisi uçucu külün küresel forma sahip olması halinde söz konusudur. Araştırmacılar, uçucu küllü harçlar üzerinde yaptıkları çalışmada uçucu kül tanelerinin ortalama çapı azaldığında harç akışkanlığının arttığını gözlemişlerdir. Yani belirli

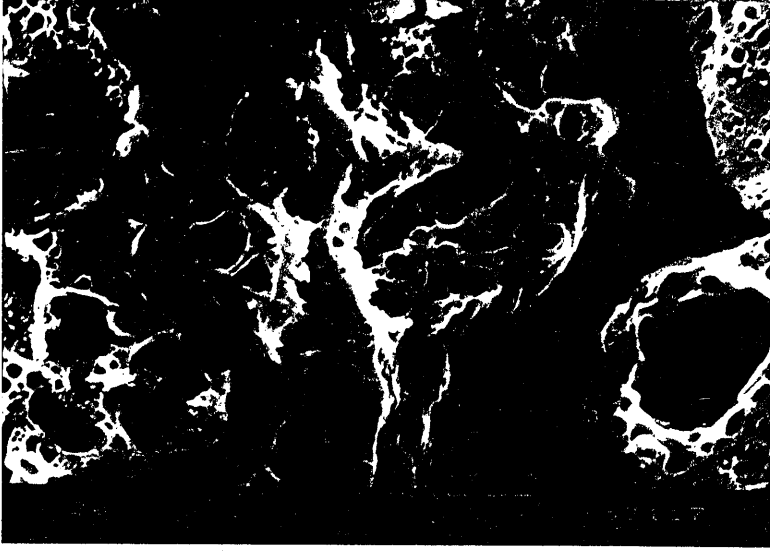
bir limitin üzerinde iriliğe sahip uçucu kül tanelerinin işlenebilirliğe bir katkıları olmadığını saptamışlardır. Diğer yandan Mora ve arkadaşları çok ince tanelerin ($<10\ \mu\text{m}$) yüzde olarak belirli bir çokluğa sahip olduklarında zıt bir tesirle su ihtiyacını artırdıklarını öne sürmüşler, bunun da sebebini bu çok ince tanelerin yüzeylerinde su tutarak küresel tanelerin kayganlaştırıcı tesirini etkisiz hale getirdikleri şeklinde açıklamışlardır.

İri uçucu kül tanelerinin tipik fiziksel yapısını temsil eden resim Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5. İri Uçucu Kül Taneciklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Tipik Görüntüsüne ait Resim

İri uçucu kül tanelerinin elektron mikroskobu altında daha büyütülmüş görüntüleri incelendiğinde görünen boşluklu yapıların, süngersi dokuların doğal olarak su ihtiyacını artırıcı nitelikte oldukları açıkça belli olmaktadır. Uçucu külün süngersi dokusunu yansıtan resim Şekil 6’da gösterilmiştir. Kim ve arkadaşları [5], yüksek mukavemetli beton üretiminde % 10’un ötesindeki ikame oranlarında kullanılan uçucu külün sabit çökme değerinde su ihtiyacını artırdığını gözlemişler ve yukarıdaki tespite paralel olarak onlar da buna, kullandıkları uçucu kül tanelerinin pürüzlü yüzeyinin ve boşluklu yapısının neden olduğunu ileri sürmüşlerdir.



Şekil 6. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Çekilmiş İri Uçucu Külün Süngersi Dokusunu Gösteren bir Resim

Malhotra ve Ramezaniyanpour'un [1] uçucu kül tanelerinin küresel ve yuvarlak biçimde oldukları aralığın 1 ila 150 mikron arasında değişkenlik gösterdiğini, şekilsiz, gelişigüzel ve köşeli tanelerin genelde daha iri taneler olduğunu öne sürmeleri de yukarıda yapılan değerlendirmeleri desteklemektedir.

Akman ve arkadaşlarının [6], uçucu kül tane boyutunun işlenebilirlik üzerindeki etkisi ile ilgili yapılmış olan bazı çalışmalara dayalı olarak yaptığı sentezde, işlenebilmeyi artıran uçucu külün tane sınırlarının 10 μm ~ 45 μm arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan farklı inceliklerdeki uçucu kül grupları söz konusu kritere göre ele alındığında :

İnce uçucu külde 12 μm ~ 48 μm arasındaki tane miktarı	: %43
Orta incelikteki uçucu külde 12 μm ~ 48 μm arasındaki tane miktarı	: %32
İri uçucu külde 12 μm ~ 48 μm arasındaki tane miktarı	: %22

İşlenebilirliğin inceden iriye doğru olumsuz olarak daha çok etkilenmesi gerektiği sonucu ortaya çıkar ki bu yaklaşım da deneysel sonuçlar ile yapılan yorumlara uygunluk gösterir.

Buna karşın , Ukita ve arkadaşları [7] üç farklı tane boyutu grubuna ayrılmış bir uçucu kül ile maksimum tane çapı 10 μm ve özgül yüzeyi 7670 cm^2/gr olan tane grubu için ürettikleri betonlarda bu tane boyutu aralığında uçucu külün işlenebilmeyi iyileştirdiğini, betonda su ihtiyacını azalttığını gözlemişlerdir.

5. SONUÇLAR

Farklı ikame oranları için uçucu kül inceliğinin taze betonun su ihtiyacı üzerindeki etkileri ile ilgili aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Uçucu kül irileştikçe ve ikame oranı arttıkça taze betonun su ihtiyacı artmaktadır.
- %10 ikame oranında farklı inceliklerde uçucu kül içeren serilerin su ihtiyaçları aynı olmuştur. %10 gibi düşük ikame oranlarında taze betonun su ihtiyacına incelik faktörünün etkisi görülmemektedir. İkame oranı arttıkça etki daha bariz olarak ortaya çıkmaktadır.
- Uçucu külün irileştikçe su ihtiyacını artırmasının ana sebebi tanelerinin fiziksel yapısından kaynaklanmaktadır. Taramalı elektron mikroskobundan elde edilen görüntülere göre ince uçucu kül tanesi bilinen tipik küresel ve dolu yapıya sahiptir. Uçucu kül tanesi irileştikçe bu küresel ve dolu yapısını kaybetmekte ve buna bağlı olarak tanelerin birbiri üzerindeki kayganlaştırıcı etkisi de azalmaktadır. Şekilsiz, gelişigüzel ve süngersi bir yapıya sahip olduğu görülen iri taneli uçucu külün taze betonda iç sürtünmeyi ve su ihtiyacını artırıcı özelliğe sahip olması doğaldır.

KAYNAKLAR

1. Malhotra, V.M., and Ramezaniapour, A.A., Fly Ash in Concrete, CANMET, Ottawa, September 1994, pp. 43.
2. Malhotra, V.M. Editor , Supplementary Cementing Materials for Concrete, CANMET, Ottawa, 1987, pp. 37.
3. ACI Committee 226, "Use of Fly Ash in Concrete", ACI Materials Journal, September-October 1987, pp. 385.
4. Mora, E.P., Paya, J., and Monzo, J., "Influence of Different Sized Fractions of A Fly Ash on Workability of Mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 23, No. 4, pp. 917-924.
5. Kim, J.K., Park, Y.D., Sung, K.Y., and Lee, S.G., "The Production of High Strength Fly Ash Concrete in Korea", Fourth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Supplementary Papers, 1992, pp. 112-113.
6. Akman, M.S., Öztekin, E., ve Erdiñ, M., "Düşük Çimento Dozajlı ve Uçucu Kül Katkılı Hazır Betonlarda Dayanım ve Dayanıklılık", 3. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 1994, ss. 303.
7. Ukita, K., Ishii, M., Yamamoto, K., Azuma, K., and Kohno, K., "Properties of High Strength Concrete Using Classified Fly Ash", Fourth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Vol. 1, 1992, pp. 37-52

