

I. Gün
12 Nisan 2007 • Perşembe

III. Oturum

Oturum Başkanı:
Doç. Dr. Yılmaz AKKAYA

SU/İNCE MALZEME ORANI VE ÇELİK LİF DAYANIMININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN REOLOJİK VE MEKANİK DAVRANIŞLARINA ETKİLERİ

Burak YILMAZ

İnşaat Mühendisi

Alihan DİNÇ

İnşaat Mühendisi

Cengiz ŞENGÜL

İnşaat Yüksek Mühendisi

Yılmaz AKKAYA

Doç. Dr.

e-mail: akkayayil1@itu.edu.tr

Mehmet Ali TAŞDEMİR

Prof. Dr.

e-mail: tasdemir@itu.edu.tr

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi
İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma kapsamında sabit hacimsel 0,52 su/pudra oranlı 5 farklı su/çimento oranına sahip kendiliğinden yerleşen betonlar üretilmiştir. Karışımlarda, öğütülmüş silis unu çimento ile kısmen yer değiştirilmiştir. Daha sonra kendiliğinden yerleşen bu betonlara çekme dayanımları farklı olan çelik lifler %1 oranında eklenmiştir. Su/ince malzeme oranı sabitken artan su/çimento oranının betonun reolojik ve mekanik davranışlarına etkisi araştırılmıştır.

DeneySEL çalışmaların sonucunda lifsiz karışımlarda su/çimento oranının 0,24'den 0,38 değerine artmasına ve çimento dozajının azalmasına karşın basınç dayanımı ve elastisite modüllerinde belirgin bir düşüş gözlenmemiştir. Bu özeliğin düşük ve yüksek dayanımlı lif içeren karışımlarda da benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca lif eklenmesi ile enerji yutma kapasitelerinde 13 ila 68 kat arasında artış olmuştur. Öte yandan çelik lif içeren betonlardan su/çimento oranının 0,63 değerine sahip karışımlarda, kendiliğinden yerleşme özeliği ortadan kalkmıştır.

GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kendi ağırlığı altında vibrasyona gerek duymadan kalıba yerleşen ve sıkışan beton olarak tanımlanmaktadır. KYB'ler içerik olarak geleneksel betonlara göre oldukça farklılık gösterir. Kullanılan süperakışkanlaştırıcılar sayesinde taze beton akışkanlık kazanırken, ince malzemenin fazla tutulması ve viskozite artırıcı katkıların kullanılmasıyla KYB'de ayrışmaya karşı direnç sağlanır. KYB'nin akışkanlık özeliği, viskozimetre ile yapılan deneylerde kayma hareketinin başladığı minimum kayma gerilmesi olarak tanımlanan kayma eşiğinin küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu özeliğin su miktarının artırılarak sağlanması ayrışmaya sebep olabilir, bu nedenle KYB'lerde su miktarı çok önemlidir. Ayrıca KYB'ler genelinde düşük su/çimento oranlarına sahip olduklarından dolayı yüksek dayanım sergileyen özel betonlardır [1,2].

Günümüzde çelik liflerin ve 125 mikrondan daha ince mikrofiller malzemelerin kullanılması yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonların gelişimine katkı sağlamaktadır. Mikrofiller malzemelerin artışı ile birlikte iri agregalar arasındaki mesafe artmakta ve içsel sürtünme azalmaktadır. Agregaların akış sırasında kenetlenmesinin önüne geçilerek akıcılık artmakta ve reolojik özellikler olumlu yönde etkilenmektedir. İşlenebilirlikteki gelişmeye ek olarak gerçekleşen ve bu çalışma kapsamında araştırılan basınç dayanımlarındaki gelişim ise incelenmekte olan bir araştırma konusudur. Kassel Üniversitesi'nde ve 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yapılan iki farklı çalışmada, sabit hacimsel su/pudra oranlarında çimento ile ince malzemenin hacimce yer değiştirmesi sırasında, su/çimento oranının 0,38 değerine kadar artmasına rağmen basınç dayanımının aynı seviyede kaldığı görülmüştür. İncelenen hacimsel su/pudra oranı yöntemi, bağlayıcı maddenin etkin kullanılması kavramına yeni bir boyut getirmekle birlikte reolojik ve mekanik özelliklerle ilgi yeni etkileşim alanları yaratmaktadır [3-6].

AMAÇ

Mevcut çalışmada sabit hacimsel su/pudra oranına sahip kendiliğinden yerleşen betonlarda karışıma giren toplam su sabitken, öğütülmüş silis ununun çimento ile kısmen yer değiştirmesinin ve çekme dayanımları farklı çelik liflerin karışıma eklenmesinin betonun akış yeteneği, mekanik özellikleri ve enerji yutma yeteneği üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

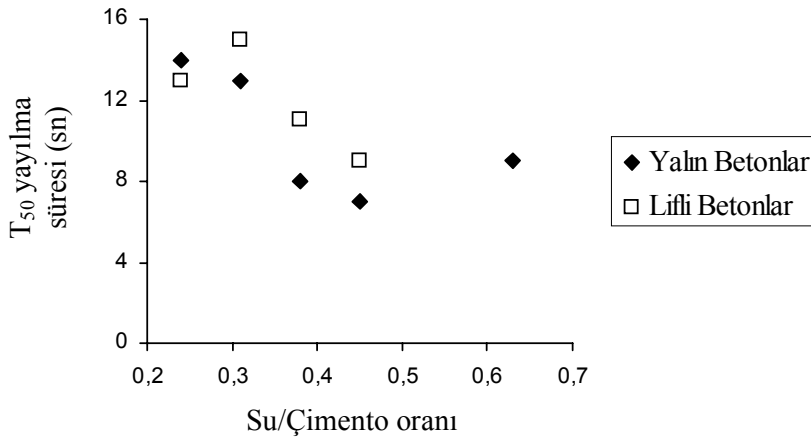
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada 5'i lif içermeyen, 5'i bağıl olarak düşük dayanımlı lif içeren 5'i de yüksek dayanımlı lif içeren toplam 15 farklı beton üretilmiştir. Hacimce su/ince malzeme oranı 0,52 değerinde sabit tutulmuş, öğütülmüş silis unu çimento ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. Yer değiştirme sırasında karışıma giren toplam su miktarı sabit tutulduğu için su/çimento oranı, 833 kg/m³ çimento içeren numunelerde 0,24 değerinde iken 645 kg/m³ dozajlı karışımlarda 0,31, 645 kg/m³ dozajlı numunelerde 0,38, 444 kg/m³ dozajlı numunelerde 0,45 ve 318 kg/m³ dozajlı numunelerde ise 0,63 değerine ulaşmıştır. Çelik lif oranı toplam hacmin %1'i olarak belirlenmiş, tüm lifli karışımlar için aynı oran kullanılmıştır. Üretilen 15 farklı betonun belirlenen kodlamasında ilk bölüm karışımın lif içeriğini ve lif türünü açıklamaktadır. N0 karışımın lif içermediğini, N1 düşük mukavemetli lif içerdiğini, N2 ise yüksek mukavemetli lif içerdiğini göstermektedir. Kodlamanın ikinci bölümü ise su/çimento oranını temsil etmektedir.

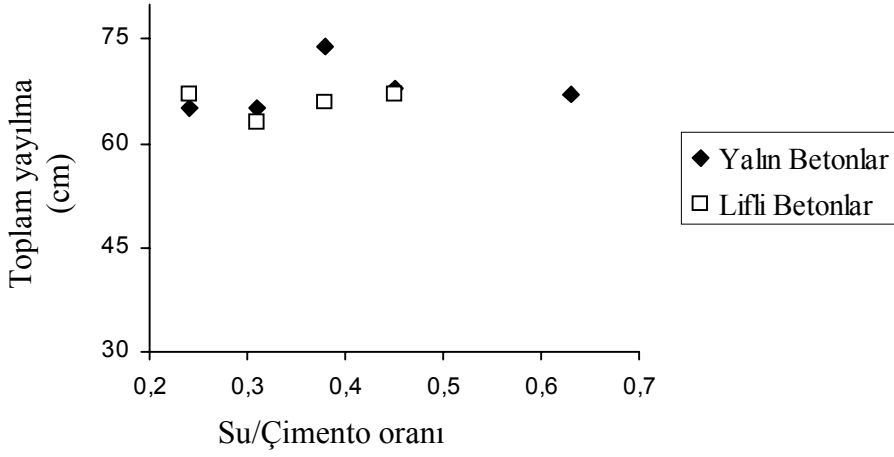
Taze Beton Deneyleri

Çökme-Yayılma Deneyi

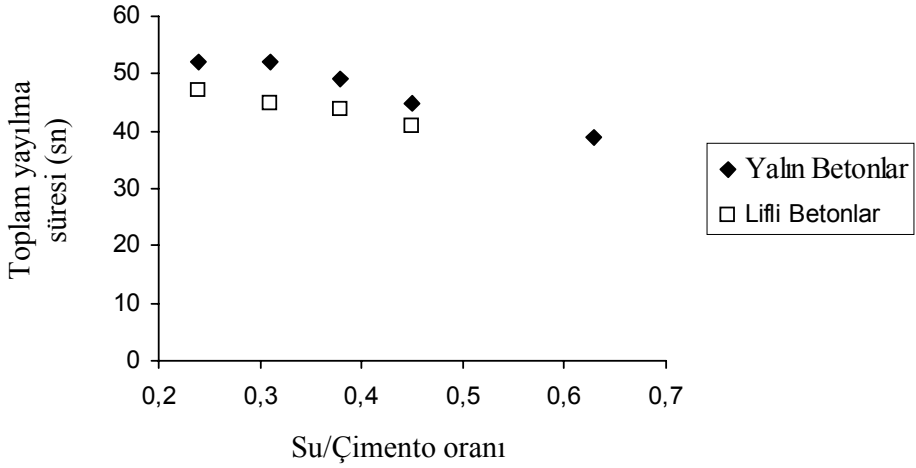
Çökme-Yayılma deneyinde 50cm çapındaki bir alana yayılma süresi ile toplam yayılma süresi ve yayılma çapı belirlenmiş deney sonuçları Şekil 1-3'de verilmiştir.



Şekil 1. Yalın ve lifli betonlarda T₅₀ süresinin su/çimento oranı ile değişimi



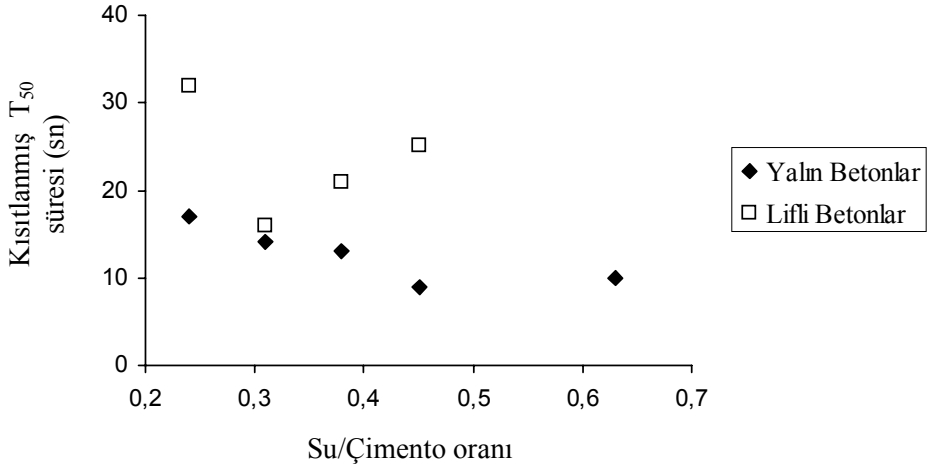
Şekil 2. Yalın ve lifli betonların toplam yayılma çaplarının su/çimento oranı ile değişimi



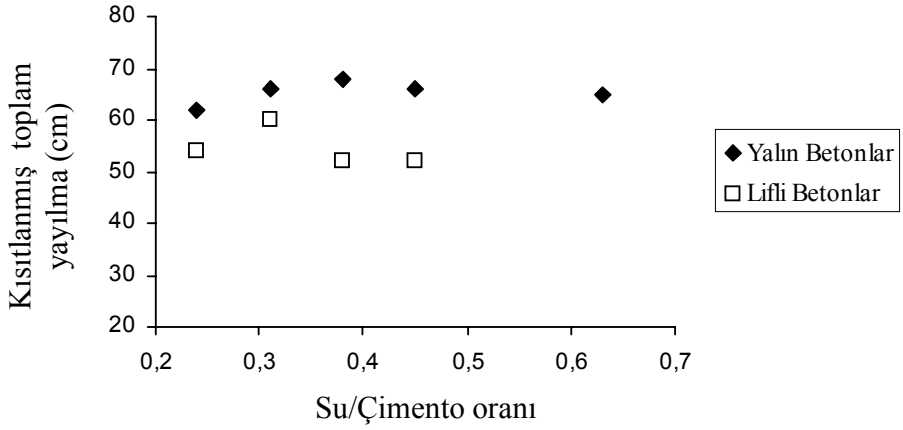
Şekil 3. Yalın ve lifli betonların toplam yayılma sürelerinin su/çimento oranı ile değişimi

Kısıtlanmış Yayılma Deneyi

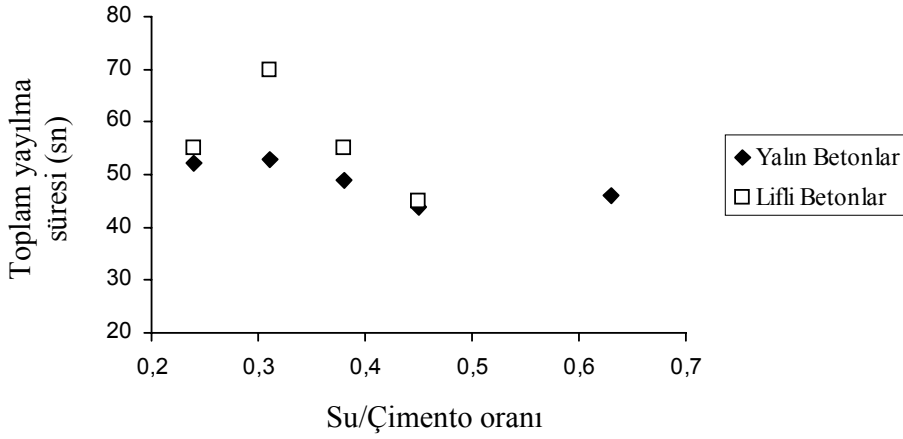
Kısıtlanmış yayılma deneyi [7] yapılarak kendiliğinden yerleşen betonların kendi ağırlıkları altında donatılar arasından geçiş yetenekleri incelenmiş, 50 cm çapındaki bir alana yayılma süresi ile toplam yayılma süresi ve yayılma çapı belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 4-6' da verilmiştir.



Şekil 4. Yalın ve lifli betonlarda kısıtlanmış T_{50} sürelerinin su/çimento oranı ile değişimi



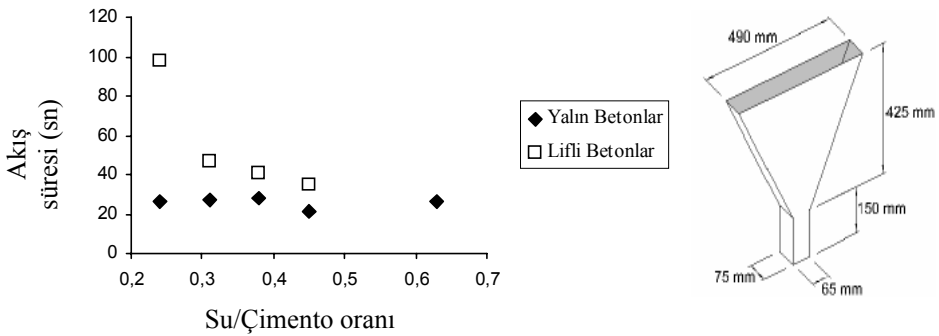
Şekil 5. Yalın ve lifli betonların kısıtlanmış toplam yayılma çaplarının su/çimento oranı ile değişimi



Şekil 6. Yalın ve lifli betonların kısıtlanmış toplam yayılma sürelerinin su/çimento oranı ile değişimi

V-Hunisi Deneyi

V-hunisi deneyi taze betonun, kendi ağırlığı altında dar bir kesitten geçebilme yeteneğini temsil eden bir deneydir. Bu bakımdan kısıtlanmış yayılma ve çökme-yayılma deneylerine göre farklılıklar gösterir. Taze betonun su/çimento oranına göre bu değişken kesitten geçme süresi ölçülmüştür. V-hunisi deney sonuçları Şekil 7’de verilmektedir.

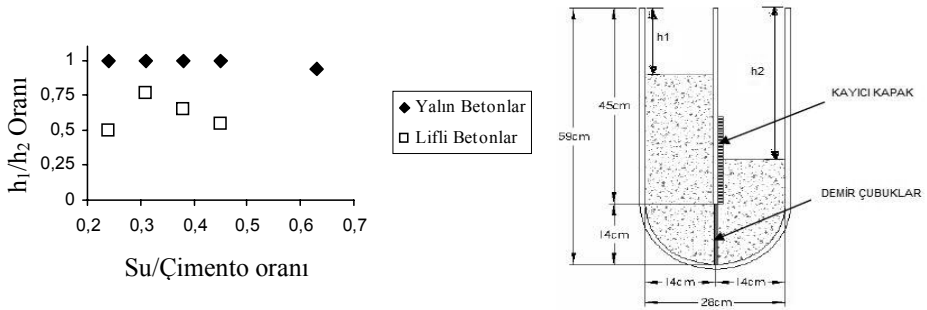


Şekil 7. Yalın ve lifli betonların V-hunisi akış sürelerinin su/çimento oranı ile değişimi

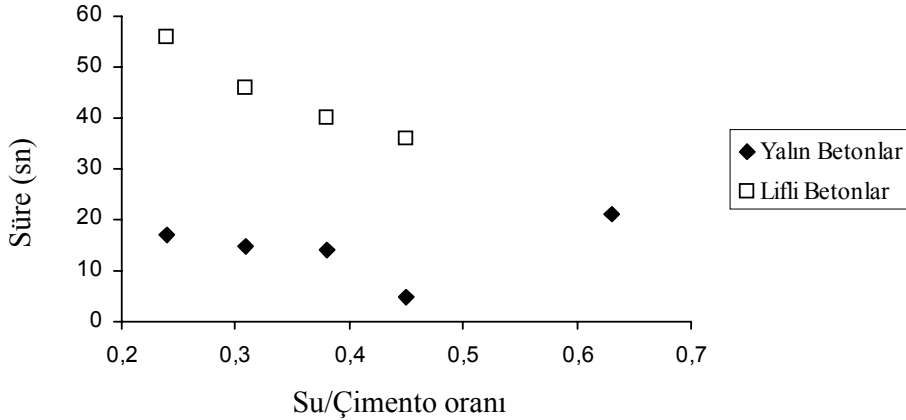
U-Kutusu Deneyi

U-kutusu deneyinde U ortadan bir bölmeyle ikiye ayrılmıştır. Bölmenin altında betonun diğer bölgeye geçmesini sağlayacak bir açıklık bulunur. Bu geçiş bölgesinde belli aralıklarla donatılar vardır. Deneyde bir bölüme

beton doldurulduktan sonra aradaki kapak açılır ve kendi ağırlığıyla alttan diğer bölüme doğru geçer. Bu çalışmada, veri olarak, betonun hareketini tamamlama süresi ve hareketini tamamladıktan sonra U-kutusunun iki tarafındaki beton yüzeyine olan mesafeler kullanılmıştır. Bu mesafeler, h_1 , betonun donatılar arasından geçerek doldurduğu taraftaki yüksekliği, h_2 , betonun U-kutu aletine konulan taraftaki yüksekliği olmak üzere ölçülmüş ve h_1/h_2 olarak oranlanmıştır. Deney sonuçları Şekil 8 ve 9'da verilmektedir.



Şekil 8. Yalın ve lifli betonların U-kutusu doldurma oranlarının su/çimento oranı ile değişimi



Şekil 9. Yalın ve lifli betonların U-kutusunun doldurma sürelerinin değişimi

Sertleşmiş Beton Deneyleri

Silindir Basınç Deneyi

Basınç deneyleri, çapı 100mm ve yüksekliği 200mm olan silindir numuneler üzerinde gerçekleştirildi. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde, maksimum yükün %33' üne kadar olan grafiğin eğiminden yararlanılarak elastisite

modülü hesaplandı. Basınç dayanımları ve elastisite modülü değerleri Tablo 1'de verilmektedir.

Yarma Deneyi

Yarma deneyleri, çapı 150mm ve yüksekliği 300 mm olan silindirik numunelerden kesilen 60mm yüksekliğindeki disk numuneler üzerinde yapıldı. Yarma-çekme dayanımları hesaplanırken (1) bağıntısı kullanıldı. Bu bağıntıda σ : Yarma-Çekme dayanımı (MPa), P: yük (N), D: Çap (mm), L: Yükseklik (mm) dir.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

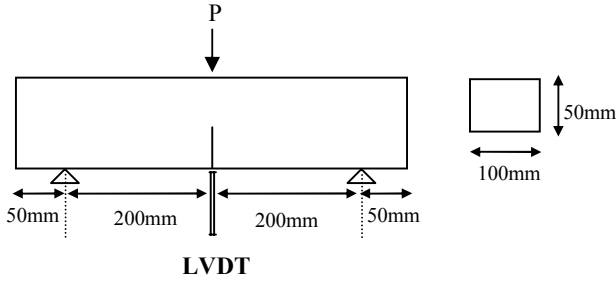
Deneylerde elde edilen yarma-çekme dayanımı değerleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Sertleşmiş Betonların Mekanik Özellikleri

Numune Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yarma-Çekme Dayanımı (MPa)
N0-0,24	113,7	47,7	8,3
N0-0,31	113,2	47,9	7,5
N0-0,38	113,0	47,7	7,5
N0-0,45	107,7	46,4	7,3
N0-0,63	88,0	42,5	7,0
N1-0,24	109,7	41,5	8,6
N1-0,31	108,7	41,7	9,0
N1-0,38	109,9	42,6	8,8
N1-0,45	100,6	40,2	8,5
N1-0,63	92,2	39,7	7,3
N2-0,24	131,9	47,9	11,1
N2-0,31	95,2	41,9	9,5
N2-0,38	98,3	44	9,2
N2-0,45	101,2	44,7	8,6
N2-0,63	86,8	42,2	8,4

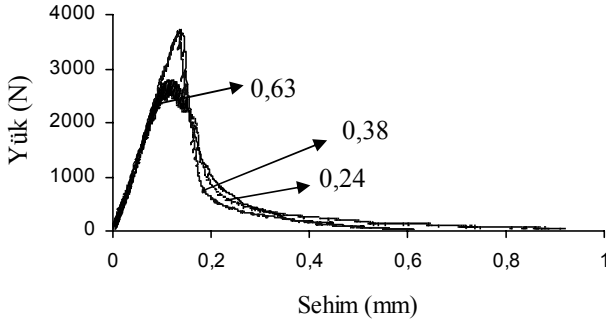
Kırılma Enerjisi Deneyi

Deformasyon kontrollü yapılan deneyler sonucunda yük-sehim eğrileri elde edilerek, eğilme dayanımında ve kırılma enerjisinde meydana gelen değişim incelendi. Kiriş numunelerin ortasından tekil yük uygulanarak yapılan deneylerde, numunenin etkin kesit alanı 100mm x 50mm olarak seçildi. Uygulanan üç noktalı eğilme deney düzeneği şekil 10'da gösterilmektedir.

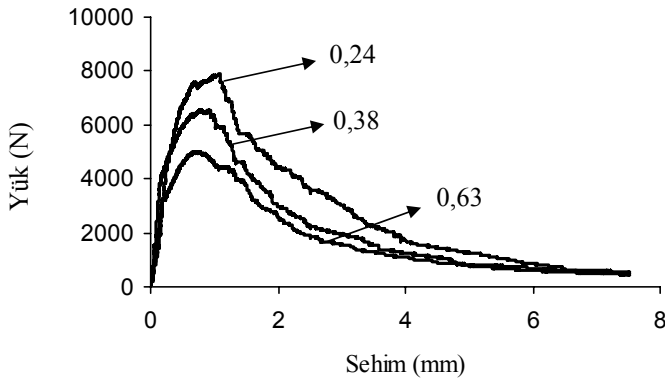


Şekil 10. Kırılma enerjisi deney düzeneği

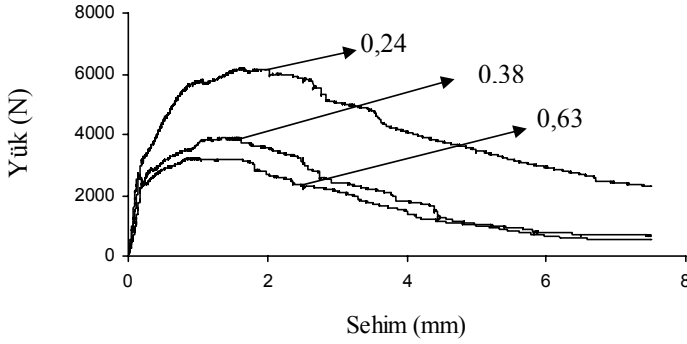
Deneyden önce numunelerin yan yüzeyine yapıştırılan levhaya sehim ölçmek amacı ile bir adet LVDT yerleştirildi. Bu deney düzeneği ile uygulanan yükler ve bu yüklerle karşı gelen sehim değerleri alıcılardan bilgisayara aktarılarak yük-sehim grafiklerine geçildi. Elde edilen yük-sehim eğrilerine ait tipik örnekler Şekil 11-16'da verilmektedir.



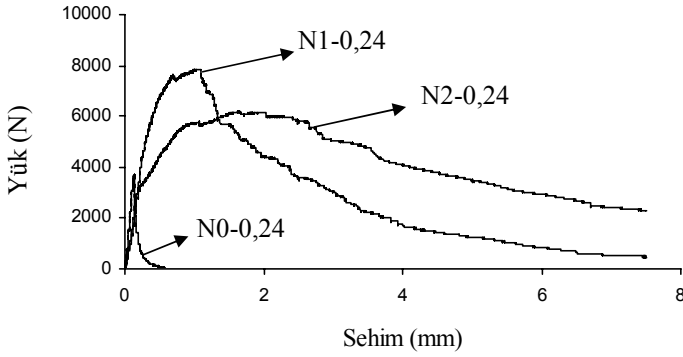
Şekil 11. 0,24, 0,38, 0,63 su/çimento oranına sahip yalın betonların tipik yük-sehim ilişkisi



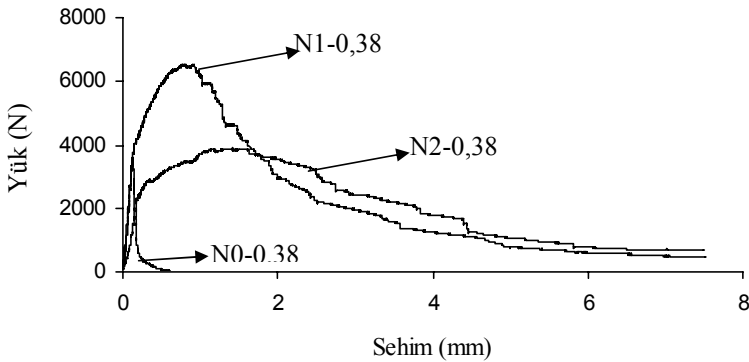
Şekil 12. 0,24, 0,38, 0,63 su/çimento oranına sahip normal dayanımlı lif içeren betonların tipik yük-sehim ilişkisi



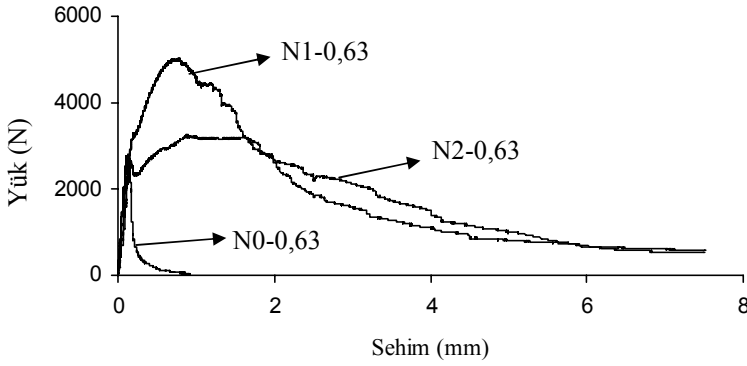
Şekil 13. 0,24, 0,38, 0,63 su/çimento oranına sahip yüksek dayanımlı lif içeren betonların tipik yük-sehim ilişkisi



Şekil 14. 0,24 su/çimento oranına sahip yalın ve lifli betonların tipik yük-sehim ilişkisi



Şekil 15. 0,38 su/çimento oranına sahip yalın ve lifli betonların tipik yük-sehim ilişkisi



Şekil 16. 0,63 su/çimento oranına sahip yalın ve lifli betonlarda tipik yük-sehim ilişkisi

Bu eğrilerin altında kalan alanlar hesaplanarak kırılma sürecinde harcanan enerji aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplandı.

$$G_F = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (2)$$

Burada, W_o : Yük-sehim eğrisi altında kalan alanı (Nm), m : Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığını (kg), g : Yer çekimi ivmesini, δ_o : Kirişin göçme sırasındaki son sehim değerini (m), A_{lig} : Etkin kesit alanını (m^2) temsil etmektedir. Numunelerin eğilme dayanımları (3) bağıntısı kullanılarak hesaplandı.

$$f_{net} = (3PL) / 2BD^2 \quad (3)$$

f_{net} : Net eğilme dayanımını, P : Kırılma yükünü (N), L : Mesnetler arası uzaklığı (mm), B : Numune kesitinin genişliğini (mm), D : Numune kesitinin yüksekliğini (mm) temsil etmektedir.

Tablo 2. Net eğilme dayanımları, karakteristik boylar ve kırılma enerjileri

Numune Kodu	Net Eğilme Dayanımı (MPa)	Karakteristik Boy (mm)	Özgül Kırılma Enerjisi (N/m)
N0-0,24	8,3	64	93
N0-0,31	7,8	73	87
N0-0,38	8,2	79	92
N0-0,45	7,6	92	106
N0-0,63	6,8	96	108
N1-0,24	17,8	2357	4210
N1-0,31	13,5	1576	3082
N1-0,38	15,3	2109	3877
N1-0,45	10,6	1304	2360
N1-0,63	6,5	1006	1358
N2-0,24	14,6	2474	6374
N2-0,31	9,2	1388	2968
N2-0,38	9,7	1829	3481
N2-0,45	10,2	1815	3002
N2-0,63	8,1	1786	2966

Numunelerin karakteristik boyları (4) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$l_{ch} = (EG_F) / f_t^2 \quad (4)$$

l_{ch} = Numunenin karakteristik boyunu (mm), E: Elastisite modülünü (MPa), G_F : Özgül kırılma enerjisini (N/m), f_t : Yarma-çekme dayanımını temsil etmektedir. Deneyler sonucunda hesaplanan değerler Tablo 2’de verilmektedir.

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çökme-Yayılma Deneyi Sonuçları

Şekil 1, 2 ve 3’de görüldüğü gibi çökme-yayılma deney sonuçlarına göre lifsiz karışımlar için su/çimento oranı arttıkça T_{50} süresinin azaldığı gözlenmektedir. Lif içermeyen numunelerde 0,24 su/çimento oranlı karışımın yüksek viskoz karakterinden dolayı T_{50} süresi diğer karışımlardan yüksektir. Lifsiz bileşimlerde 0,45 su/çimento oranından sonra T_{50} süresinin artma eğiliminde olduğu gözlenmektedir. Bu durumda deneysel yolla belirlenebilecek optimum su/çimento değerleri aşıldığında, artan su/çimento oranı ile birlikte betonun kohezyonunun azaldığı ve paralelinde agregaları

taşımakta zorlandığı görülmektedir. Lifli bileşimlerde ise lifsizlere benzer olarak T_{50} sürelerinin artan su/çimento oranıyla beraber azaldığı gözlenmiştir. Fakat lifli karışımların T_{50} süreleri, içerdikleri liflerin işlenebilirliğe olan olumsuz etkisinden dolayı genel olarak biraz daha yüksektir. 0,63 su/çimento oranında lifli karışımlar kuru kıvamda kalıp kendiliğinden yerleşen beton özeliği sergilememiştir. Karışımların toplam yayılması ve bu yayılmayı gerçekleştirdikleri toplam sürelerine bakıldığında lifli ve lifsiz karışımlarda artan su/çimento oranının toplam yayılma miktarında önemli bir değişikliğe neden olmadığı görülmektedir.

Kısıtlanmış Yayılma Deneyi Sonuçları

Şekil 4, 5 ve 6'da görüldüğü gibi kısıtlanmış yayılma deneyinde genel olarak çökme-yayılma deneyine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Su/çimento oranı yükseldikçe azalan viskoziteden dolayı T_{50} süresi düşmektedir fakat lifsiz bileşimlerde T_{50} süresi normal çökme-yayılma deneyinde olduğu gibi 0,45 su/çimento oranından sonra artma eğilimindedir. Bu durum azalan kohezyonun betonun belirli donatı aralığından geçerken agrega taşıma yeteneğini azalttığını göstermektedir. Lifli bileşimlerde ise kısıtlanmış T_{50} süresinin 0,38 su/çimento oranından sonra artma eğiliminde olduğu çok daha net görülebilmektedir. Bu durum, beton bileşimi, lif geometrisi, narınlığı ve lif içeriğinde, su/çimento oranının artması ve kohezyonun azalması sonucunda, donatılar arasından akış sırasında betonun lifleri taşıyamadığını, liflerin taze betonda agrega hareketinin önünde engel oluşturduğunu göstermektedir. 0,63 su/çimento oranlı karışımda ise lifler beton akışını önemli ölçüde engellemiş ve 50 cm yayılma sağlanamamıştır.

V-Hunisi Deney Sonuçları

Lifsiz karışımlar için V-hunisi deney sonuçları incelendiğinde 0,24 su/çimento oranından 0,38 değerine kadar V- hunisi süresinin önemli ölçüde değişmediği Şekil 7'de görülmektedir. Bu durum, ince malzeme içeriği olarak aynı bileşime sahip karışımlarda, karışımın içerdği çimento miktarının, betonun V- hunisi deneyinde yansıtılan davranışı açısından önemli olduğunu göstermektedir. Karışımda çimento miktarının azalması, çimentonun taze betonun işlenebilirliğine olan katkısını azaltmış ve 0,38 su/çimento oranına kadar V- hunisi süresi biraz artmıştır. 0,38 su/çimento oranından sonra ise beton işlenebilirliğinde çimento miktarından çok betonda artan su/çimento oranı etkili olmaya başlamış, betonun viskozitesinin azalmasıyla V-hunisi süresi düşmüştür. Fakat 0,63 su/çimento oranında tekrar yükselen süre betonda kohezyon kaybı ve segregasyon tehlikesinin göstergesidir. Beton viskozitesini kaybetmeye başlayınca içindeki agregalar betondan sıyrılmaya

başlamış ve aletin çıkış ağzını kapatmıştır. Böylece, beton çıkışı yavaşlamış ve V-hunisi süresi artmıştır. Bu durum, lifsiz karışımlar için 0,63 su/çimento oranında betonda değişken kesitli yerlerden geçerken ayrışmanın göstergesi olabilir.

Lifli karışımların, V- hunisi süreleri incelendiğinde, bu sürelerin lifsiz karışımlara göre fark edilir biçimde yüksek olduğu görülmektedir. Buradan betona lif eklenmesinin, taze betonun dar kesitlerden geçme yeteneğini azalttığı sonucu çıkarılabilir. Ayrıca, lifli bileşimlerde de lifsizlere benzer olarak belli bir su/çimento oranından sonra sürede artma eğilimi gözlenmiştir. 0,63 su/çimento oranlı bileşimlerde ise bu sürenin çok uzun olması ve bu karışımın kendiliğinden yerleşen beton özellikleri göstermemesi nedeniyle dikkate alınmamıştır.

U-Kutusu Deneyi Sonuçları

Lifsiz karışımlar için doldurma süresinin, artan su/çimento oranıyla beraber azaldığı görülmektedir. Düşük su/çimento oranlarında beton, yüksek çimento dozajından dolayı daha viskoz olmakta ve dolayısıyla hareket süresi artmaktadır. Artan su/çimento oranlarıyla kohezyon da azaltmakta ve beton daha hızlı bir geçiş yapmaktadır. Fakat U-kutusu deneyinde de V-hunisi deneyinde olduğu gibi yüksek su/çimento oranlarında geçiş süresi tekrar artmaktadır. Bu durum, azalan çimentodan dolayı betonun kohezyon yeteneğinin önemli ölçüde kaybolduğunun ve altta bulunan donatılı kısımda agregaların betondan sıyrılıp birikerek engel oluşturduğunun göstergesidir. Lifli karışımların da lifsiz karışımlara temelde benzer bir davranış gösterdiği Şekil 8 ve Şekil 9'da görülmektedir. Lif içeren bileşimlerde, bu geçiş süresi lifsizlere göre 2-3 kat daha fazla olabilmektedir. Bu durum, betona %1 oranında katılan lifin, mevcut lif geometrisinde beton işlenebilirliğini ciddi olarak etkileyebileceğinin göstergesidir. Lifli karışımlarda, 0,63 su/çimento oranında geçiş sağlanamamış ve değerlendirmeye alınmamıştır.

Lifsiz bileşimler için h_1/h_2 oranı 1 olarak gözlenmiş ve su/çimento oranı arttıkça bu oranda önemli bir değişme olmamıştır. Bu da, U-kutusu deneyinde yalnızca ulaşılan yükseklikler baz alındığında üretilen lifsiz karışımların kendiliğinden yerleşen beton niteliği taşıdığının bir göstergesidir. En yüksek su/çimento oranı olan 0,63 değerinde ise h_1/h_2 oranı 0,94'e düşmüştür. Bu durum, betondan ayrılan bir kısım agreganın donatılardan geçişte beton akışını engellemesiyle açıklanabilir. Bu deneyde, artan su/çimento oranıyla azalan kohezyonun lifsiz karışımlar için U-kutusunun yansıttığı kendinden yerleşen beton niteliklerini pek de etkilemediği sonucuna ulaşılmıştır. Lifli karışımlarda ise h_1/h_2 oranları açısından lifsiz olanlara göre

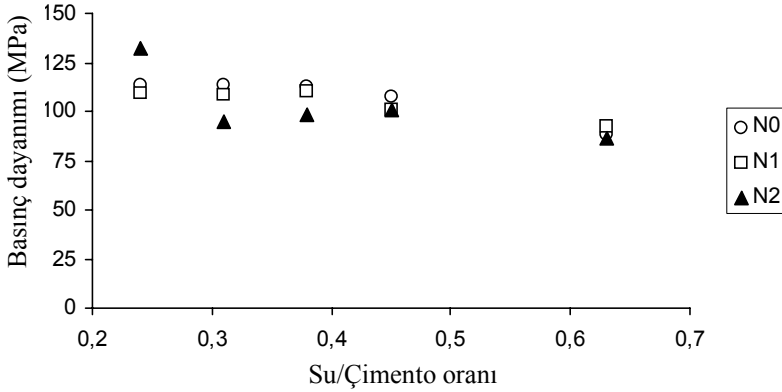
oldukça farklı davranış gözlenmiştir. 0,24 su/çimento oranında h_1/h_2 oranı 0,5 mertebesindeyken 0,38 de 0,8 değerine yaklaşmış ve 0,63 su/çimento oranında tekrar 0,5 seviyelerine düşmüştür. Yüksek su/çimento oranlarında azalan kohezyondan dolayı çimento hamurunun agregaları ve lifleri taşıma yeteneği düşmüş ve liflerin ve agregaların betondan sıyrılıp U-kutusunun altından geçişi tıkanmasıyla h_1/h_2 oranı düşmüştür. Bu durumun oluşmasında lif boyutunun, lif miktarının ve donatı aralığının etkisi büyüktür. h_1/h_2 oranları açısından lifsiz bileşimler için kullanılan bütün su/çimento oranlarında bu değer 1 civarındadır ve bu karışımlar kendiliğinden yerleşen beton niteliği taşımaktadır. Lifli karışımlarda ise işlenebilirlik açısından 0,3 ve 0,4 arası su/çimento oranlarının en yüksek h_1/h_2 oranlarını verdiği görülmüştür. Bu açıdan kendinden yerleşen beton niteliği bu su/çimento oranları arasındaki betonlarda daha fazladır.

Basınç Deneyi Sonuçları

Şekil 17'de lifsiz ve lifli karışımların basınç dayanımlarının su/çimento oranı ile değişimi görülmektedir. Çimento, silis unu ile hacimce yer değiştirmiş olduğundan karışımlardaki çimento miktarı azaldıkça kullanılan su miktarı değişmemesine rağmen su/çimento oranları artmaktadır. Bu çalışmada 0,24 su/çimento oranında 833 kg, 0,31 su/çimento oranında 645 kg ve 0,38 su/çimento oranında ise 526 kg çimento kullanılmıştır. Numunelerin basınç dayanımlarında herhangi bir düşüş gözlenmemiş olup 0,45 su/çimento oranında sadece %6'lık bir düşüş gözlenmiştir. 0,63 su/çimento oranında ise bu düşüş % 23 seviyelerine yükselmektedir. Bu durum 0,24 ve 0,38 su/çimento oranları arasında hidrate olmayan çimentonun ve çimento ile kısmen yer değiştirilerek kullanılan silis ununun mukavemete olan etkilerinin benzer olduğunun bir göstergesidir. Ayrıca, silis ununun beton mukavemetine olan katkısının önemli bir kısmının boşlukları doldurmasından dolayı olduğu düşünüldürse, hidrate olmayan çimento ile silis ununun aynı mekanizmayla basınç dayanımını artırdığını ifade etmek mümkündür. Yani çimento, bağlayıcı olmasıyla ve boşlukları doldurma etkisiyle dayanımı belirleyici bir unsur olmaktadır.

Bağıl olarak düşük dayanımlı liflerin kullanıldığı bileşimler incelenecek olursa lifsiz numunelerle aynı özellikleri taşıdığı görülmektedir. Lifsiz numunelerde görülen silis unu ve çimento ilişkisi aynı şekilde lifli bileşimler için de söz konusudur. 0,24 ve 0,45 su/çimento oranları arasında basınç dayanımlarında ciddi bir düşme yoktur. N1 kodlu karışımların lifsiz olanlara göre basınç dayanımlarının bir miktar düşük olduğu fakat kendi içerisinde su/çimento oranına göre değişiminin yalın betonlarla benzer olduğu görülmektedir. N2 kodlu numunelerde ise eğilimin çok fazla değişmediği

fakat N1 kodlu numunelerde karşılaşıldığı kadar kararlı bir davranışın sergilenmediği görülmektedir. Buradan liflerin basınç dayanımına etkisinin lif yönelimi ve aderansa bağlı olarak değişeceği sonucuna da varılabilir.



Şekil 17. Yalın ve lifli betonların basınç dayanımlarının su/çimento oranı ile değişimi

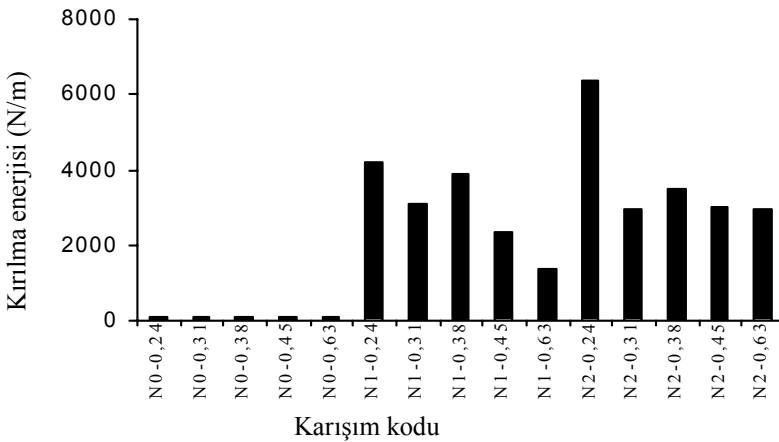
Disk Yarma Deneyi Sonuçları

Lifsiz numuneler açısından incelendiğinde, yarma-çekme dayanımının artan su/çimento oranıyla beraber az da olsa azaldığı görülmektedir. Çimento ile hacimce ikame edilen silis ununun çekme dayanımı üzerinde basınç dayanımında gözlemlendiği gibi olumlu bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu durum, basınç dayanımına katkısı olan yalnızca boşlukları doldurma etkisine sahip bileşenlerin, çekme dayanımı üzerinde benzer olumlu bir etkiyi sergilemeyeceğinin göstergesidir. Lifli karışımlar incelendiğinde ise lifsiz numunelere benzer bir şekilde, yarma-çekme dayanımlarının artan su/çimento oranı ve azalan aderans ile azalmakta olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca lifli karışımların, yarma-çekme dayanımlarının lifsizlere göre bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da liflerin betonun çekme dayanımına olan olumlu etkisini göstermektedir. Liflerin çatlak oluşumunu azalttığı, çatlak gelişimini yavaşlattığı ve matris faz ile lifler arasındaki aderans sayesinde çekme gerilmelerini alarak betonda çekme dayanımını artırdığı görülmektedir.

Kırılma Enerjisi Deney Sonuçları

Eğilme deneyi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde yarma-çekme dayanımından elde edilene benzer bir davranışın sergilendiği görülmektedir. Yalın betonlarda 0,24 su/çimento oranında 8,3 MPa olan çekme dayanımı, su/

çimento oranı 0,63'e ulaştığında 6,8 MPa değerine düşmektedir. Beklendiği üzere eğilme dayanımlarının lifli karışımlarda lifsizlere göre daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Lifli numuneler, 0,24 su/çimento oranında aynı su/çimento oranındaki yalın betona göre daha fazla çekme dayanımına sahip olurken, 0,63 su/çimento oranında bu dayanım farkı özellikle düşük dayanımlı lifler söz konusu olduğunda ortadan kalkmaktadır. Başka bir ifade ile çekme dayanımı açısından lifsizler ve lifli bileşimler arasındaki dayanım farkının artan su/çimento oranıyla azaldığı görülmektedir. Toplam suyun sabit kalması nedeni ile bileşimlerdeki su/çimento miktarı artışı, çimentonun silis unu ile kısmen yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Azalan çimento miktarı ile lifsiz betonların çekme dayanımları düşmektedir. Ayrıca artan su/çimento oranıyla beraber betonlarda liflerin çekme dayanımına olan olumlu katkısının yani lifli ve lifsiz numuneler arasındaki çekme dayanımı farkının azaldığı görülmektedir. Bu durum, betonda kullanılan çimento dozajının, önceden de belirtildiği gibi betonun çekme dayanımını etkilemesinin yanı sıra lif-beton aderansını artırarak liflerin etkinliğini artırdığının göstergesidir. Bilindiği gibi beton matrisi ile lifler arasındaki aderans sayesinde lifler çekme gerilmelerini alabilmektedir. Aderansı etkileyen en önemli unsur ise matris dayanımıdır. Üretilen karışımlardan en fazla çimento içeriğinin 0,24 su/çimento oranına sahip numunede olmasından dolayı liflerle olan aderans yüksek olmuş, lif içeren betonlar yalın betonlara göre daha iyi performans sergilemiştir. Su/çimento oranı arttıkça çimento dozajı düşmüş matris zayıflamış ve liflerle sağlanan aderans azalmıştır. Dolayısıyla lifli karışımların çekme dayanımı düşmüştür. Lif çekme mukavemetinin değişiminin ise net eğilme dayanımlarını kararlı olarak etkilemediği görülmüştür.



Şekil 18. Yalın ve lifli betonların kırılma enerjilerinin değişimi

Yalın betonlar özgül kırılma enerjileri açısından incelendiğinde, düşük su/çimento oranına sahip olanların matris dayanımına paralel olarak daha gevrek davrandığı görülmektedir. Su/çimento oranının 0,38 değerini aştığı karışımlarda ise beklenildiği gibi sünek geçmeye yönelen bir davranış gerçekleşmektedir.

Özgül kırılma enerjileri lifli bileşimlerinin incelendiğinde en çok göze çarpan sonuç, lifli bileşimlerin lifsizlere göre çok daha fazla enerji yutabilmeleridir. En çok enerji, en düşük su/çimento oranında yutulmakta olup su/çimento oranı arttıkça yutulan enerji de azalmaktadır. Daha önceden de belirtildiği gibi en güçlü matris yapısı 0,24 su/çimento oranına sahip numunelerdedir. Matris yapısı güçlendikçe lifler ve matris arasındaki aderans artmaktadır. Bilindiği gibi lifler, çatlak yüzeyinin iki tarafında köprü vazifesi görmekle olup çatlağı iletirmek isteyen gerilmeleri matrisle olan aderans sayesinde kendi bünyeleri üzerine aktarmaktadırlar. Liflerden elde edilen performans, azalan su/çimento oranı ile artan aderans dayanımı ile birlikte artmaktadır. Deneysel veriler lif dayanımları göz önüne alınarak incelendiğinde ise lif dayanımının artmasına paralel olarak yutulan enerjilerin de genel anlamda artma eğiliminde olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR

- Sabit hacimsel su/ince malzeme oranı 0,52 olan yalın betonlarda, su/çimento oranını 0,24'den 0,38'e çıkmasına (çimento dozajının 833 kg/m^3 den 526 kg/m^3 'e düşmesi) rağmen numunelerin basınç dayanımlarında azalma görülmemiştir. Su/çimento oranı 0,45 olduğunda ise ancak % 6'lık bir düşüş görülmüştür. Su/çimento oranı 0,63'e çıktığında ise basınç dayanımdaki azalma % 24 değerine ulaşmıştır. Lifsiz betonlardaki bu davranış düşük dayanımlı liflerin eklenmesi durumunda benzer şekilde gelişmekle birlikte liflerin basınç dayanımına kararlı bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.
- Lifsiz numunelerde yarma-çekme dayanımları azalan çimento dozajı ile düşmüştür. Numunelerde lif kullanılması ile yarma-çekme dayanımları yalın betonlara göre %4 ile %34 oranında artmıştır. Düşük ve yüksek dayanıma sahip lifler kıyaslandığında, lif dayanımının artması ile %29'a ulaşan beton dayanım artışı sağlanmaktadır.
- Lifsiz karışımların eğilme-çekme dayanımları 0,24 ve 0,45 su/çimento değerleri arasında genelde aynı kalmış fakat 0,63 su/çimento oranında 0,24 su/çimento oranına göre $8,3 \text{ MPa}$ 'dan $6,8 \text{ MPa}$ değerine düşerek %18'lik bir azalma sergilemiştir.
- Su/çimento oranları yalın betonlarda 0,24 ve 0,38 arasında iken, kırılma enerjilerinin genel olarak aynı kaldığı, 0,45 ve 0,63 su/

çimento oranlarında ise diğer karışımlara göre fark edilir bir artış olduğu görülmektedir. Bu durum artan su/çimento oranlarında azalan çimento miktarının betonları daha sünekleştirmesine bağlanabilir. 0,24 su/çimento oranında 93 (N/m) olan özgül kırılma enerjisinde, 0,63 su/çimento oranı için 108 (N/m)'ye ulaşarak %16'lık bir artış sağlanmıştır.

- Lifli karışımların eğilme çekme dayanımları lifsizlere göre belirgin bir biçimde büyük olmasına rağmen artan su/çimento oranı ve azalan çimento dozajı ile birlikte, liflerin eğilme dayanımına sağladığı katkı da azalmaktadır. Lif eklenmesi ile eğilme dayanımları lifsizlere göre %18 ile %114 oranları arasında artmaktadır.
- Lif katkılı betonların özgül kırılma enerjilerinin yalın betonlara göre 13 ile 68 kat arttığı görülmektedir. Lifli karışımların enerjileri, yalın betonların tersine artan su/çimento oranı ve azalan çimento içeriği ile birlikte düşmektedir. Lif dayanımının artması ile düşük dayanımlı liflere göre yutulan enerjide 2 kata varan artışlar görülmektedir
- Betona lif ilavesinin beklendiği gibi dayanımdan çok betonun yuttuğu enerjiyi artırdığı görülmüştür.
- Karışımların, taze haldeyken serbest yayılma özellikleri incelendiğinde, lifsiz olanların kendiliğinden yerleşen beton özeliği sergiledikleri görülmüş, ayrıca betona mevcut içerik ve geometride lif katılmasının serbest yayılmayı önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Ancak üretilen lifsiz numunelerin, daralan kesitten (V-hunisi) ve donatılar arasından geçiş (kısıtlanmış yayılma ve U-kutusu) yeteneklerinin, kullanılan çimentonun azalmasıyla beraber azalan kohezyondan dolayı düştüğü görülmüştür. Betona mevcut içerik ve geometride lif katılmasının bahsedilen yetenekleri olumsuz etkilediği görülmüştür. Su/çimento oranı 0,63 değerinde olan lifli karışımlarda beklenen işlenebilme sağlanmamış ve kendiliğinden yerleşen beton özeliği gözlenmemiştir.

KAYNAKLAR

1. Tokyay, M., Şahmaran, M., Yaman İ., Ö., “Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri ile Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton”, 2004 Beton Kongresi Bildirileri, THBB, 2004, s. 225-233.
2. Sağlam, A., R., Parlak, N., Özkul, M., H., Doğan Ü., A., “Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu”, 2004 Beton Kongresi Bildirileri, THBB, 2004, s.213-224.

3. Bornemann, R., Schmidt, M., "The Role of Powders in Concrete", 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig June 2002.
4. Grünewald, S., Walraven, J. C., "Parameter-Study on the Influence of Steel Fibers and Coarse Aggregate Content on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete", Cement and Concrete Research 31, 2001, pp. 1793-1798.
5. Şengül, C., "Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışına Su/İnce Malzeme Oranının ve Lif Dayanımının Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
6. Bache, H., H., Densified Cement Ultra-fine Particle Based Materials, Aalborg Portland, Denmark, 1981.
7. Özkul, M.H., Doğan Ü.A., Çavdar, Z., Sağlam, A.R., Parlak, N., "Effects of Self Compacting Concrete Admixtures on Fresh and Hardened Concrete Properties", 2. International Symposium on Cement and Concrete Technology in the 2000s, Vol.1., September 2000, İstanbul, pp. 493-502.

UÇUCU KÜL VE METAKAOLIN İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLAR

Erhan GÜNEYİSİ

Yrd.Doç.Dr.
Gaziantep Üni., İnşaat Müh.
Bölümü
Gaziantep, Türkiye

Mehmet GESOĞLU

Yrd.Doç.Dr.
Gaziantep Üni., İnşaat Müh.
Bölümü
Gaziantep, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, uçucu kül ve metakaolin içeren kendiliğinden yerleşen harçlarda (KYH) yayılma, V-hunisi akma zamanı, viskozite ve priz alma süresi gibi taze özellikler ile basınç dayanımı deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, su/bağlayıcı oranı 0.40 ve toplam bağlayıcı miktarı 550 kg/m³ olan toplam 16 harç karışımı tasarlanmıştır. Kontrol harç karışımında bağlayıcının tamamı portland çimentosu (PC) iken ikili ve üçlü sistemlerde uçucu kül (UK) ve metakaolin (MK) çimento ile değişik oranlarda ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Böylece, 1 kontrol (sadece portland çimentolu), 3 portland çimentolu ve uçucu küllü, 3 portland çimentolu ve metakaolinli ve 9 portland çimento, uçucu kül ve metakaolin içeren toplam 16 farklı karışım tasarlanmıştır. Tüm karışımlarda serbest yayılma 24-26 cm olacak şekilde yeteri miktarda yeni nesil kimyasal katkı katılmış ve taze özelliklerdeki değişimler ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre, uçucu küllü kendiliğinden yerleşen harçlarda priz alma süresi kontrol harca göre oldukça uzamıştır. Ayrıca, metakaolinin uçucu küllü kendiliğinden yerleşen harçlarda priz alma süresini önemli oranda azalttığı ve viskoziteyi ise artırdığı gözlenmiştir.

GİRİŞ

20. yüzyılın sonlarına doğru geliştirilen Kendiliğinden Yerleşen Betonlar (KYB) taze haldeki yüksek akıcılık ve ayrışma direnci özelliklerinin üretim kalitesi ve verimlilik açısından sağladığı yararlar ile çevre ve çalışma koşullarında sağladığı iyileşme neticesinde dünyada olduğu gibi ülkemizde de

özellikle son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kendiliğinden yerleşen betonlara bu özellikleri kazandıran yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar ve viskozite düzenleyici kimyasal katkıları maliyeti de önemli ölçüde artırmaktadır [1]. Ancak, KYB'da bağlayıcı olarak çimento ile yer değiştirmeli uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve taş tozu kullanımının maliyeti azaltırken aynı zamanda betonun taze ve mekanik özelliklerini önemli oranda iyileştirdiği de tespit edilmiştir [2,3]. Nehdi ve arkadaşları uçucu külün (UK) çimentonun ağırlıkça %50 sine kadar yer değiştirerek kullanılmasıyla maliyeti önemli oranda azaltarak KYB üretilebileceğini belirtmiştir [4].

Kendiliğinden yerleşen betonlarda aranan özellikleri etkileyen önemli faktörlerden biri de harçların taze özelliğidir. Bu anlamda, bu tip betonların karışım oranlarını hesaplamada Kendiliğinden Yerleşen Harçların (KYH) reolojik özellikleri dikkate alınır. Bu nedenle, bir çok araştırmacı harçların reolojik özelliklerini incelemişlerdir [5-8]. Ayrıca, mineral katkıların KYH'ların işlenebilme, ayrışma direnci ve priz alma süresi gibi özelliklerine etkileri incelenmiştir [6,8,9]. Buna karşın, kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özellikleri de harç fazı ayrıştırılmadan incelenebilmektedir [10]. Ancak, beton içerisindeki agrega taneleri reolojik özellikleri önemli ölçüde etkilemekte ve büyük değişimlere sebep olmaktadır.

AMAÇ

Bu çalışma kapsamında uçucu kül ve/veya metakaolinin portland çimentosu ile ikili ve üçlü kullanımı sonucunda elde edilen kendiliğinden yerleşen harçlarda taze özellikler ile basınç dayanımının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. KYH'ların taze özellikleri incelenirken yayılmayı sabit tutulmuş ve V-hunisi akma zamanı, viskozite ve priz alma süresindeki değişimlere mineral katkıların etkileri araştırılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Malzemeler

Tüm deneylerde Adana Çimento Sanayi AŞ'den sağlanan CEM I 42.5 R portland çimentosu, Ceyhan-Yumurtalık Termik Santralinden elde edilen F-sınıfı uçucu kül ve ABD'den temin edilen metakaolin kullanılmıştır. Tablo 1' de portland çimentosu, uçucu kül ve metakaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir. İnce agrega olarak doğal ve kırma kum karışımı kullanılmıştır. Agregaların özellikleri Tablo 2'de sunulmaktadır. KYH serilerinde polikarboksilik eter esaslı yeni nesil bir süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu kimyasal katkı ASTM C494'e göre F tipi olup, yoğunluğu 1.07 olan yüksek oranda su azaltıcı bir katlıdır.

Tablo 1 Çimento ve mineral katkıların özellikleri

Analiz	Portland çimentosu	Uçucu kül	Metakaolin
CaO (%)	62.58	4.24	0.78
SiO ₂ (%)	20.25	56.2	52.68
Al ₂ O ₃ (%)	5.31	20.17	36.34
Fe ₂ O ₃ (%)	4.04	6.69	2.14
MgO (%)	2.82	1.92	0.16
SO ₃ (%)	2.73	0.49	-
K ₂ O (%)	0.92	1.89	0.62
Na ₂ O (%)	0.22	0.58	0.26
Kızdırma kaybı	3.02	1.78	0.98
Özgül ağırlık	3.15	2.25	2.5
Özgül yüzey (cm ² /g)	3260	2870	12000

KYH Karışımları

Bu çalışmada su/bağlayıcı oranı 0.40 ve toplam bağlayıcı miktarı 550 kg/m³ olan toplam 16 harç karışımı tasarlanmıştır. Kontrol harç karışımında bağlayıcının tamamı portland çimentosu iken, ikili sistemin ilk üç karışımında uçucu kül çimento ile ağırlıkça %20, 40 ve 60 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Benzer şekilde ikili sistemin diğer üç karışımında ise metakaolin %5, 10 ve 15 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Üçlü sistemlerde ise portland çimentosu, uçucu kül ve metakaolin farklı oranlarda birlikte kullanılarak toplam dokuz karışım daha tasarlanmıştır. Böylece, 1 kontrol (sadece portland çimentolu), 3 portland çimentolu ve uçucu küllü, 3 portland çimentolu ve metakaolinli ve 9 portland çimento, uçucu kül ve metakaolin içeren toplam 16 farklı karışım tasarlanmıştır (Tablo 3). Tüm karışımlarda serbest yayılma EFNARC sınırlarını sağlayacak şekilde (24-26 cm) yeteri miktarda yeni nesil kimyasal katkı katılmıştır [11].

Bütün KYH'ların hazırlanmasında aynı yöntem izlenmiştir. Öncelikle bütün toz malzeme ve kum 1 dk süresince standart bir mikserde karıştırıldıktan sonra karışım suyunun 3/4'ü eklenerek karıştırma işlemine bir süre daha devam edilmiştir. Sonrasında, geriye kalan karışım suyu ve kimyasal katkı harç karışımına katılarak ve 3 dk daha karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra serbest yayılma ölçülmüş ve amaçlanan yayılmayı sağlayan karışımlarda V-hunisi akma süresi, priz alma süresi ile viskozite ölçülmüştür. Ayrıca, basınç dayanımı belirlenmesi için her bir karışımın 3 adet 100 mm'lik küp numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 24 saat

sonra kalıptan çıkarılmış ve deney zamanına kadar 20 ± 2 °C sıcaklığa sahip su havuzunda bekletilmiştir. Numuneler üzerinde 28 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır.

Tablo 2. Agregaların özellikleri

Elek açıklığı (mm)	İnce agrega	
	Doğal kum	Kırma kum
16	100	100
8	100	100
4	86.6	95.4
2	56.7	63.3
1	37.7	39.1
0.5	25.7	28.4
0.25	6.7	16.4
İncelik modülü	2.87	2.57
Özgül ağırlık	2.66	2.45
Su emme (%)	0.55	0.92

Tablo 3. KYH karışım oranları (kg/m³)

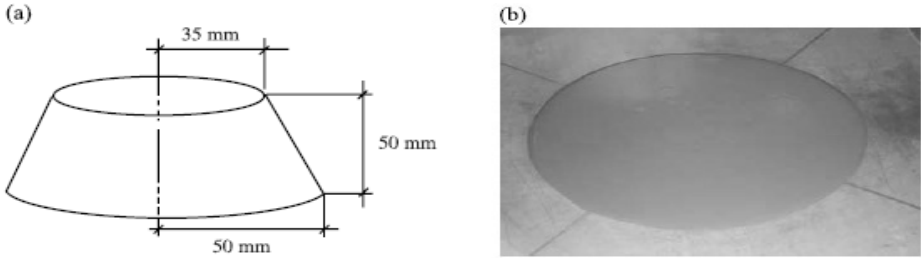
Karışım no	s/b	Bağlayıcı	Su	PC	UK	MK	Doğal kum	Kırma kum	SP*
Kontrol-PC	0.40	550	220	550	0	0	1077	425	6.82
UK20MK0	0.40	550	220	440	110	0	1055	416	5.80
UK40MK0	0.40	550	220	330	220	0	1033	408	5.39
UK60MK0	0.40	550	220	220	330	0	1011	399	4.20
UK0MK5	0.40	550	220	523	0	27.5	1074	424	8.2
UK0MK10	0.40	550	220	495	0	55	1071	423	10.0
UK0MK15	0.40	550	220	468	0	82.5	1067	421	11.8
UK15MK5	0.40	550	220	440	82.5	27.5	1057	417	7.60
UK10MK10	0.40	550	220	440	55	55	1059	418	8.95
UK5MK15	0.40	550	220	440	27.5	82.5	1062	419	10.30
UK35MK5	0.40	550	220	330	192.5	27.5	1035	409	7.50
UK30MK10	0.40	550	220	330	165	55	1037	409	8.85
UK25MK15	0.40	550	220	330	137.5	82.5	1040	410	10.20
UK55MK5	0.40	550	220	220	302.5	27.5	1013	400	7.20
UK50MK10	0.40	550	220	220	275	55	1015	401	8.55
UK45MK15	0.40	550	220	220	247.5	82.5	1017	402	9.90

*SP: Süperakışkanlaştırıcı

Deney Yöntemi

Serbest yayılma ve V-hunisi akma zamanı EFNARC'da [11] tarif edilen mini çökme konisi ve mini V-hunisi ile sarsma yapılmadan ölçülmüştür. Mini çökme konisi KYH harç ile sıkıştırma yapılmadan doldurulduktan sonra koni kaldırılmıştır. Serbest yayılma çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek ortalaması verilmiştir (Şekil 1). Hedeflenen yayılma çapını sağlayan harçlarda, mini V-hunisi sıkıştırılmadan doldurulduktan sonra harcın huniden akma süresi ölçülmüştür (Şekil 2).

Priz başlama ve bitiş süresi deneyleri ASTM C403/403M-99'a [12] uygun olarak ELE penetrasyon direnci aleti ile yapılmıştır (Şekil 3). KYH karışımları 100 mm' lik küp kalıplara yerleştirildikten sonra 23 °C sıcaklıktaki bir ortamda bekletilmiştir. Penetrasyon direnci cihazının standart iğnesi harç yüzeyinden dalma derinliği 25 mm kadar daldırılarak cihaz üzerindeki skaladan bu derinliği karşılık gelen kuvvet okunmuştur. Daldırma işlemi belirli aralıklarla yapılarak penetrasyon direnci-geçen zaman eğrileri çizilmiştir. Buradan priz başlama ve bitiş süreleri hesaplanmıştır. Penetrasyon direnci 3.5 ve 27.6 MPa olan daldırma zamanları sırasıyla priz başlama ve bitiş sürelerini göstermiştir.



Şekil 1. Mini çökme konisi ve serbest yayılma



Şekil 2. Mini V-hunisi akma zamanı deneyi



Şekil 3. Penetrasyon direnci deney aleti

Viskozite ölçümleri Brookfield DV-E model bir cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Harçların viskozitesi 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarda ve karıştırma işleminden hemen sonra ölçülmüştür. Böylece, her bir KYH karışımı için farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri (cP) elde edilmiş ve viskozite-açısal hız grafikleri çizilmiştir.

KYH karışımlarının basınç dayanımların belirlenmesi için her bir karışımdan 3 adet 100 mm' lik küp numuneler hazırlanmıştır. Deneyler 0.1 kN duyarlılık, 3000 kN kapasiteli basınç aleti kullanılarak 28. günde yapılmıştır.



Şekil 4. Brookfield DVE viskometre

DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ**Serbest Yayılma Çapı ve V-Hunisi Akma Zamanı**

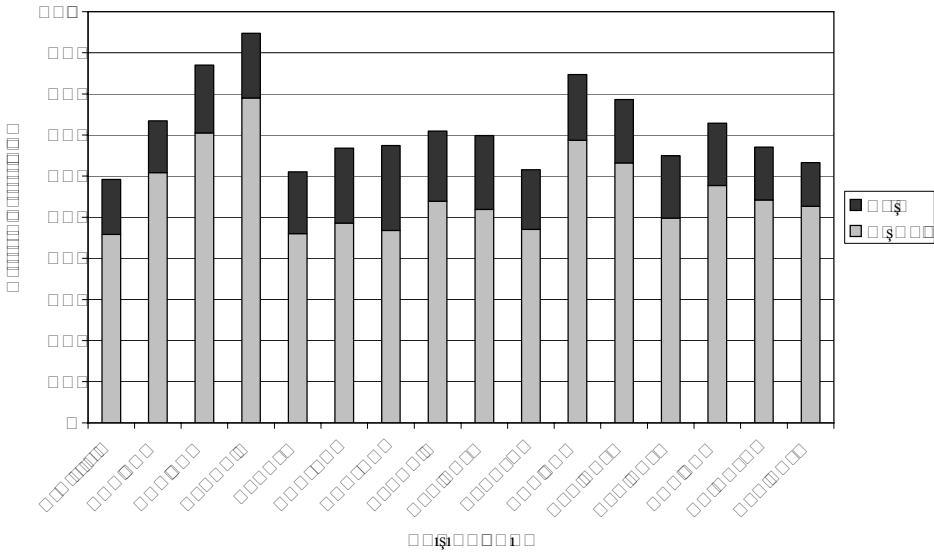
Kendiliğinden yerleşen harçların taze özellikleri Tablo 4 verilmektedir. Tüm KYH harç karışımlarında serbest yayılma çapı hedeflenen aralıkta (EFNARC sınırları: 24-26 cm) tutulmuş ve diğer taze özelliklerdeki değişimler incelenmiştir. Bunu sağlamak için farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı katılmıştır. Uçucu küllü karışımlarda süperakışkanlaştırıcı miktarı azalırken, metakaolin kullanılan karışımlarda katkı ihtiyacı önemli miktarda artmıştır. KYH'larda V-hunisi akma zamanı genel olarak 5.2 ile 17.4 sn arasında değişmektedir. Tablo 4'den de görüldüğü üzere, bazı karışımlarda EFNARC sınırlarının (7-11 sn) sağlanamadığı görülmüştür. Kontrol karışımın 12 sn olan akma zamanı uçucu külün kullanılması ile kullanılan uçucu kül oranına bağlı olarak 5.2 sn mertebesine kadar kısalmıştır. Buna karşın, metakaolin kullanılan karışımlar kontrol karışımına oranla daha uzun V-hunisi akma zamanı göstermişlerdir. Ayrıca, kullanılan metakaolin miktarı arttıkça akma zamanı daha da uzamıştır. Örneğin, MK miktarı %5 olan KYH'lar kontrole göre yaklaşık %28 daha uzun V-hunisi akma zamanına sahip iken kullanılan MK miktarı %15'e ulaştığında akma zamanındaki uzama oranı yaklaşık %43 mertebelerine ulaşmıştır. Üçlü sistemler incelendiğinde ise, MK miktarının %15 olan karışımlar hariç genel olarak bütün karışımlarda kontrol betona göre daha kısa akma süreleri ölçülmüştür. UK'ün MK ile birlikte kullanılması MK'nin V-hunisi akma zamanı üzerindeki olumsuz etkisini önemli ölçüde azaltığı tespit edilmiştir.

Tablo 4. KYH'ların taze ve basınç dayanımı özellikleri

Karışım no	Yayılma çapı (cm)	V-hunisi akma zamanı (sn)	Birim ağırlık (kg/m ³)	Basınç dayanımı (MPa)
Kontrol-PC	25.5	12.0	2393	72.7
UK20MK0	25.7	7.2	2383	59.4
UK40MK0	25.7	7.0	2372	42.1
UK60MK0	26.2	5.2	2342	28.0
UK0MK5	24.5	15.3	2366	80.7
UK0MK10	25.2	13.9	2387	85.1
UK0MK15	24.8	17.4	2372	89.7
UK15MK5	24.8	10.2	2365	74.6
UK10MK10	24.3	13.0	2384	76.4
UK5MK15	24.3	15.3	2370	78.9
UK35MK5	25.2	10.2	2376	56.4
UK30MK10	24.8	11.5	2380	59.5
UK25MK15	23.9	13.6	2342	65.8
UK55MK5	25.7	6.9	2308	35.8
UK50MK10	24.8	9.4	2325	38.3
UK45MK15	25.2	10.8	2315	44.0

Priz Başlama ve Bitiş Süresi

Şekil 5'de KYH'ların priz başlama ve bitiş sürelerine mineral katkı tipi ve miktarının etkisi görülmektedir. İkili sistemler incelendiğinde, hem UK'ün hem de MK'nin priz başlama ve bitiş sürelerini uzattığı görülmektedir. Ancak, UK'ün priz alma süresi üzerinde daha etkili olduğu Şekil 5'de sunulan deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Ayrıca, her iki mineral katkı tipinde de kullanılan miktar arttıkça genel olarak harçların priz alma süreleri uzamıştır. Kontrol harcın priz başlangıç ve bitiş süresi sırası ile 458 ve 592 dk iken %60 UK içeren KYH'da bu değerler sırası ile 790 ve 948 dk'dır. Buna karşın, %15 MK içeren KYH'da priz başlama ve bitiş süreleri sırası ile 468 ve 675 dk'dır. İkili sistemlerde görülen bu davranış üçlü sistemler de görülmüştür. Ancak, üçlü sistemlerde metakaolin, uçucu kül ile yer değiştirilerek kullanıldığı için bu karışımlar UK miktarındaki azalmaya bağlı olarak yalnız UK içeren ikili sistemdeki harçlara oranla daha kısa priz alma sürelerine sahip olmuşlardır. Örneğin, %40 UK içeren ikili sistemdeki KYH'nın priz başlama ve bitiş süreleri sırası ile 705 ve 870 dk iken %30 UK ve %10 MK içeren üçlü sistemdeki KYH'da ise bu değerler sırası ile 633 ve 787 dk olarak ölçülmüştür.



Şekil 5. KYH'larda priz başlama ve bitiş süreleri

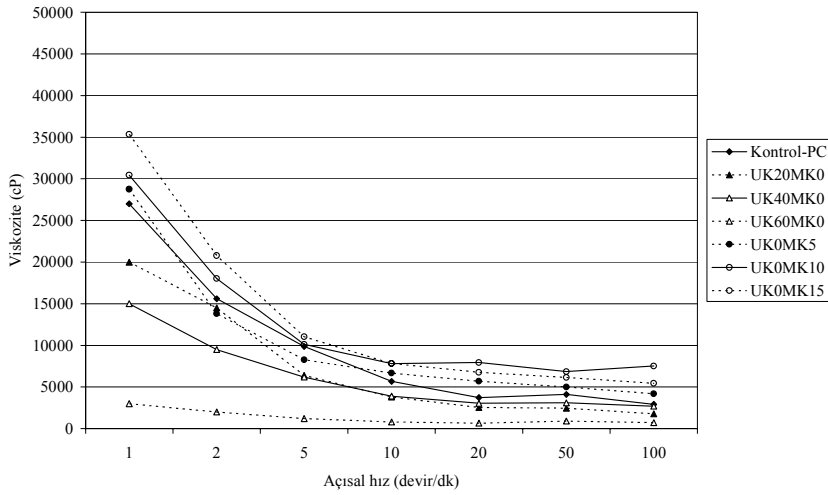
Viskozite

KYH'ların viskozite-açısıl hız eğrileri ikili ve üçlü sistemler için sırası ile Şekil 6 ve 7'de görülmektedir. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi, MK içeren KYH'ların viskoziteleri kontrol karışıma göre daha yüksektir. Özellikle MK'nin %15 oranında kullanılması viskoziteyi önemli ölçüde arttırmıştır. Buna karşın, UK içeren KYH'larda ise viskozite değerleri kontrol harca göre bir azalma eğilimi göstermektedir. %60 UK içeren KYH karışımında viskozite çok düşük mertebelerde kalmıştır. Bu karışımın V-hunisi akma zamanı (5.2 sn) incelendiğinde EFNARC sınırlarını (7-11 sn) sağlamadığı görülmektedir. Söz konusu karışımın viskozitesi ve akma zamanı birlikte değerlendirildiğinde, KYH'lar için önemli bir özellik olan yeterli kohezyona sahip olmadığı söylenebilir. Üçlü sistemlerde de benzer bir davranış görülmüştür (Şekil 7). Ancak, MK ve UK'ün birlikte kullanımı ile MK'nin viskozite üzerindeki olumsuz etkisi azaltılmıştır. Benzer şekilde, yüksek oranda UK içeren karışımlardaki kohezyon eksikliği de MK'nin eklenmesiyle giderilmiştir.

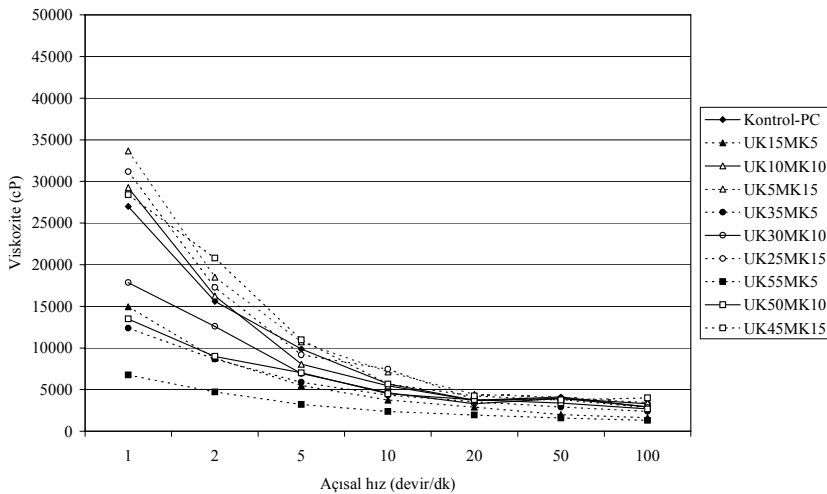
Basınç Dayanımı

Tablo 4'de tüm karışımların 28 günlük basınç dayanımları görülmektedir. Kontrol harcın basınç dayanımı 73 MPa iken ikili ve üçlü sistemli KYH'ların basınç dayanımları mineral katkı tipi ve kullanım oranına bağlı olarak sırası ile 28 ila 90 MPa ve 38 ila 79 MPa arasında değişmektedir. İkili sistemler incelendiğinde, UK içeren KYH'ların genel olarak kontrol harca göre daha

düşük basınç dayanımına sahip oldukları görülürken, MK katkılı harçlar ise daha yüksek basınç dayanımına ulaşmışlardır. Üçlü sistemler incelendiğinde ise, UK oranının düşük olduğu karışımlarda kullanılan MK miktarının artması ile PC-UK-MK'li sistemlerin basınç dayanımının kontrol harcın basınç dayanımına oldukça yakın veya üzerinde olduğu görülürken, yüksek oranda UK kullanılan üçlü sistemlerin basınç dayanımları kontrol harca kıyasla daha düşük mertebede kalmıştır. Örneğin, %10 UK + %10 MK içeren karışımın basınç dayanımı kontrole göre yaklaşık %5 daha büyük iken %50 UK + %10 MK içeren karışımın basınç dayanımı yaklaşık %47 daha düşük olmuştur.



Şekil 6. Kontrol ve ikili sistemli KYH'ların viskozite değişimleri



Şekil 7. Kontrol ve üçlü sistemli KYH'ların viskozite değişimleri

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Mineral katkıların portland çimentosu ile ikili ve üçlü kullanımının KYH'ların taze özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Üçlü sistemli KYH'larda daha olumlu deney sonuçları elde edilmiştir.
2. KYH karışımlarında serbest yayılma 24-26 cm arasında tutulmuşsa da mineral katkıların yüksek oranda kullanıldığı harçlarda V-hunisi akma süresi EFNARC sınırlarını sağlamamıştır.
3. KYH'larda uçucu kül priz başlama ve bitiş süresini önemli ölçüde uzatmıştır. Benzer davranış genel olarak MK'li harçlarda da görölse de MK'nin priz alma süresine etkisi UK'e göre daha düşük mertebelerde kalmıştır.
4. Viskozite deney sonuçlarına göre, ikili sistemlerde MK içeren KYH'ların viskozitesi kontrol karışıma göre daha yüksektir. Buna karşın, UK içeren KYH'larda viskozite değerleri kontrol harca göre bir azalma eğilimi göstermektedir. Üçlü sistemlerde de benzer bir davranış görülmüştür. Ancak, MK ve UK'ün birlikte kullanımı ile MK'nin viskozite üzerindeki olumsuz etkisi azaltılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Bouzoubaa, N. and Lachemi, M., "Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash Preliminary Results," Cement Concrete Research, Vol. 31, 2001, pp. 413-420.
2. Lachemi, M., Hossain, K.M.A., Lambros, V., and Bouzoubaa, N., "Development of Cost Effective Self Consolidating Concrete Incorporating Fly Ash, Slag Cement, or Viscosity Modifying Admixtures," ACI Material Journal, Vol. 100, No. 5, 2003, pp. 419-425.
3. Ghazel, A. and Khayat, K.H., "Optimizing Self Consolidating Concrete with Limestone Filler by Using Statistical Factorial Design Methods," ACI Material Journal, Vol. 99, No. 3, 2002, pp. 264-272.
4. Nehdi, M., El Chabib, H. and El Naggari, M.H., "Development of Cost Effective Self Consolidating Concrete for Deep Foundation Applications," Concrete International, Vol. 25, No. 3, 2003, pp. 49-57.
5. Park, C.K., Noh, M.H., and Park, T.H., "Rheological Properties of Cementitious Materials Containing Mineral Admixtures," Cement Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 842-849.

6. Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., and Uyalgan, B., "The Effect of Fly Ash and Limestone Fillers on the Viscosity and Compressive Strength of Self-Compacting Repair Mortars," *Cement Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 1719-1726.
7. Sun, Z., Voigt, T., and Shah S.P., "Rheometric and Ultrasonic Investigation of Viscoelastic Properties of Fresh Portland Cement Pastes," *Cement Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 278-287.
8. Schwartzentruber, L.D.A, Roy, R.L., and Cordin, J., "Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC)," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 1203-1213.
9. Şahmaran, M., Christianto, H.A., and Yaman, İ.Ö., "The Effect of Chemical Admixtures and Mineral Additives on the Properties of Self-Compacting Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, 2006, pp. 432-440.
10. Sağlam, A.F. and Özkul, M.H., "Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik Özelliklerine Bileşim Parametrelerinin Etkisi," *İTÜ Dergisi*, Cilt 5, Sayı 1b, Şubat 2006, ss. 239-250.
11. EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, February 2002.
12. ASTM C 403/403M-99, Standard Test Methods for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, Annual Book of ASTM Standards, 1999.

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON ÖZELLİKLERİNE ATIK MERMER TOZUNUN ETKİSİ

H. Yılmaz ARUNTAŞ

Doç. Dr.

Gazi Ü. Teknik Eğitim Fakültesi
Ankara, Türkiye

Mustafa DAYI

Arş. Gör.

Gazi Ü. Teknik Eğitim Fakültesi
Ankara, Türkiye

İlker TEKİN

Öğr. Gör.

Muğla Ü. Yatağan M. Y. O.
Muğla, Türkiye

Recep BİRGÜL

Yrd. Doç. Dr.

Muğla Ü. Mühendislik Fakültesi
Muğla, Türkiye

Osman ŞİMŞEK

Yrd. Doç. Dr.

Gazi Ü. Teknik Eğitim Fakültesi
Ankara, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) özellikleri üzerine atık mermer tozunun (AMT) etkisi incelenmiştir. Üretilen betonların karışım hesabı TS 802 ye göre yapılmıştır. KYB karışımlarında s/ç oranı, hiperakışkanlaştırıcı (HA) miktarı ve bağlayıcı miktarı sabit tutulmuştur. HA katkı, beton karışımlarına çimento miktarının (ağırlıkça) % 1.5 oranında katılmıştır. AMT, çimento ile ağırlıkça % 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında ikame edilerek KYB içinde kullanılmıştır. Üretilen KYB ler ile 15 cm boyutlu küp numuneler elde edilmiştir. Küp numuneler üzerinde 3, 7 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. AMT katkılı KYB ler fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından hem birbirleriyle hem de kontrol betonu ile karşılaştırılmıştır. KYB ler arasında en yüksek basınç dayanımı % 20 AMT katkılı betonda elde edilmiştir. Deney sonuçları AMT nin KYB içinde kullanılabileceğini göstermektedir.

GİRİŞ

Günümüz inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesi betondur. Bütün dünyada betonun 20. yüzyılda olduğu gibi 21. yüzyılda da bu özelliğini sürdüreceği düşünülmektedir. Geleneksel betonun yanı sıra, bilimsel çalışmaların artması ve teknolojinin gelişmesi sonucunda farklı ihtiyaçları karşılayabilen bir çok beton çeşidi üretilmiştir. Bunlar arasında hafif beton, lifli beton, vakumlu beton, ön gerilmeli beton, hazır beton gibi betonlar sayılabilir. Bu betonlar arasında yer alan diğer bir beton çeşidi ise kendiliğinden yerleşen beton (KYB) dur. KYB, döküm işlemi sırasında herhangi bir vibrasyon ve sıkıştırmaya ihtiyaç göstermeksizin kalıbın köşelerini ve donatının boşluklarını dolduran akıcı kıvamlı bir betondur(1). KYB dünyada ilk defa 1980 lerin ikinci yarısında Japonya' da deprem bölgelerindeki sık donatılı betonarme elemanlarda sıkıştırma işlemine gerek olmadan yerleşebilen beton ihtiyacından dolayı geliştirilmiştir (2).

KYB literatürde değişik isimler altında tanımlanmaktadır. Genellikle kendiliğinden sıkışan beton (self-compacting concrete-SCC) ismi kullanılmaktadır. Diğer kullanılan isimler ise kendiliğinden düzeyeleşebilen beton (self-levelling concrete-SCC) ve kendiliğinden çöken beton (self-consolidating concrete-SCC) dur. Türkiye'de genellikle kendiliğinden yerleşen beton (KYB) terimi kullanılmaktadır (3,4).

KYB'lerin kohezyonunu sağlamak, karışımda çimento miktarını azaltmak ve atık malzemeleri değerlendirerek daha ekonomik KYB üretebilmek için, çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Şahmaran ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, KYB içinde yüksek hacimde uçucu kül kullanmışlardır. KYB'lerin basınç dayanım değerlerinin ilk günlerde kontrol betonuna göre azalma gösterdiği, fakat ileri yaşlarda aralarındaki dayanım farkının azaldığını tespit etmişlerdir (5).

KYB karışımlarında kullanılan diğer bir malzeme taş tozudur. Yapılan çalışmalarda kireç taşı tozu KYB içinde kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir (6,7,8). KYB üretiminde kullanılan başka bir puzolan da silis dumanıdır (9).

AMAÇ

Bu çalışmada KYB özellikleri üzerine atık mermer tozunun (AMT) etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla karışım içinde çeşitli oranlarda AMT kullanılarak KYB nin fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır.

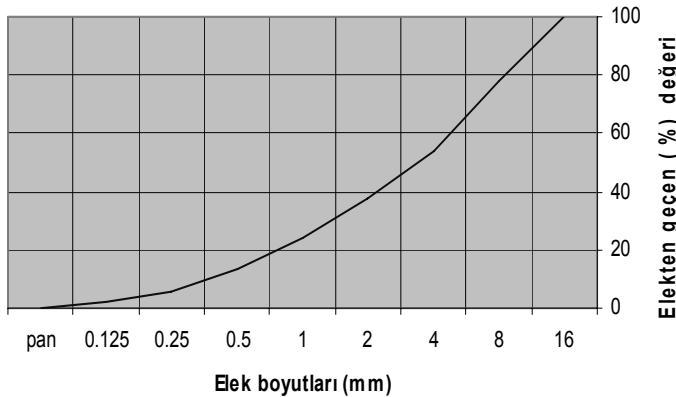
Materyal

Deney çalışmalarında Baştaş Çimento Fabrikasından alınan PÇ 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal analizi, üretici çimento firmasından alınmış, fiziksel özellikleri ise laboratuvarda yapılmıştır. Çimentoya ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. PÇ 42,5 çimentosu ve AMT’ nin özellikleri

Kimyasal Analiz (%)	PÇ 42,5	AMT
CaO	62,72	37,05
SiO ₂	20,00	0,55
Al ₂ O ₃	4,92	0,08
Fe ₂ O ₃	3,76	0,04
MgO	1,84	18,38
SO ₃	2,65	-
K ₂ O	0,73	0,01
Na ₂ O	0,26	-
Kızdırma Kaybı	2,54	45,98
Çözünmeyen Kalıntı	-	-
Fiziksel Özellikler		
Özgül Yüzey (blaine) (cm ² /g)	3250	
Priz Başlangıcı (saat:dk.)	2:25	
Priz Sonu (saat:dk.)	3:40	
Hacim Genleşmesi (mm)	1	
Basınç Dayanımı (MPa) 28 gün	49,1	

Taze betonların üretilmesinde, Kızılırmak doğal agregası kullanılmıştır. Agregaların en büyük tane çapı 16 mm’dir. Agreganın elek analizi deneyi, TS 3530 EN 933-1 (10)a göre yapılmıştır. Agregaların elek analiz Şekil 1’ de, özgül ağırlık ve su emme değerleri Çizelge 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Agreganın granülometri eğrisi

Çizelge 2. Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega grupları	Gevşek birim hacim ağırlık (g/dm ³)	Sıkışık birim hacim ağırlık (g/dm ³)	Özgül ağırlık (kg/m ³)	Su emme oranı (%)
0-2	1643	1799	2,46	2,30
2-8			2,39	2,65
8-16			2,33	2,58

Bu çalışmada, viskozite arttırıcı malzeme olarak atık mermer tozu (AMT) kullanılmıştır. AMT, Afyonkarahisar-Bayat ilçesi mermer ocaklarından elde edilmiştir. AMT, 0,149 mm elek altı malzeme olup özgül ağırlığı 2,94 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. AMT' nin kimyasal kompozisyonu Çizelge 1' de verilmiştir.

Çalışmada akışkanlaştırıcı olarak; polikarboksilat bazlı hiperakışkanlaştırıcı (HA) katkı kullanılmıştır. Katkının yoğunluğu 1,05 g/cm³ olup % 30 ile % 40 su kesme özelliğine sahiptir.

Taze betonların hazırlanmasında Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Metot

Üretilen betonların karışım hesabı TS 802 (11)'ye göre yapılmıştır. Beton sınıfı C 40 olarak alınmış ve beton karışımlarında 0/2, 2/8 ve 8/16 olmak üzere üç farklı agregata tane sınıfı kullanılmıştır. KYB karışımlarında s/ç oranı, HA ve bağlayıcı miktarı sabit tutulmuştur. KYB karışımlarında s/ç oranı 0.35, HA miktarı çimento miktarının (ağırlıkça) % 1.5'i olarak alınmıştır. HA, firmanın önerisi dikkate alınarak su ile birlikte beton karışımına ilave edilmiştir. AMT, çimento ile ağırlıkça % 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında ikame edilerek kontrol betonu dahil altı adet KYB üretilmiştir. KYB karışımları 50 dm³ kapasiteli düşey eksenli mikser kullanılarak 3 dakika süre ile karıştırılmıştır. Üretilen KYB ler ile 15 cm boyutlu küp numuneler elde edilmiştir. Numuneler sıcaklığı 20°C ± 1°C ve bağıl nemi % 60 dolayında olan laboratuarda 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler kalıplardan çıkarılarak, içilebilir ve sıcaklığı 20 °C ± 1 °C su içinde deney gününe kadar kür edilmiştir. Küp numuneler üzerinde 3, 7 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Basınç dayanımları ELE marka 3000 kN kapasiteli yükleme hızı 2.4 kN/s olan deney cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

KYB karışımları; AMT0, AMT5, AMT10, AMT15, AMT20 ve AMT25 olarak kodlanmıştır. Karışımında kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Beton karışımında kullanılan malzeme miktarları (kg/m³)

Karışım Kodu	S/Ç	Çimento (kg/m ³)	Mermer tozu (kg/m ³)	Kimyasal Katkı (kg/m ³)	0-2 Agrega (kg/m ³)	2-8 Agrega (kg/m ³)	8-16 Agrega (kg/m ³)
AMT0	0,35	550	-	8,25	647,79	501,88	297,54
AMT5	0,35	522,5	27,5	8,25	647,11	501,36	297,23
AMT10	0,35	495	55	8,25	646,43	500,83	296,92
AMT15	0,35	467,5	82,5	8,25	645,75	500,31	296,61
AMT20	0,35	440	110	8,25	645,07	499,78	296,30
AMT25	0,35	412,5	137,5	8,25	644,39	499,25	295,98

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Taze Beton Özellikleri

Betonun kendiliğinden yayılma özelliğini tespit etmek için kullanılan yayılma deneyi ile viskozite ve geçiş yeteneğini ölçen V-hunisi deneyleri yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Taze beton deneyleri

KYB'lerin yayılma deneyi ile V-hunisi deney sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Taze betonların özellikleri

Metot	AMT0	AMT5	AMT10	AMT15	AMT20	AMT25
Yayılma (mm)	650	620	610	570	550	540
Yayılma T _{50cm}	2,4	2,0	3,5	4,3	5,6	6,0
V-hunisi (sn)	5,0	5,6	6,0	6,5	7,6	8,0

EFNARC (European Federation of National Trade Associations) tarafından hazırlanan kriterlere göre, KYB'lerde yayılma çapının 650-800 mm arasında, yayılma çapının 50 cm genişliğe erişme süresi 2-5 s arasında ve V-hunisinden akma süresi ise 6-12 s arasında olmalıdır (12).

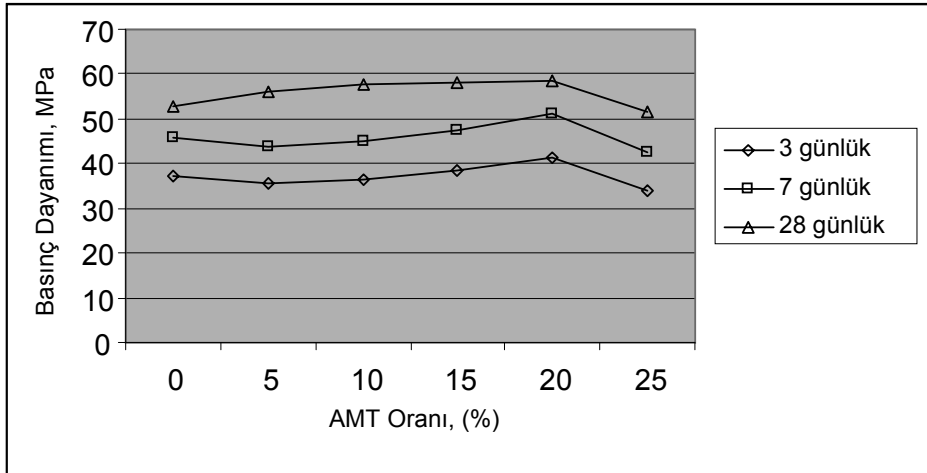
Çizelge 4'deki yayılma deneyi sonuçlarına göre bütün karışımların yayılma genişlikleri 540-650 mm, 50 cm genişliğe erişme süresi ise 2.4-6 s arasında değişmektedir. Yayılma deneyi sonuçlarına göre kontrol betonu olan AMT0 hariç hiçbir karışım KYB özelliği göstermemektedir. KYB içinde AMT oranı arttıkça yayılma azalmaktadır. Yayılma çapının 50 cm genişliğe erişme süresine göre ise KYB içerisindeki AMT oranı arttıkça yayılma süresi de artmaktadır. Aynı durum V-hunisi içinde geçerlidir. Burada da AMT miktarı arttıkça V-hunisinden KYB'lerin geçiş süresi de artmaktadır. Taze beton deney sonuçlarına göre, yayılma çapının azalması buna karşılık T_{50} süresi ile V-hunisinden geçiş süresindeki artma, KYB içerisindeki AMT miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Basınç Dayanımı

AMT ikameli KYB'lerin basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 5'de verilmektedir. KYB'lerin basınç dayanımı-AMT oranı ilişkisi ise Şekil 3'te görülmektedir.

Çizelge 5. KYB basınç dayanım değerleri

Karışım kodu	Basınç dayanımları (MPa)					
	AMT0	AMT5	AMT10	AMT15	AMT20	AMT25
3 günlük	37,1	35,5	36,4	38,4	41,2	34,1
7 günlük	46,0	44,0	45,1	47,6	51,1	42,7
28 günlük	52,9	56,2	57,6	58,2	58,7	51,6



Şekil 3. KYB'lerin basınç dayanımı-AMT oranı ilişkisi

Çizelge 5 ve Şekil 3 ten görüldüğü üzere genellikle KYB içindeki AMT oranı arttıkça % 25 AMT ikameli KYB dışında betonların basınç dayanımlarının da doğru orantılı olarak arttığı gözlenmektedir. Görüldüğü gibi bütün yaşlarda en yüksek basınç dayanımı % 20 AMT ikameli KYB da elde edilmiştir. AMT nin % 25 oranında ikame edildiği KYB karışımlarının basınç dayanım değerlerinin bütün yaşlarda en düşük değeri verdiği belirlenmiştir. Kontrol betonuna göre erken yaştaki (3 ve 7 gün) dayanımlarda AMT5 ve AMT10 KYB ler hariç AMT15 ve AMT20 daha yüksek dayanım göstermiştir. Bu durum 28 günlük dayanımlarda % 5 ve % 10 AMT ikameli KYB için değişmiştir. Bir başka deyişle AMT 25 hariç bütün KYB lerin dayanımları kontrol betonundan daha yüksektir. 28 günlük dayanımlarda KYB ler arasında AMT15 ve AMT20 de birbirine yakın değerler elde edilmiştir. En düşük dayanımlar AMT25 te elde edilmesine karşılık bu betonun 28 günlük basınç dayanımının kontrol betonuna çok yakın bir dayanım verdiği görülmektedir. Bu betonun kontrol betonu dayanımının % 98 ini karşıladığı belirlenmiştir.

SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. KYB içinde PÇ42,5 R çimentosunun polikarboksilat bazlı HA ile uyum sağladığı belirlenmiştir.
2. HA katkı, katkının ve s/ç oranının sabit tutulduğu göz önüne tutulduğunda taze betonun işlenebilme özelliğini artırmakta ve betonlara kendiliğinden yerleşebilir özellik kazandırmaktadır.
3. KYB'lerde viskozite artırıcı mineral katkı olarak AMT kullanıldığında; taze betonun kohezyonunu artırmaktadır.
4. AMT, KYB karışımlarında çimento ile ağırlıkça % 20 oranına kadar ikame edilerek kullanıldığında; betonların basınç dayanımını artırmaktadır. Bu oran aşıldığında basınç dayanım az da olsa azalmaktadır.
5. AMT, KYB üretiminde % 15 ve % 20 oranlarında çimento yerine kullanılabilir. Böylece KYB nin maliyeti de aynı oranda azaltılabilir.

KAYNAKLAR

1. Brouwers, H.J.H., Radix, H.J., "Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study", **Cement and Concrete Research**, 35, 2, 2116-2136, 2005.
2. Okamura, H., Ouchi, M., "Self-Compacting Concrete: Development, Present use and Future", Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, p.p.3-14, 1999.

3. Rols, S., Ambroise, J., Pera, J., "Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete, **Cement and Concrete Research**, 29, 2, 261-266, 1999.
4. Yahia, A., Tanimura, M., Shimoyama, Y., Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, **Cement and Concrete Research**, 35, 2, 532-539, 2005.
5. Şahmaran, M., Yaman, İ., Ö., Tokyay, M., "Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri ile Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton", **Beton 2004 Kongresi**, İstanbul, 225-233, 10-12 Haziran 2004.
6. Felekoğlu, B., Baradan, B., "Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri", **Beton 2004 Kongresi**, İstanbul, 234-243, 10-12 Haziran 2004.
7. Özkul, H., "Kendiliğinden Yerleşen Betonların Genel Özellikleri", **Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu**, Ankara, 119-136, 24-25 Mart 2005.
8. Yaman, İ., Ö., Şahmaran, M., "Kimyasal ve Mineral Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Harçlar", **Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu**, Ankara, 137-146, 24-25 Mart 2005.
9. Türel, S., Felekoğlu, B., Silika Dumanı ve Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Betonda Kendiliğinden Yerleşebilirlik ve Basınç Dayanımı Üzerine Etkileri, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 286-293, 2005.
10. TS 3530 EN 933-1, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Eleme Metodu, TSE, Ankara, 1999.
11. TS 802, Beton Karışım Hesap Esasları, TSE, Ankara, 1985.
12. EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, February, 2002.

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONDA MİNERAL KATKILARIN TAZE BETON ÖZELİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

İlker Bekir TOPÇU

Prof.Dr.

Osmangazi Üniversitesi,

İnşaat Mühendisliği

Bölümü Eskişehir

Osman ÜNAL

Yrd.Doç.Dr.

Kocatepe

Üniversitesi

Teknik Eğitim Fak.

Afyonkarahisar

Tayfun UYGUNOĞLU

Öğr.Görevlisi

Kocatepe Üniversitesi

Teknik Eğitim Fak.

Afyonkarahisar

ÖZET

Bu çalışmada uçucu kül, kireçtaşı tozu, tuğla tozu ve mermer tozunun KYB'da ince malzeme olarak kullanılması durumunda katkı gereksinimi üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Günümüzde Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) uygulamaları yaygınlaşma sürecindedir. KYB'da akışkanlığı sağlamak amacıyla uçucu kül ve silis dumanı gibi puzolanik malzemelerin yanı sıra taş unu gibi ince malzemelerde kullanılmaktadır. Deneyler yüksek oranda su azaltıcı ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak üretilen KYB harçları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Harçların üretimlerinde ince malzemeler çimentoyla belirli bir oranda yer değiştirilmiş ve % 0.5 ten % 2.5 oranına kadar kimyasal katkı ilave edilmiştir. 0/4 mm doğal kum ile üretilen harçlar, üzerinde mini çökmede yayılma ve V-hunisi testleri yapılmıştır. Rölatif çökmede-yayılma ile su/çimento oranı arasındaki ilişkiden gerekli olan katkı miktarı çimento ağırlığının yüzdesi olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak seçilen mineral katkıların katkı gereksinimine dikkat edilmesi gerektiğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: İnce malzeme, kendiliğinden yerleşen beton, rölatif çökme.

GİRİŞ

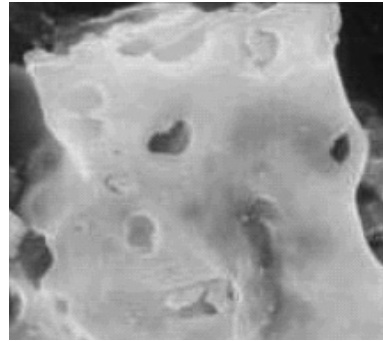
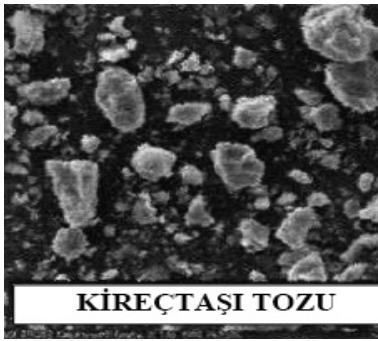
Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı ile sık donatılı dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliklerini sağlarken, ayrışma ve terleme gibi problemler oluşturmaksızın kohezyonunu (stabilitesini) koruyabilen, yüksek akabilme ve geçebilme yeteneğine sahip özel bir beton türüdür [1]. Normal beton karışımından farklı olarak kendiliğinden yerleşen betonda; kimyasal katkı, viskozite artırıcı katkı ve çok miktarda inert veya puzolanik mineral katkının tümünün veya bir kısmının kullanılması ihtiyacı doğmaktadır. Bu malzemelerin seçimi ve beton karışımında uygun oranlarda kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve dolayısıyla standartlar geliştirilmektedir [2,3].

Betonda kendiliğinden yerleşebilirlik kavramı ilk olarak Tokyo Üniversitesinde, 1986 yılında Prof. Dr. Hajime Okamura tarafından ortaya atılmıştır. Su altında beton dökümü uygulamalarında, vibrasyonsuz beton dökümlerinden edinilen tecrübe ile KYB üretilmesi amaçlanmıştır. Okamura'nın başlattığı çalışmaları Ozawa, Ouchi ve Maekawa devam ettirmektedir. 1988 yılında aynı üniversitede yüksek performanslı KYB prototipi üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu özel tip betonun geliştirilmesinde öncelikli amaç, dayanımın yanı sıra dayanıklılık açısından da yüksek performans sağlamaktır [1].

Kendiliğinden yerleşen betonun özel reolojik gereksinimlerinden dolayı hem hidrasyon ısısından dolayı çimento miktarını düzenlemek hem de viskoziteyi düzenleyerek ve akışkanlığı sağlayarak işlenebilirliği düzenlemek için ince (dolgu) malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler genellikle kırmataş tozu, uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş cam tozu gibi malzemelerdir [4]. Günümüzde KYB üzerine yapılan çalışmalarda bu malzemelerden başka özellikle atık durumdaki malzemelerin ince malzeme olarak KYB içerisinde kullanımları araştırılmaktadır. Bu malzemelerden bazıları da öğütülmüş tuğla tozu ve mermer tozudur. KYB'da kullanılacak olan ince malzemelerde aranan en önemli özelliklerden biri en büyük tane çapı olup genellikle 0.125 mm'nin altında olması istenir. Bu durumda KYB üretiminde kullanılan kum ve agrega içerisinde bulunabilecek 0.125 mm altındaki ince maddeler de ince malzeme içerisine dahil edilmelidir. İnce malzemelerin optimum kullanım miktarları bu maddelerin mineralojik kökenine ve mekanik performansına bağlıdır. Örneğin, silis dumanı toplam toz miktarının (çimento+silis dumanı) 400-450 kg/m³ olduğu bir KYB tasarımında 50 kg/m³ dozajda kullanılırken, uçucu kül toplam toz miktarının 500-600 kg/m³ olduğu bir KYB tasarımında 100-150 kg/

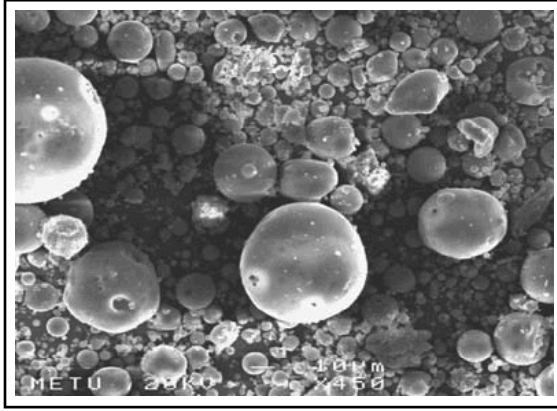
m³ dozajda kullanılmaktadır. Aşağıda bazı önemli inert ve puzolanik incelerin özellikleri ve kendiliğinden yerleşebilirliğe etkileri açıklanmaktadır:

KYB tasarımıda ince öğütülmüş (Blaine değeri > 2500 cm²/g) kireçtaşı, granit ve kuvarz kumu tozu kullanılabilir. Bu tozların etkinliği incelidikçe artar. Ancak en büyük tane boyutunun 0.125 mm altında kullanılması önerilmektedir. Dolomit kökenli kireçtaşı tozu ince öğütülmesi halinde, reaktifliği arttığından alkali karbonat reaksiyonuna yol açabilir. Bu nedenle kullanımı riskli olabilir. Genellikle kireçtaşı tozunun yüzeyi oldukça pürüzlüdür (Şekil 1) [5]. Öğütücü tipine de bağlı olmakla beraber genel olarak granit tozu, mikroyapısı incelendiğinde kireçtaşı tozuna kıyasla daha çok kusurlu mikro tane içerir. Bu açıdan kireçtaşı tozu tercih edilmelidir. Taş ocaklarında üretimin % 1'lik kısmını oluşturan kireçtaşı tozu kayaktan öğütülerek elde edilebilen atık bir malzemedir. Geleneksel betonda kireçtaşı tozu kullanımı, agrega yüzeylerine yapışarak aderansı azaltıcı etki yaratması nedeniyle standartlarca sınırlandırılmıştır [6]. Bu olumsuz etkisi kendiliğinden yerleşen betonda viskozite arttırıcı olarak kullanılmasıyla olumlu etkiye dönüştürülebilir [2].



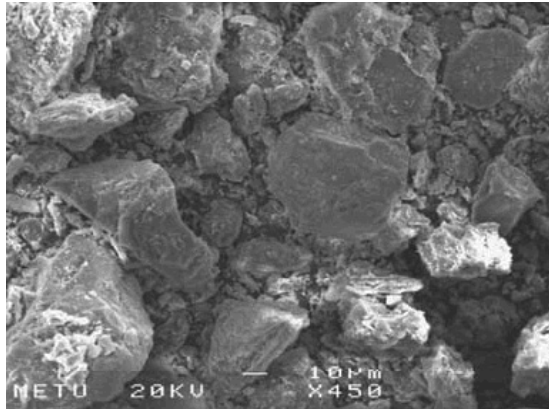
Şekil1. Kireç taşı tozu [5]

Uçucu kül kendiliğinden yerleşen betonun özelliklerini arttırmak için kullanılabilen ve puzolanik özelliğe sahip ince inorganik bir malzemedir. Mikroyapısı incelendiğinde genellikle küresel tane şekline sahiptir (Şekil 2). Ancak boyutsal dağılımı KYB'nin işlenebilirliğini oldukça etkilemektedir. Uçucu kül, kireçtaşı tozuna kıyasla düşük eşik kayma gerilmesi değeriyle daha yüksek viskozite elde edilmesini sağlar[7]. Kendiliğinden yerleşen beton viskozitesini arttırmada etkilidir. Atık bir malzeme olması özellikle termik santrallere yakın bölgelerde kullanımını avantajlı hale getirmektedir. Uçucu külün çimento yerine ikamesi, betonun yayılma çapını ve basınç dayanımını azaltmaktadır.



Şekil 2. Uçucu külün mikro yapısı [5]

Tuğla tozu ise tuğla fabrikalarında pişmiş olan tuğlaların nakliye veya taşıma sırasında veya inşaatlarda kırılması sonucu kullanılamaz hale gelen atık tuğlaların öğütülmeleri sonucunda elde edilen ve kendiliğinden yerleşen betonda değerlendirilmesi araştırılan silis esaslı mineral bir katkıdır. Tuğla tozlarının mikro yapısı incelendiğinde yüzeyinin kireçtaşı tozuna benzer şekilde köşeli ve pürüzlü bir yapıda olduğu görülür (Şekil 3) [5]. Bu da tuğla tozunun su gereksinimini arttırmaktadır. Tuğla tozunun bu özelliğinden faydalanmak için kendiliğinden yerleşen betonda viskozite düzenleyici olarak kullanılabilir.

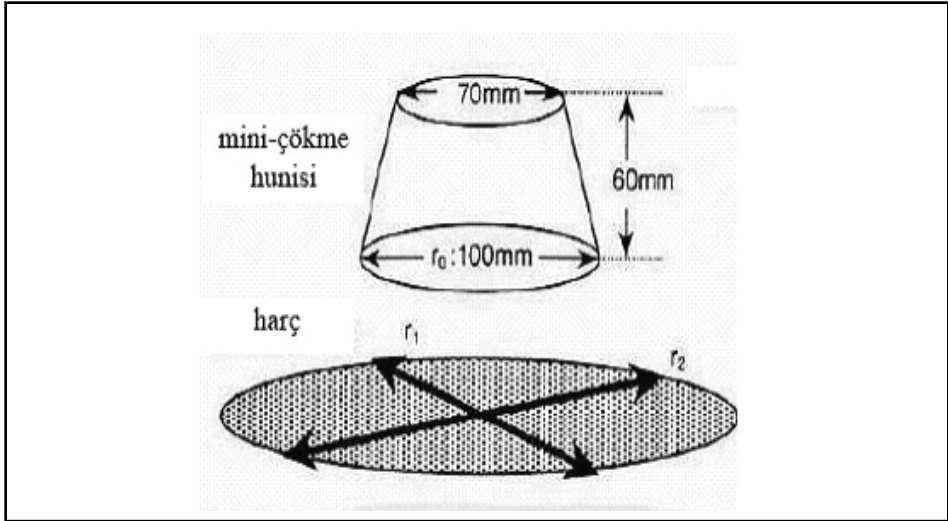


Şekil 3. Tuğla tozunun mikro yapısı [5]

Yukarıda tanımlanan mineral katkı malzemelerin yanında mermer işleme fabrikalarında açığa çıkan atık malzemelerin öğütülmesiyle elde edilen mermer tozunun da kendiliğinden yerleşen betonda viskozite düzenleyici veya arttırıcı olarak kullanılması araştırılmaktadır.

Bilindiği gibi agregaların tane boyutları küçüldükçe yüzey alanlarının genişlemesinden dolayı yüzeylerinin kaplanması için gereken su miktarı

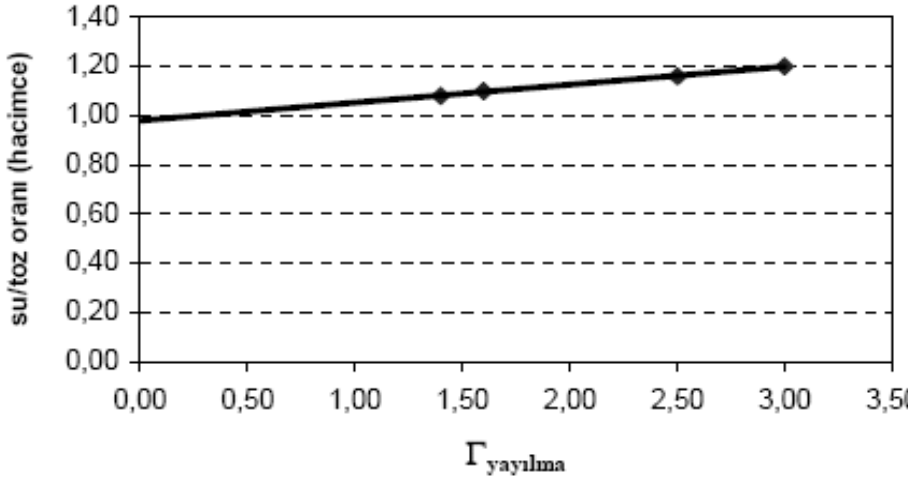
artmaktadır. Kendiliğinden yerleşen betonda viskoziteyi düzenlemek için kimyasal katkıları yanında ilave edilen mineral katkıları yüzey alanlarının çok geniş olmasından dolayı su miktarını oldukça etkilemektedirler. Bu nedenle EFRNARC komitesi [4], kendiliğinden yerleşen beton üretimine başlamadan önce kullanılan ince malzeme ile çimentonun birlikte kullanıldığında yüzey alanlarını kaplayacak olan su miktarının belirlenmesi önerilmektedir. Bunun için de belirli oranda çimento ve ince malzeme alınır. Farklı β_p veya su/toz oranlarında (0.8 – 0.9) ve farklı kimyasal katkı oranları kullanılarak üretilen harçlar üzerinde mini çökmede yayılma ve mini V- kutusu testleri gerçekleştirilir (Şekil 4). Buna göre çökmede-yayılma değerinin 24 – 26 cm arasında; V-kutusu deney sonuçlarının da 7 ile 11 sn arasında kalması gereklidir. Bu sınır değerler arasında kalan harçların oranları esas alınarak beton üretimine geçilebilir [4].



Şekil 4. Mini çökmede-yayılma konisi

Daha sonra ölçülen yayılma çaplarından aşağıdaki (1) nolu eşitlik yardımıyla rölatif çökmede-yayılma değeri (β_m) belirlenerek Şekil 5'de verildiği gibi grafik ortamına aktarılır. Grafikteki eğim çizgisinin "y" keseni kestigi noktadan rölatif çökmede-yayılma değerinin $\langle 0 \rangle$ olduğu değeri su/toz oranı (β_p) tespit edilir. β_p değerinin aynı zamanda çimento ve ince malzemenin oluşan ince malzemenin yüzey alanlarının kaplanması için gereken en az su/toz oranı olduğu da belirtilebilir.

$$\tilde{A}_m = (d/d_0)^2 - 1 \quad (1)$$



Şekil 5. β_p değerinin belirlenmesi

AMAÇ

Bu çalışma kapsamında mineral katkıların kimyasal katkı gereksinimine etkisinin araştırılması amaçlanmış olup, ince malzeme olarak 0.125 mm elek altına geçen uçucu kül, kireç taşı tozu, tuğla tozu ve mermer tozu kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmış olup, harçların üretiminde 0/4 mm elek aralığındaki doğal dere kumu kullanılmıştır. Kumun özgül ağırlığı 2.59 ve su emme değeri de % 3.73 tür. Her bir ince malzemenin ve çimentonun özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Harçların üretiminde kullanılan kimyasal katkı, güçlendirilmiş polikarboksilat bazlı yeni jenerasyon bir süper akışkanlaştırıcıdır. Firma tarafından kendiliğinden yerleşen beton için özel tasarlanmış ürüne ait özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

Harç üretimlerine geçmeden önce 450 kg çimentoyla her bir ince malzemeden 150 kg alınarak 1.1, 1.2, 1.3 ve 1.4 su/toz oranlarında çimento pastaları hazırlanarak β_p değerleri elde edilmiştir. Daha sonra su/ince malzeme oranı ağırlıkça 0.40 olacak şekilde aynı çimento ve ince malzeme içeriklerinde, doğal kum da kullanılarak harçlar hazırlanmıştır. İnce malzeme olarak mermer tozu ile kireçtaşı tozunun benzer özellik göstermesinden dolayı sadece kireçtaşı tozu kullanılmıştır. Mermer tozunun yerine sadece çimento kullanılarak kontrol serisi üretilmiştir. Harçların hazırlanmasında kimyasal katkı miktarı %0.5 ten % 2.5 e kadar 0.5 oranında arttırılarak beş

farklı seri tasarlanmış olup dört farklı ince malzeme için toplam 20 farklı seri üretilmiştir.

Çizelge 1. Portland çimentosu ve ince malzemelerin özellikleri

Kimyasal Analiz (%)	Portland Çimentosu (PC)	Uçucu kül (UK)	Tuğla tozu (TT)	Kireç Taşı tozu (KT)	Mermer Tozu (MT)
CaO	63.56	11.34	4.65	54.97	51.8
SiO ₂	19.3	51.5	63.11	0.01	4.67
Al ₂ O ₃	5.57	23.08	15.08	0.17	-
Fe ₂ O ₃	3.46	6.07	6.66	0.05	0.03
MgO	0.86	2.42	1.94	0.64	0.4
SO ₃	2.91	1.32	0.36	-	-
K ₂ O	0.8	2.54	2.34	-	-
Na ₂ O	0.13	0.77	0.78	-	-
Kızdırma kaybı	2.78	1.06	2.33	43.66	41.16
Fiziksel Özellikler					
Özgül ağırlık	3.07	2.13	2.73	2.7	2.7
İncelik(Blaine) (cm ² /g)	3860	1760	1405	5278	-

Çizelge 2. Kimyasal katkıya ait özellikler

Kullanım oranı (%)	Yoğunluk	pH	Katı madde (%)	Klorür (%)	NaO eşdeğeri
0.3 - 3	1.09	6.5	20	< % 0.1	< % 0.1

Hazırlanan taze harçlar üzerinde mini çökmede-yayılma ve V-kutusu deneyleri yapılarak, kimyasal katkı miktarının ince malzemeyle birlikte etkisi araştırılmıştır.

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

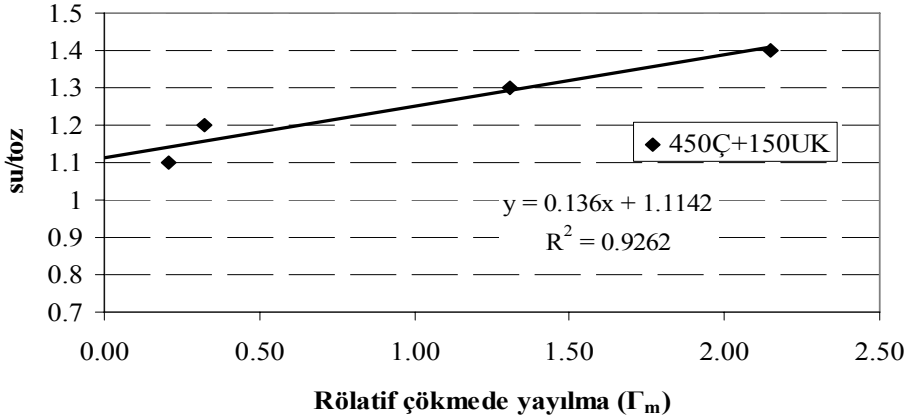
Farklı tiplerde ince malzeme kullanımının su ve katkı gereksinimine etkisi üzerine yapılan bu çalışmada çimento ile inceden oluşan pastanın β_p değerinin belirlenmesinde malzeme olarak uçucu kül, kireçtaşı tozu, tuğla tozu ve mermer tozu kullanılmıştır. Harçlarda su/toz oranı 0.40 olarak sabit tutulmuş olup, harçların üretimini takiben mini çökmede-yayılma ve V-kutusu deneyleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4'te sunulmuştur. Bazı serilerde özellikle düşük kimyasal katkı içeren ve tuğla tozu katkılı harçların çökmede-yayılma ve V-kutusu deneylerinden bir sonuç alınamamıştır. Ancak kıvamında farklılıklar gözlenmiştir. Bu serilerin işlenebilirliği üzerinde katkının etkisini görmek amacıyla sarsma tablası (Flow table) deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyde 25 sarsma sonrası harçlardaki yayılma çapı ölçülmüştür. Her bir ince malzeme için elde edilen mini çökmede-yayılma değerleri için su/toz oranlarıyla ilişkili

olarak Şekil 6 – 9'daki eğimler ve denklemler elde edilmiştir. Denklemler yardımıyla çimento pastalarına ait hacimce ve ağırlıkça gerekli olan en az su/toz oranları da Çizelge 3'de görülmektedir.

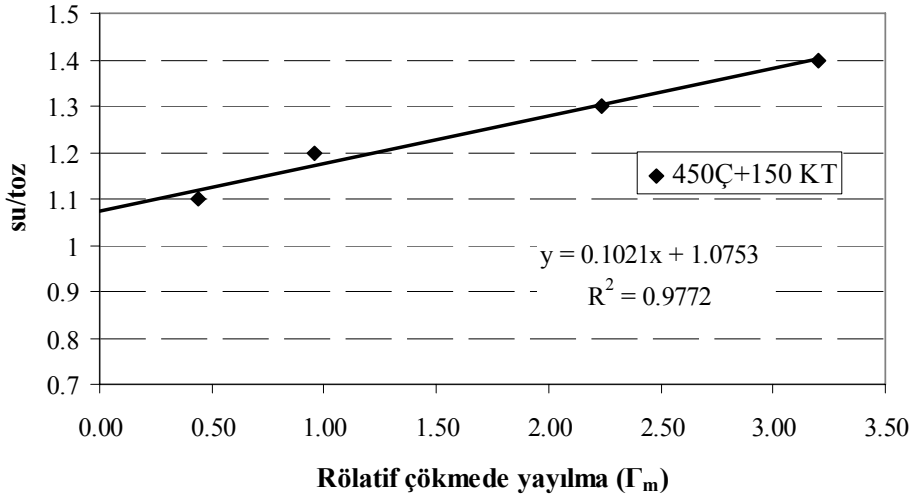
Çizelge 3 İnce malzemelerin en az su/ince malzeme oranları

İnce malzeme	Su/ince malzeme		Denklem	R
	Hacimce (β_p)	Ağırlıkça		
UK	1.1142	0.403	$y = 0.136x + 1.1142$	0.96
KT	1.0753	0.36	$y = 0.1021x + 1.0753$	0.99
TT	1.325	0.445	$y = 0.8364x + 1.325$	0.99
MT	1.0404	0.35	$y = 0.072x + 1.0404$	0.99

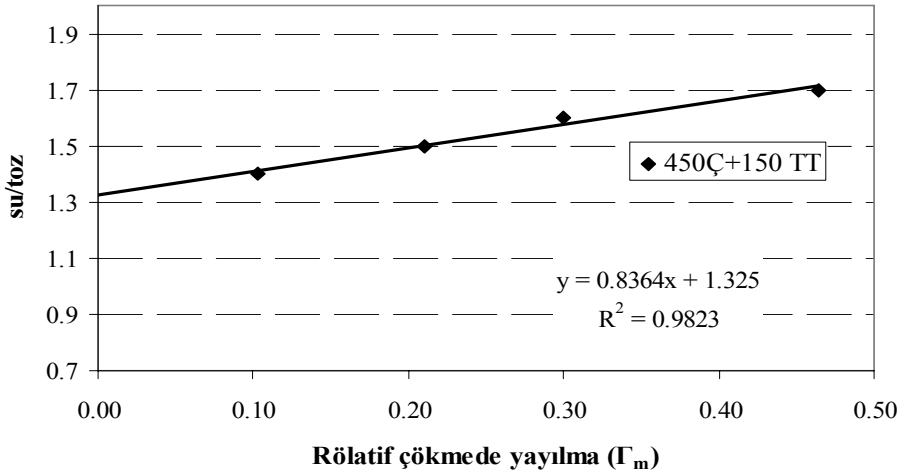
Şekil 6 – 9'dan ve Çizelge 4'den de görüldüğü gibi en az çökmede yayılma miktarı kireçtaşı tozu ve mermer tozu içeren serilerde daha sonra uçucu kül ve tuğla tozu içeren serilerde görülmektedir. Kireçtaşı tozu ve mermer tozu aynı kökenli malzemeler olup birbirlerine yakın özellikler göstermektedirler. Diğer yandan uçucu külün yoğunluğunun diğer ince malzemelere göre daha düşük olmasından dolayı aynı hacimdeki diğer ince malzemelere göre daha çok yüzey alana ve bundan dolayı su gereksinimine sahiptirler



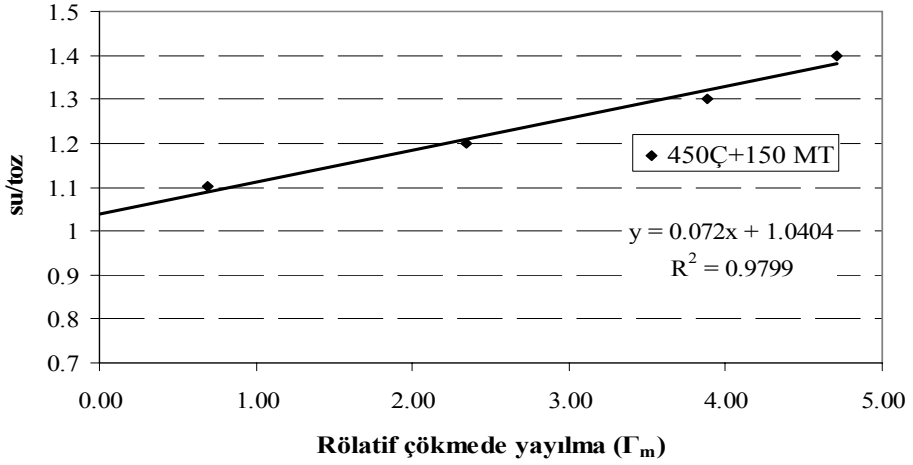
Şekil 6. Uçucu küllü çimento pastasının β_p değerinin elde edilmesi



Şekil 7. Kireçtaşı tozu içeren çimento pastasının β_p değerinin elde edilmesi



Şekil 8. Tuğla tozu içeren çimento pastasının β_p değerinin elde edilmesi



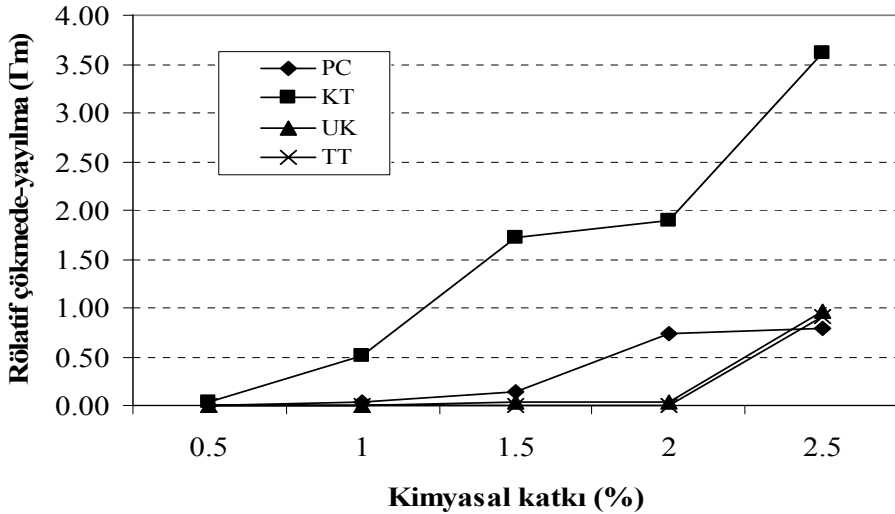
Şekil 9. Mermer tozu içeren çimento pastasının β_p değerinin elde edilmesi

Tuğla tozu ise pişmiş kil içeren bir malzeme olup su emme değeri yüksek olan bir malzemedir. Bu nedenle ince malzemeler içerisinde en çok su gereksinimine sahip olan malzeme olduğu belirtilebilir.

Çizelge 4. Farklı oranlarda katkı içeren taze harçların özellikleri

Malzeme	Kimyasal katkı (%)	Çökmede-yayılma (cm)	β_m	Flow Table (cm) (25 vuruşta)	V-kutusu (sn)	R_m	Harç Sıcaklığı (°C)
Çimento	0.5	10	0.00	13.20	-	-	22.3
	1	10.2	0.04	-	-	-	22
	1.5	10.7	0.14	-	8.52	1.17	21.6
	2	13.2	0.74	-	5.34	1.87	21.4
	2.5	13.4	0.80	-	6.49	1.54	20.5
Kireçtaşı Tozu	0.5	10.2	0.04	-	-	-	21.4
	1	12.3	0.51	-	10.18	0.98	22.2
	1.5	16.5	1.72	-	5.89	1.70	21.6
	2	17	1.89	-	5.24	1.91	19.7
	2.5	21.5	3.62	-	3.61	2.77	20.6
Uçucu kül	0.5	10	0.00	14.60	-	-	22.7
	1	10	0.00	16.30	-	-	23.7
	1.5	10.2	0.04	17.80	-	-	22.7
	2	10.2	0.04	-	17	0.59	23.9
	2.5	14	0.96	-	12.3	0.81	20.7
Tuğla Tozu	0.5	10	0.00	15.00	-	-	21.7
	1	10	0.00	17.70	-	-	22
	1.5	10	0.00	17.70	-	-	22.4
	2	10	0.00	20.20	-	-	21.6
	2.5	13.8	0.90	-	10.9	0.92	21.8

Çizelge 4'ten de görüldüğü gibi özellikle uçucu kül ve tuğla tozunun kullanıldığı serilerde çökmede-yayılma ve V-kutusu deneyleri tam olarak yapılamamıştır. Bu ince malzemelerin yüzey yapılarının geniş olmasından ve tuğla tozu gibi hammaddesi kil olan malzemelerin yüzey alanlarının su filmi ile kaplanması için gerekli olan oran sağlanamamış ve bu nedenle de kimyasal katkının özeliği bu malzemeler üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. Bu iki ince malzemenin sarsma tablasında alınan yayılma çapları incelendiğinde, harç içerisindeki kimyasal katkı miktarının artmasıyla yayılmanın daha fazla olduğu görülmektedir. V-kutusundan akış ölçülebilen tüm serilerde, yine harç üretiminde kullanılan kimyasal katkı miktarının artmasıyla harçların akışkanlığı yükseldiğinden dolayı akış süresi azalmıştır.



Şekil 10. Kimyasal katkı miktarıyla çökmede-yayılma arasındaki ilişki

Taze harçların içerdikleri kimyasal katkı oranlarıyla ilişkili olarak rölatif çökmede-yayılma değerleri Şekil 10'da görülmektedir. Kimyasal katkı en çok kireçtaşı tozu içeren serilerde etkili olduğu görülmüştür. Kireçtaşı tozunun yüzeylerinin su filmi ile kaplanması için gerekli olan su/toz oranı 0.35'tir. Harçların üretiminde ise su/toz oranı 0.40 seçilmiş olup, kimyasal katkının etkisi de bu harçların işlenebilirliği üzerinde oldukça etkisi göstermiştir. Daha sonra kontrol harcı olarak üretilen çimentolu harç üzerinde etkili olduğu da belirtilebilir. Ancak % 1.5 katkı oranına kadar kontrol harcı üzerinde de kimyasal katkının etkili olmadığı görülmüştür. Uçucu kül ve tuğla tozu katkılı serilerde de kimyasal katkının etkisi % 2 oranından sonra görülmüştür. Bu orana kadar kullanılan malzemelerin yüksek su emme özelliklerinden ve su/toz oranlarının 0.40 tan daha fazla olmasından dolayı ancak % 2.5 oranından

sonraki kimyasal katkı kullanımı harçların işlenebilirliğini arttırmıştır. Ancak bu artış kireçtaşı tozunun kullanıldığı harçlarınkı kadar yüksek değildir. Kireçtaşı tozunun kullanıldığı harçlarda % 1 oranında bile kimyasal katkının işlenebilirliği arttırdığı görülmektedir.

Şahmaran v.d. [5] uçucu kül, kireçtaşı tozu, tuğla tozu ve kaolen tozunu ince olarak kullanmışlar ve bu malzemelerle farklı kökenli kimyasal katkıları denemişlerdir. Kimyasal katkı türü olarak gerek taze betonun işlenebilirliği gerekse sertleşmiş betonun mekanik özellikleri üzerinde polikarboksilikat esaslı katkıların daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Diğer yandan ince malzeme tipine bakıldığında, en iyi işlenebilirlik kireçtaşı tozunda elde edilirken, uçucu külün kullanıldığı harçlarda da yüksek işlenebilirlik elde edilmiştir. Ancak tuğla tozu ve kaolenin ince malzeme olarak kullanılmaları durumunda taze betonun akışkanlığı önemli derecede azaldığı görülmüştür.

SONUÇ

Kendiliğinden yerleşen betonun önemi giderek artmakta ve kullanılan ince malzemelerin KYB özellikleri üzerine etkisi araştırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında da farklı türdeki ince malzemelerin kimyasal katkı gereksinimleri üzerindeki etkisi araştırılmış olup, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Her bir ince malzemenin yüzeyinin su filmiyle kaplanması için gerekli olan su/toz oranı farklıdır. Bu farklılık dikkate alınmadığında işlenebilirlik büyük ölçüde kaybolmaktadır.
- Su/toz oranı en yüksek olan ince malzemenin tuğla tozu olduğu; en düşük malzemenin de kireçtaşı tozu olduğu görülmüştür.
- Sabit su/toz oranında kimyasal katkı oranı arttıkça tüm harçların işlenebilirliği de artmıştır.
- Bazı ince malzemelerin sahip oldukları β_p değerinin altında bir değerde harçlar üretildiğinde, kimyasal katkının etkisi yüksek oranlarda görülmüştür.

Kendiliğinden yerleşen beton tasarımında özellikle ince malzeme seçiminde, ince malzemenin öncelikle β_p değerinin belirlenerek bu oranda veya üzerindeki su/toz oranlarının tercih edilmesi başarılı bir beton tasarımının göstergesi olacaktır. İnce malzeme türü katkı ihtiyacını önemli derecede etkilemektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Okamura, H., Ouchi, M., Self-compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, 5-15, April 2003.
- [2] Felekoğlu, B., 2003, Kendiliğinden yerleşen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Böl., Yapı Malzemesi A.B.D., Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- [3] Kandemir, A., 2005, Kendiliğinden yerleşen betonun kalıcılık özelliklerinin incelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Böl., Yapı Malzemesi A.B.D., Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- [4] EFNARC, "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete", Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, February, 2002, s.8.
- [5] Şahmaran, M., Christianto, H.A., Yaman, İ.Ö., 2006, The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars, Cement & Concrete Composites (28) 432-440.
- [6] Ho D.W.S., Sheinn A.M.M., Ng C.C., Tam C.T., 2002, "The use of quarry dust for SCC applications", Cem. Concr. Res., Vol: 32, pp. 505-511.
- [7] Yahia A., Tanimura M., Shimabukuro A., Shimoyama Y., 1999, "Effect of rheological parameters on self compactability of concrete containing various mineral admixtures", Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, pp. 523-536.