

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 özeliğın 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.

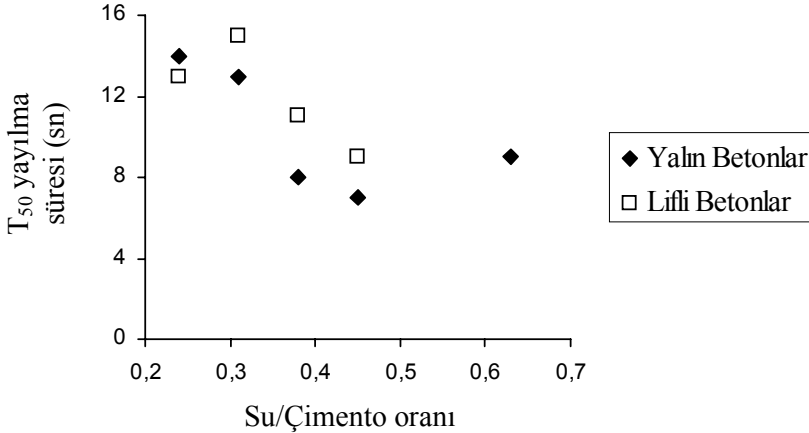
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

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.

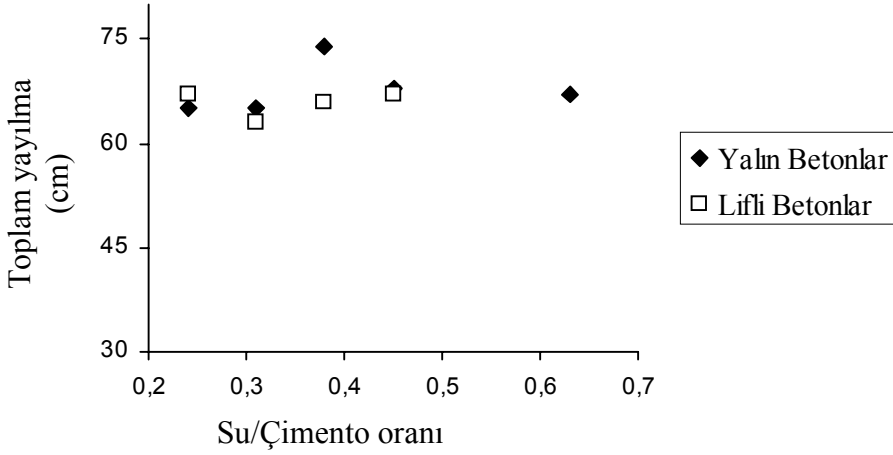
Taze Beton Deneyleri

Çökme-Yayımla Deneyi

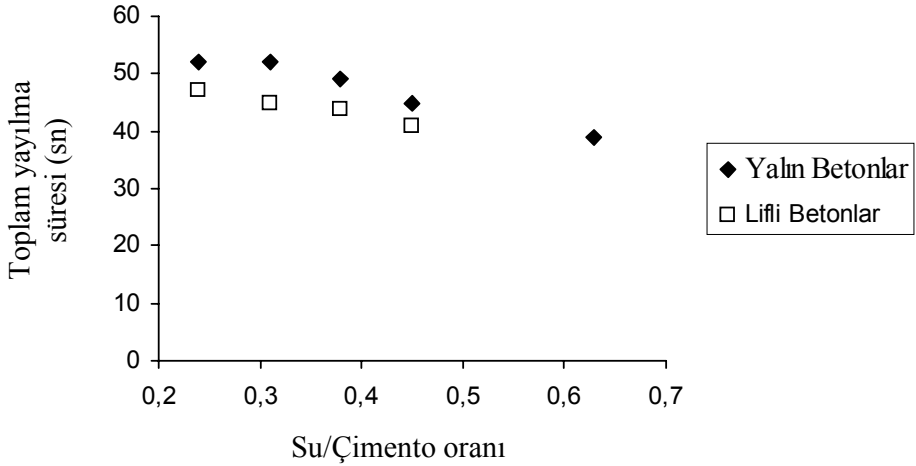
Çökme-Yayımla deneyinde 50cm çapındaki bir alana yayılma süresi ile toplam yayılma süresi ve yayılma çapı belirlenmiş deney sonuçları Şekil 1-3'de verilmiştir.



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



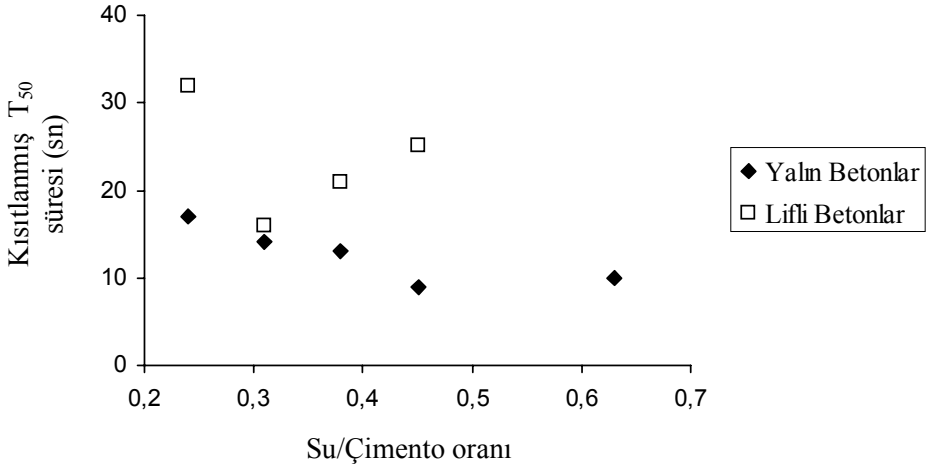
Şekil 2. Yalın ve lifli betonların toplam yayılma çaplarının su/çimento oranı ile değişimi



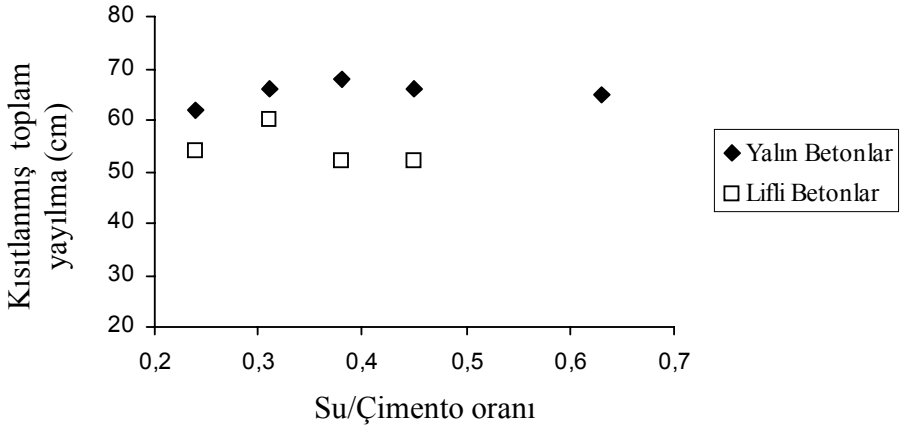
Şekil 3. Yalın ve lifli betonların toplam yayılma sürelerinin su/çimento oranı ile değişimi

Kısıtlanmış Yayılma Deneyi

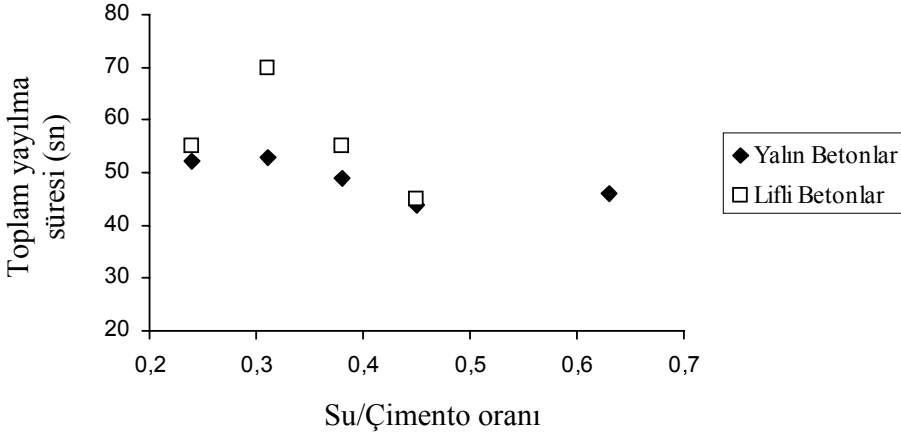
Kısıtlanmış yayılma deneyi [7] yapılarak kendiliğinden yerleşen betonların kendi ağırlıkları altında donatılar arasından geçiş yetenekleri incelenmiş, 50 cm çapındaki bir alana yayılma süresi ile toplam yayılma süresi ve yayılma çapı belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 4-6' da verilmiştir.



Şekil 4. Yalın ve lifli betonlarda kısıtlanmış T₅₀ sürelerinin su/çimento oranı ile değişimi



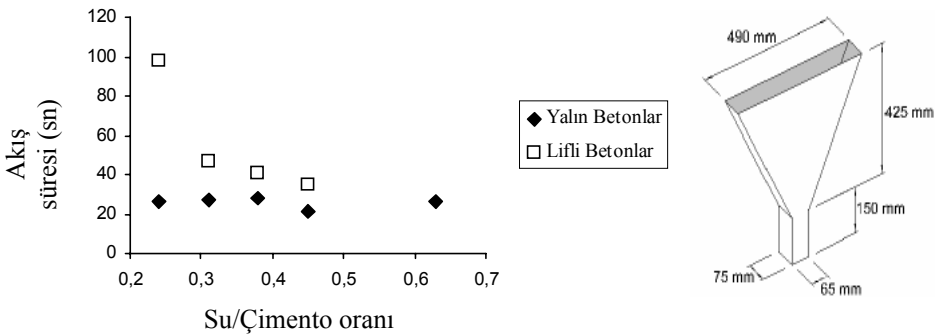
Şekil 5. Yalın ve lifli betonların kısıtlanmış toplam yayılma çaplarının su/çimento oranı ile değişimi



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.

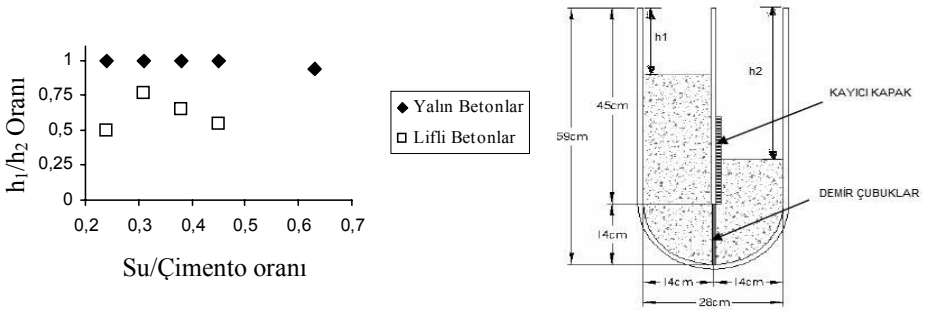


Şekil 7. Yalın ve lifli betonların V-hunisi akış sürelerinin su/çimento oranı ile değişimi

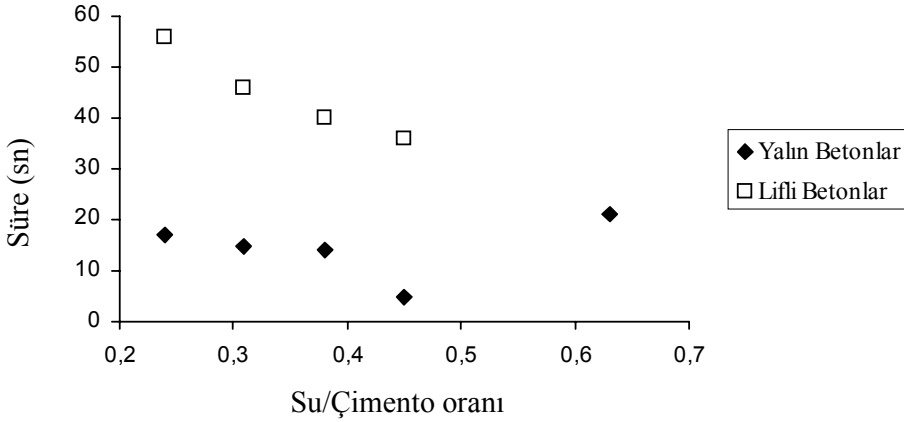
U-Kutusu Deneyi

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 su/çimento oranı ile 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 silindir 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.

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

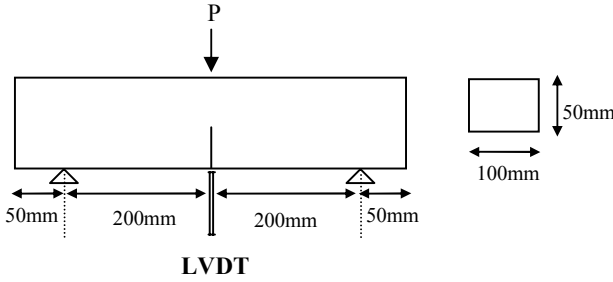
Deneylerde elde edilen yarma-çekme dayanımı değerleri Tablo 1'de verilmektedir.

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

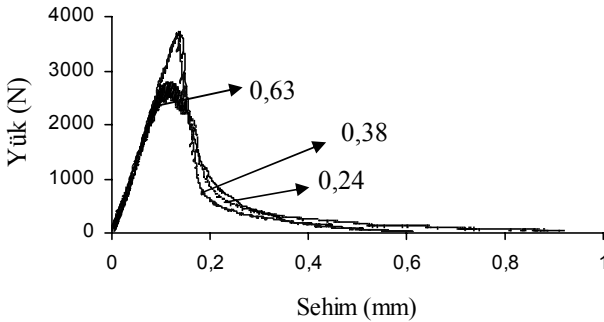
Kırılma Enerjisi Deneyi

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.

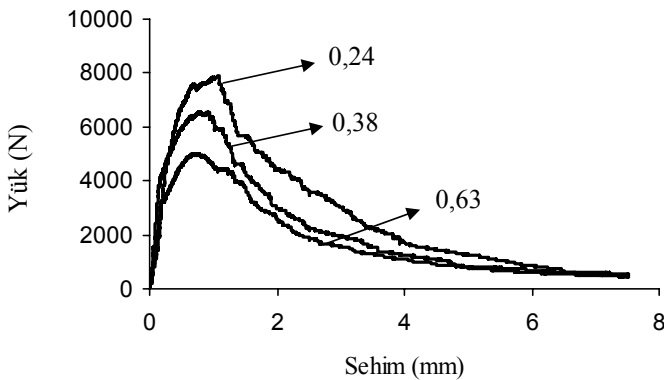


Şekil 10. Kırılma enerjisi deney düzeneği

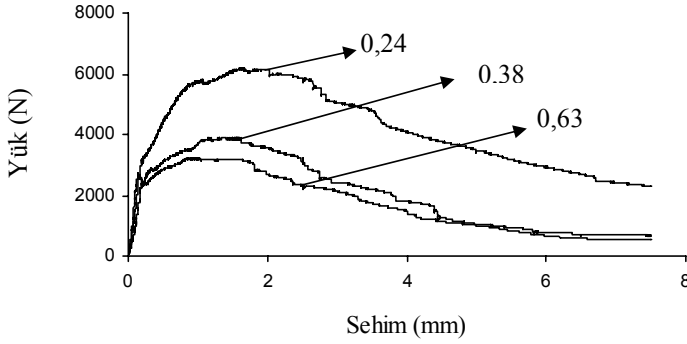
Deneyden önce numunelerin yan yüzeyine yapıştırılan levhaya sehim ölçmek amacı ile bir adet LVDT yerleştirildi. Bu deney düzeneği ile uygulanan yükler ve bu yüklerle karşı gelen sehim değerleri alıcılardan bilgisayara aktarılarak yük-sehim grafiklerine geçildi. Elde edilen yük-sehim eğrilerine ait tipik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



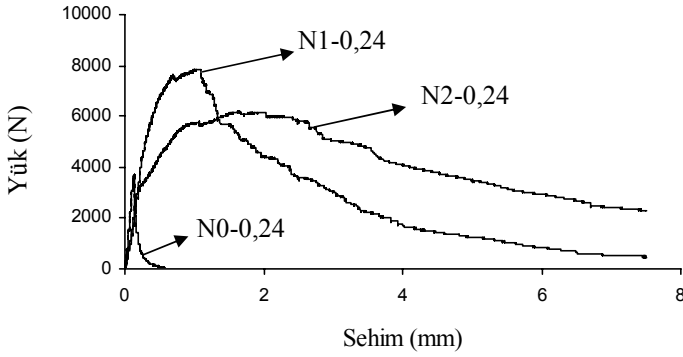
Şekil 11. 0,24, 0,38, 0,63 su/çimento oranına sahip yalın betonların tipik yük-sehim ilişkisi



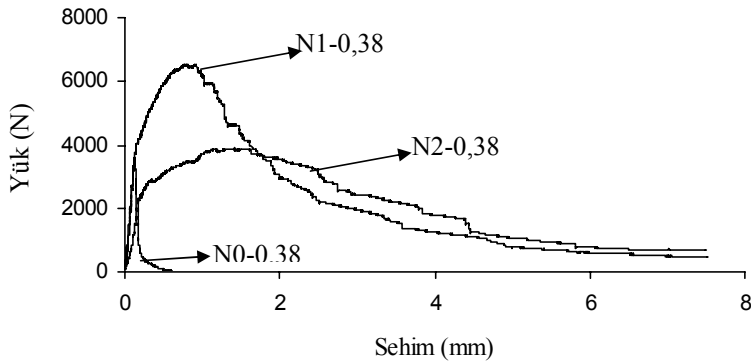
Şekil 12. 0,24, 0,38, 0,63 su/çimento oranına sahip normal dayanımlı lif içeren betonların tipik yük-sehim ilişkisi



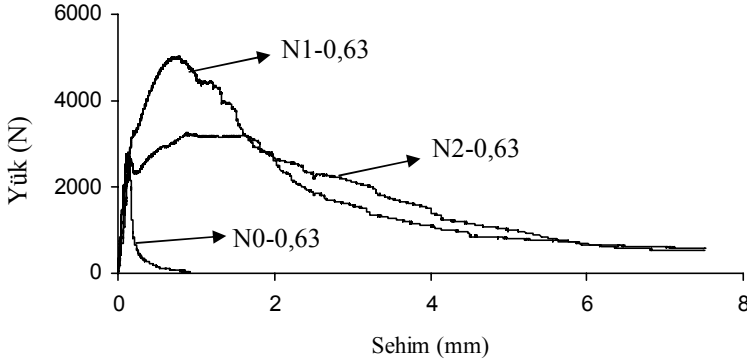
Şekil 13. 0,24, 0,38, 0,63 su/çimento oranına sahip yüksek dayanımlı lif içeren betonların tipik yük-sehim ilişkisi



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



Şekil 15. 0,38 su/çimento oranına sahip yalnız 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.

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

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

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çökme-Yayıma Deneyi Sonuçları

Şekil 1, 2 ve 3'de görüldüğü gibi çökme-yayıma 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 içerdiği 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 taşıdığına 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

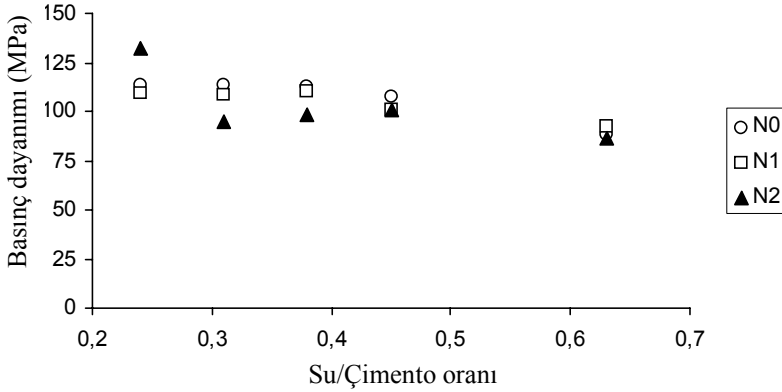
oldukça farklı davranış gözlenmiştir. 0,24 su/çimento oranında h_1/h_2 oranı 0,5 mertebesindeyken 0,38 de 0,8 değerine yaklaşmış ve 0,63 su/çimento oranında tekrar 0,5 seviyelerine düşmüştür. Yüksek su/çimento oranlarında azalan kohezyondan dolayı çimento hamurunun agregaları ve lifleri taşıma yeteneği düşmüş ve liflerin ve agregaların betondan sıyrılıp U-kutusunun altından geçişi tıkamasıyla 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 mukavemetine 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 karşılaştığı 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

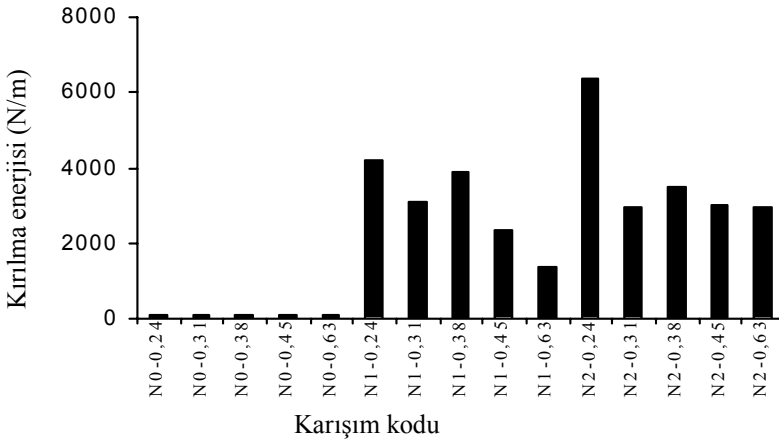
Disk Yarma Deneyi Sonuçları

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 enerjilerilifli bileşimleri için 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 görmekte olup çatlağı ilerletmek 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 MPa'dan 6,8 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 ulaşılarak %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 işlenebilirlik 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.