

ÇİMENTOLU MALZEMELERDE YÜKSEK MİKTARDA KISA LİF KULLANIMI

HIGH VOLUME USAGE OF SHORT FIBRES IN CEMENTITIOUS MATERIALS

Berkin Atahan Gökbayrak, Ayşegül Dağdeviren, Burcu Akçay*

Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

*Burcu.Akçay@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada poliamid esaslı kısa lifler ile takviye edilmiş çimentolu malzemelerin işlenebilirlik özellikleri, dayanımı ve rötre davranışları araştırılmıştır. Su/çimento (s/ç) oranı 0,28, 0,35 ve 0,42 olan harçlar üretilmiştir. 0,28 s/ç oranı olan serilerde en yüksek %2 oranında, 0,35 s/ç oranı olan serilerde en yüksek %4 ve 0,42 s/ç oranı olan serilerde ise en yüksek %5 oranında kısa lif kullanılabilmiştir. Bu serilerde değişik oranlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak lif içeren karışımların işlenebilirliği yalın harç numunesine yaklaştırılmaya çalışılmıştır. Aynı serilerin sabit miktarda akışkanlaştırıcı eklenmiş alternatif karışımları da üretilmiştir. Taze haldeki harçların yayılma çapları ölçülmüş, sertleşmiş halde de üç noktalı eğilme deneyi ve basınç deneyi yapılmıştır. Bunun yanı sıra kullanılan liflerin karışımların kuruma ve otojen rötresine etkisi s/ç oranı 0,42 olan serilerde erken ve ileri yaşlarda belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı s/ç oranlı çimentolu malzemelerde hedeflenen taze hal, sertleşmiş hal ve düşük rötre değerlerine ulaşabilecek karışımları belirlemek için optimizasyon analizlerinde de kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Polimer lif, kısa lif, işlenebilirlik, dayanım, rötre.

Abstract

In this study, workability properties, strength and shrinkage behaviours of cement-based materials reinforced with polyamide short fibres were investigated. Mortars were produced 0,28, 0,35 and 0,42 water/cement (w/c) ratio. In 0,28 w/c series maximum usage of short fibres could be as 2%, while in 0,35 and 0,42 w/c series that could be 4% and 5%, respectively. In these series the workability of fibre reinforced mixtures was tried to be reach closer to the plain mortar sample with using various amount of superplasticizer. The alternative mixtures of same series were produced by using constant amount of superplasticizer. The flow diameters of mortars were measured in the fresh state, bending and compressive strength tests were performed in the hardened state. In addition, the effects of the fibres used on the drying and autogenous shrinkage of the mortars were determined in the series with a w/c ratio of 0,42 at early and later ages. The obtained results were also used in optimisation analyses to determine the mixtures that can reach

the aimed fresh state, hardened state and low shrinkage values in cementitious materials with different w/c ratios.

Keywords: Polymer fibre, short fibre, workability, strength, shrinkage.

1. GİRİŞ

Betonun çekme dayanımının ve çekme birim deformasyon kapasitesinin düşük olması nedeniyle çeşitli malzemelerden üretilmiş lifler ilave edilerek üretilmesi yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır. Betonda lif kullanımı, betonun enerji yutma kapasitesini ve sünekliğini artırır. Liflerin beton içerisinde ne kadar kullanılabilceği lifin geometrik şekline ve lif ile beton arasındaki kenetlenmeye bağlıdır. Bu yüzden değişik malzemelerden üretilmiş ve değişik geometrik formlarda lifler bulunmaktadır. Lif katkısı betonda oluşan çatlakların büyümesinin engellenmesine ve betonun kırılma tokluğuna olumlu yönde etki etmektedir [1-3]. Lifler çekme gerilmelerini betonun karşılayamadığı bölgelerde karşılayarak çatlakların oluşumunu ve ilerlemesini engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Lif katkısı olmayan çimento esaslı kompozitlerde göçme davranışı gevrek ve ani bir şekilde meydana gelmektedir. Beton içerisine eklenen lifler bu gevrek kırılma davranışının önüne geçebilmektedir [4-6]. Lif katkılı çimento esaslı kompozitlerde lif türüne ve geometrisine bağlı olarak da bu davranışın önüne geçilebilmektedir [5-8]. Kısa ince lifler tepe yükü öncesi mikro çatlama bölgesindeki mikro çatlakları önler ve köprülerken, uzun lifler köprülenme bölgesindeki makro çatlakları önlerler [4]. Beton içerisindeki suyun fiziksel ve kimyasal sebepler yüzünden beton matrisinden uzaklaşmasından dolayı betonda hacimce küçülme meydana gelir. Rötreye sebebiyle oluşan çatlaklar betonda kusur oluşumuna neden olur. Lifler, rötreye çatlakları da dahil olmak üzere yüzey gerilmelerini üzerine aldığı yapılan çalışmalar sonucu bilinmektedir [6]. Zamanla ve değişen gerilme hali ile bu çatlakların boyutları ve biçimleri değişerek betonun içerisine doğru ilerler. Çatlak ilerlemesiyle betonun geçirimsizliği azaldığından dürabilite problemleri ortaya çıkar. Beton içerisine düzgün dağılmış lifler betonun plastik rötreye çatlaklarını önler. Sertleşmiş halde ise lifler mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesini engeller. Bunun yanı sıra lifler köprülenerek mevcut makro çatlakları bir arada tutarak betonun dağılma ve ayrılmasını azaltırlar. Lif takviyeli beton uygulamalarında giderek artan oranlarda kullanılmaya başlanan kısa liflerin betonun mekanik özelliklerine olumlu etkilerinin yanı sıra erken yaşlardaki çatlakları önlemede de etkileri olduğu bilinmektedir. Polimer esaslı sentetik lifler ise belirtilen bu ikinci etkiyi belirgin bir şekilde göstermektedir. Bu çalışmada kısa poliamid lif kullanımının farklı su/çimento oranlı çimento esaslı malzemelerde kullanılabilecek oranlarına, mekanik özelliklere olan etkisine, taze haldeki işlenebilirliğe ve rötreye olan etkileri belirlenmeye çalışıldı. Kısa liflerin farklı oranlarda kullanılması sonucu liflerin ölçülmek istenen parametrelere olan etkisi incelendi.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler ve Karışım Oranları

Deneysel çalışmada CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılarak su/çimento (s/ç) oranı 0,28, 0,35 ve 0,42 olan harç karışımları hazırlanmıştır. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan agrega kuvarz kökenli doğal kumdur. Kumun özgül ağırlığı

2400 kg/m³, su emme değeri ise %2,1'dir. Akışkanlaştırıcı katkı olarak üçüncü nesil yüksek performanslı polikarboksilik eter süperakışkanlaştırıcı katkı kullanıldı. Polimer lif olarak poliamid esaslı 12 mm boyunda, özgül ağırlığı 1,14 gr/cm³, fiber adedi 111 Milyon/kg ve çekme dayanımım 900 MPa olan kısa lifler kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

Deneysel çalışma için 48 farklı harç üretildi. Karışımlar hazırlanırken karışım içerisindeki lif miktarı ve istenen kıvamıya bağlı olarak kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarı değiştirildi. Deney gruplarında s/ç oranı, lif oranı, akışkanlaştırıcı katkı ve kıvam değişkendir. Hazırlanan harç karışımlarının kıvamlarının belirlenmesi için yayılma tablası deneyi uygulandı. Prizmatik 40×40×160 mm boyutlarındaki numuneler eğilme ve basınç dayanımlarını ölçmek için, 25×25×285 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler ise s/ç oranı 0,42 olan karışımların rötre ölçümleri için kullanıldı. Rötre ölçümleri 0,001 m/m hassasiyetle 24 saatlik periyotlarla yapıldı.

Karışımlar iri agrega içermeyen harç örnekleri olduğu, kısa sentetik lifler kullanıldığı ve düşük miktarlarda dökümler yapıldığı için geleneksel 1m³ içindeki hacimce lif oranı yerine lif içerikleri çimento miktarının ağırlıkça yüzdesi olarak kullanıldı. Lif miktarı %0'dan başlayarak %0,5 artışla ilerletildi. s/ç oranı 0,28 olan serilerde lif miktarı en çok %2, s/ç oranı 0,35 olan serilerde lif miktarı en çok %4 ve s/ç oranı 0,42 olan serilerde ise lif miktarı en fazla %5 olarak kullanılabilirdi. M ile başlayan karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı miktarı sabit tutulup lif miktarının işlenebilirliğe etkisi gözlemlendi. K ile başlayan karışımlarda ise istenen kıvamı elde etmek için değişen miktarlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanıldı. Örneğin M35-1,5 kodlu harç numunesi s/ç oranı 0,35 olan ve lif miktarı kullanılan çimento miktarının ağırlıkça %1,5'i olan seridir. Karışım tasarımı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Harç karışım içerikleri (2 dm³ için)

Karışım Kodu	M28	K28	M35	K35	M42	K42
Kısa Lif İçeriği	Değişken	Değişken	Değişken	Değişken	Değişken	Değişken
s/ç	0,28	0,28	0,35	0,35	0,42	0,42
Çimento (g)	2693	2693	2269	2269	2291	2291
Su (g)	754	754	794	794	963	963
Kum (g)	1098	1098	1005	1005	1139	1139
Akışkanlaştırıcı Katkı (g)	6,0	Değişken	1,6	Değişken	0	Değişken

3. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

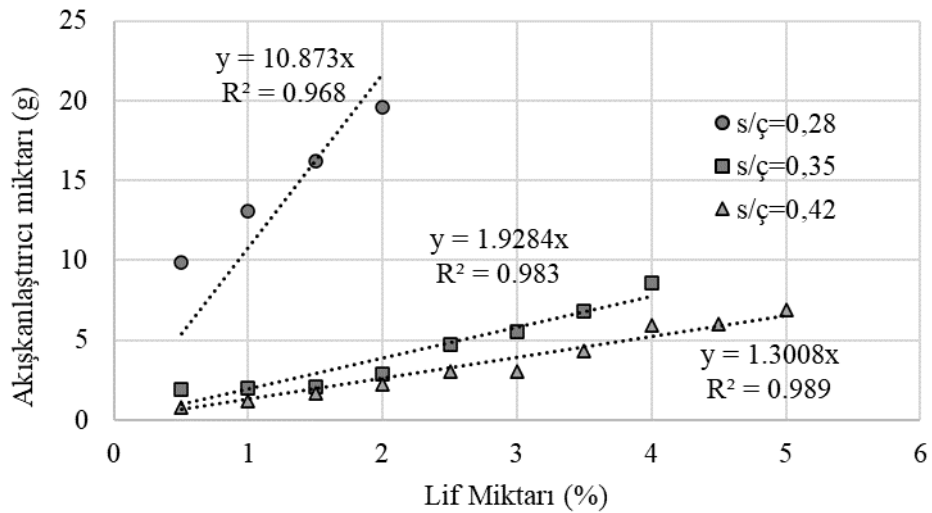
3.1. Taze Harç Deneyleri

Her bir s/ç oranı için işlenebilir kıvamdaki kontrol harcından başlayarak aynı süper akışkanlaştırıcı (SA) miktarı kullanılarak üretilen lif takviyeli harçların yayılma tablası deneyinden elde edilen sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Görüldüğü üzere kısa lif kullanımı harcın işlenebilirliğini beklenildiği gibi azaltmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak işlenebilirlik belirli bir düzeye kadar artmıştır.

Şekil 1’de ise K kodu ile üretilen serilerin yani benzer yayılma değerleri verecek şekilde değişken miktarlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanılan harçlarda lif oranı ile akışkanlaştırıcı miktarı ilişkisi verilmiştir. Beklenildiği gibi lif miktarı arttıkça benzer işlenebilirlik elde etmek için gerekli akışkanlaştırıcı miktarı artmıştır. Bu artış s/ç oranı 0,28 olan serilerde çok daha belirgindir (Bu harçlarda kullanılan lif miktarlarının s/ç oranı 0,35 ve 0,42 olan serilere göre daha düşük olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır).

Tablo 2. s/ç oranı 0,28, 0,35 ve 0,42 olan ve sabit akışkanlaştırıcı miktarı kullanılarak üretilen serilere ait yayılma deney sonuçları (2dm³ döküm için)

Numune Kodu	Mikro Lif (g)	SA (g)	Yayılma (cm)	Numune Kodu	Mikro Lif (g)	SA (g)	Yayılma (cm)
M28	0,0	6,0	15,38	M42	0	0	17,77
M28-0,5	13,5	6,0	14,67	M42-0,5	11,5	0	17,73
M28-1	26,9	6,0	12,90	M42-1	22,91	0	16,60
M28-1,5	40,4	6,0	11,68	M42-1,5	34,4	0	15,20
M28-2	53,9	6,0	11,20	M42-2	45,8	0	14,29
M35	0	1,6	17,00	M42-2,5	57,3	0	13,40
M35-0,5	11,4	1,6	14,95	M42-3	68,7	0	12,72
M35-1	22,7	1,6	13,85	M42-3,5	80,2	0	11,95
M35-1,5	34,0	1,6	12,80	M42-4	91,6	0	11,77
M35-2	45,4	1,6	11,83	M42-4,5	103,1	0	10,82
M35-2,5	56,7	1,6	11,34	M42-5	114,6	0	10,70
M35-3	68,1	1,6	10,83				
M35-3,5	79,4	1,6	10,85				
M35-4	90,8	1,6	10,38				



Şekil 1. Akışkanlaştırıcı katkı miktarı ve lif miktarı ilişkisi

3.2. Harçların Mekanik Özellikleri

Lif katkısını malzemenin mekanik özelliklerine etki ettiği bilinmektedir. Lif katkısını optimum düzeyde kullanabilmek için s/ç oranı, kullanılan akışkanlaştırıcı katkı çeşidi ve miktarı büyük önem taşımaktadır. Ortalama sonuçların verildiği Tablo 3 incelendiğinde genel anlamda kısa liflerin basınç dayanımına beklenildiği gibi olumlu bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Diğer yandan, süneklik ve eğilme dayanımı üzerinde kayda değer artış gözlenmiştir.

Tablo 3. Üretilen harçların mekanik dayanımları

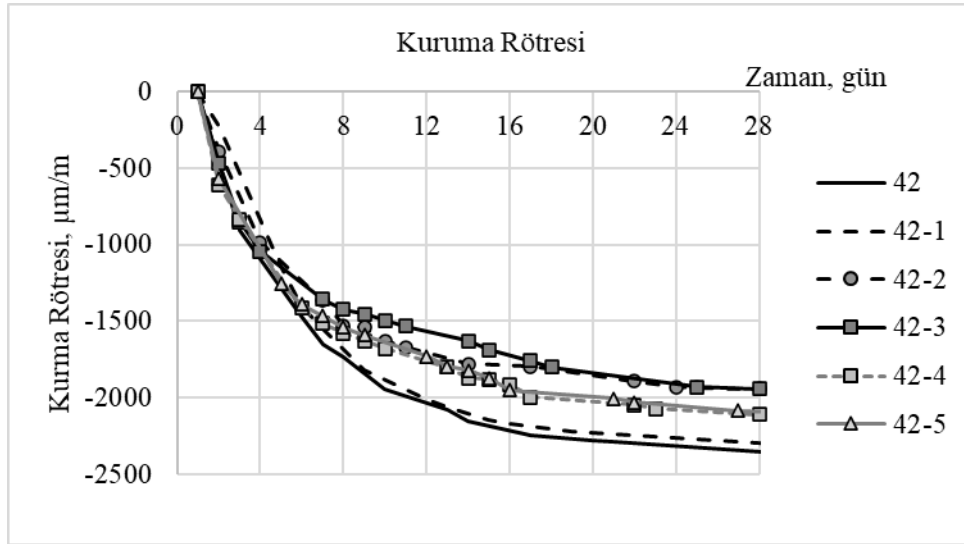
Numune Kodu	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Numune Kodu	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
M28	3,88	70,85	M42	2,00	58,88
M28-0,5	4,21	68,57	M42-0,5	2,55	56,00
M28-1	4,94	66,43	M42-1	2,93	55,52
M28-1,5	4,99	64,86	M42-1,5	3,56	51,22
M28-2	5,22	66,35	M42-2	4,16	47,33
K28-0,5	4,50	66,02	M42-2,5	4,28	47,15
K28-1	4,45	70,86	M42-3	5,02	45,85
K28-1,5	4,89	62,51	M42-3,5	5,86	43,05
K28-2	5,30	63,83	M42-4	7,11	38,91
M35	2,95	58,09	M42-4,5	7,14	36,62
M35-0,5	2,89	54,70	M42-5	9,54	36,74
M35-1	3,08	60,70	K42-0,5	2,48	59,01
M35-1,5	4,02	56,07	K42-1	3,09	57,49
M35-2	4,56	55,88	K42-1,5	3,96	53,59
M35-2,5	4,93	55,17	K42-2	4,42	53,22
M35-3	6,12	48,83	K42-2,5	4,85	52,94
M35-3,5	6,01	45,42	K42-3	5,30	50,97
M35-4	8,14	47,24	K42-3,5	6,32	43,50
K35-0,5	3,30	59,19	K42-4	6,63	38,36
K35-1	3,35	54,71	K42-4,5	4,90	38,57
K35-1,5	3,56	54,52	K42-5	6,14	38,61
K35-2	4,43	51,20			
K35-2,5	6,28	49,36			
K35-3	6,21	49,03			
K35-3,5	8,13	48,36			
K35-4	9,72	43,64			

Tablo 3'te görüldüğü üzere yalın harç numunelerinde s/ç oranı arttıkça numunelerin eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Karışıma %1,5 lif eklendiğinde, yalın harç numunelerine göre %78'e varan (M42 ve M42-1,5) artış gözlemlendi. Aynı s/ç oranına sahip olan numunelerde akışkanlaştırıcı katkı miktarının eğilme dayanımına önemli bir etkisi olmamıştır. En yüksek eğilme dayanımı s/ç oranı en düşük, lif katkısı ise en fazla olan K28-2 serisine ait olduğu görülmektedir. Kısa lif katkısının eğilme dayanımına olan olumlu etkisi deney sonuçlarında görülmektedir. Lif miktarı ile eğilme dayanımının birlikte artış gösterdiği görülmektedir. Lif katkısı sayesinde ani kırılma görülen liffsiz harçlarda çatlak oluşumu gözlenmiştir.

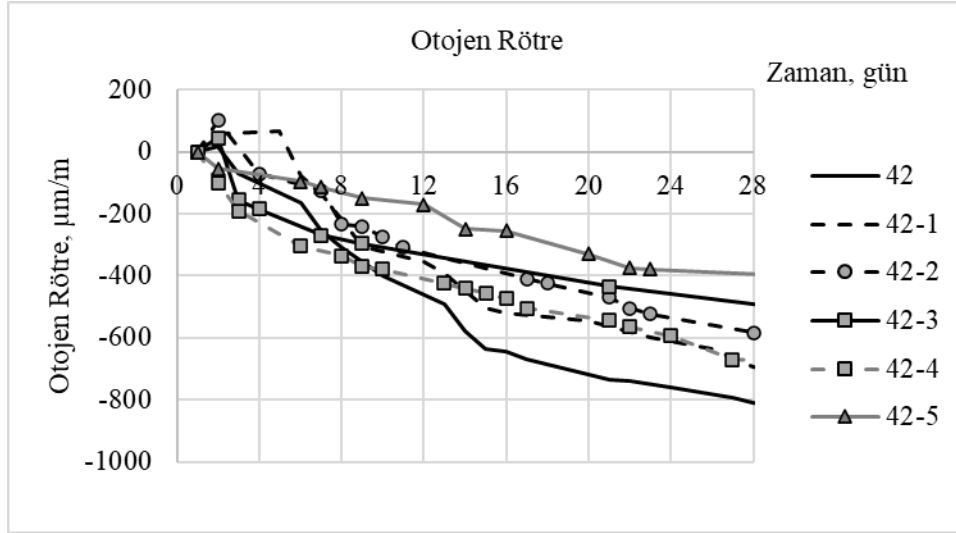
Karışımında kullanılan lif miktarı ile basınç dayanımı arasında değişken bir ilişki bulunmaktadır. Kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarı aynı olan numunelerde %37'ye varan (M42 ve M42-5) dayanım kaybı görülmektedir. Bu kayıp matraste lif kaynaklı olarak boşluk hacminin artıyor olmasıdır. Bu durum işlenebilme özelliklerinin çimentolu karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki önemli etkisi olduğunu da göstermektedir.

3.2. Rötire Sonuçları

Şekil 2 ve 3'te s/ç oranı 0,42 olan ve süperakışkanlaştırıcı içermeyen M serisi harc numunelerinin kuruma rötresi ve otojen rötire sonuçları verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde mikro liflerin kuruma rötresi ve otojen rötire üzerinde olumlu etkileri olduğunu görülmektedir. Bunun sebebi liflerin oluşan mikro çatlakları köprülemesi ve çatlak enerjisini yutmasıdır. Mikro poliamid lif katkısının çimento esaslı malzemelerin rötire etkisinden korunması için etkili bir yöntem olduğu görülmektedir. Diğer yandan kullanılan lif oranının rötreye olan etkisinin farklı olduğu gözlenmektedir. Dolayısıyla tasarım yaparken bu etkiyi göz önüne almak gerekmektedir. Kısa poliamid lif katkısının çimento esaslı malzemelerin hem otojen hem de kuruma rötire etkisinden korunması için etkili bir yöntem olduğu görülmektedir.



Şekil 2. s/ç oranı 0,42 olan seriye ait kuruma rötresi grafiği (0-28 gün)



Şekil 3. s/ç oranı 0,42 olan seriye ait otojen rötire grafiği (0-28 gün)

4. OPTİMUM KARIŞIM TASARIMI

Üç farklı s/ç oranı için değişik kısa lif oranlarına sahip çimentolu karışımların işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve rötire sonuçları deneysel olarak elde edildikten sonra optimum karışımı elde etme çalışmaları yapılmıştır. Bağımsız değişken olarak s/ç oranı ile lif miktarı alınarak belirtilen deneysel sonuçları en iyi temsil eden kuadratik modeller regresyon analizleri ile kurulmuştur. Bu modeller kullanılarak uygulanan çoklu optimizasyon ile çeşitli hedef karışımları elde edilmiştir (Çoklu optimizasyon analiz adımları ile ilgili detaylar Akçay ve Tasdemir [9] yayınında bulunabilir).

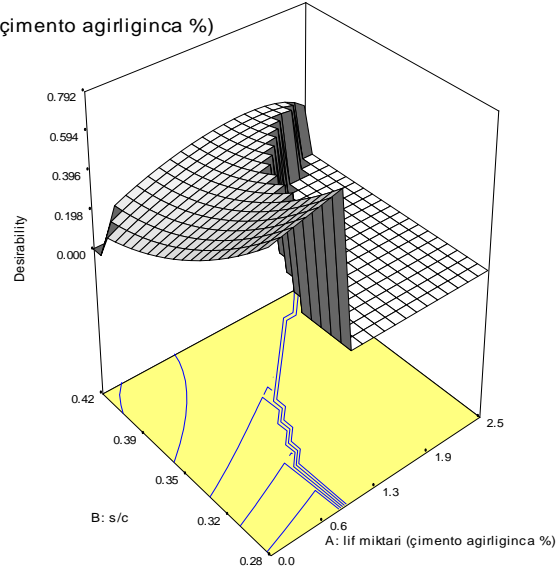
İlk çalışma olarak Tablo 4'te görüldüğü gibi lif miktarı %2'ye kadar olan karışımlar için eğilme dayanımı en yüksek ve yayılma değeri 13,5 cm'den az olmayacak şekilde yüksek olan optimum karışım tasarımı yapılmıştır. Yapılan analizlere göre birbirine yakın arzu edilebilirlik derecesinde olan üç farklı karışım optimum sonuç olarak bulunmaktadır. Bu karışımların içerisinde üretilmesi en uygun harç karışımı lif miktarı çimento ağırlığının %0,8 oranında lif içeren ve s/ç oranının 0,28 olan karışımdır. Elde edilen tepki yüzeyi Şekil 4'te verilmiştir.

Tablo 5. Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışımların özellikleri

Lif Miktarı (%)	s/ç oranı	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Yayılma (cm)	Arzu edilebilirlik
0,8	0,28	67,77	4,49	13,5	0,802
0,8	0,28	67,61	4,47	13,5	0,795
0,2	0,28	68,60	4,09	14,77	0,723

DESIGN-EXPERT Plot

Desirability
X = A: lif miktarı (çimento ağırlığına %)
Y = B: s/ç



Şekil 4. Lif miktarı, s/ç oranı ve arzu edilebilirlik ilişkisinin tepki yüzey modeli

Tablo 6’da lif miktarı %5’e kadar olan ve akışkanlaştırıcı miktarının da faktör olduğu durumda basınç ve eğilme dayanımı en yüksek olan, yayılma miktarı 13,5 cm’den az olmayacak şekilde en yüksek olan optimum karışım tasarımı yapılmıştır. Birbirine yakın arzu edilebilirlik derecesinde farklı karışımlar bulunmaktadır. Bu karışımların içerisinde üretilmesi en uygun harç karışımı lif miktarı çimento ağırlığının %1,2 oranında lif içeren, s/ç oranının 0,28 olan ve akışkanlaştırıcı katkı miktarı 6 g (çimento ağırlığının %0,27’si kadar) olan karışımdır.

Tablo 6. Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışımların özellikleri

Lif Miktarı (%)	s/ç oranı	SA (g)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Yayılma (cm)	Arzu edilebilirlik
1,2	0,28	6,00	67,93	4,64	13	0,84
1,0	0,28	6,00	69,29	4,42	13,59	0,83
1,8	0,31	6,00	69,27	4,04	13	0,75

Son olarak yukarıda verilen analizlerin yanı sıra s/ç oranı 0,42 olan karışımlar için otojen ve kuruma rötrelerinin farklı günlerindeki değerleri de alınarak yeni modeller oluşturulmuştur. Tablo 7’de s/ç oranı 0,42 olan karışımlar için basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yayılma miktarı maksimum; otojen rötre ve kuruma rötresi minimum olan optimum karışım tasarımı yapılmıştır. Optimizasyon analizlerine göre en uygun çözüm çimento ağırlığına %2,3 oranında lif kullanılmasıdır.

Tablo 7. s/ç oranı 0,42 olan harçlarda optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışımın özellikleri

Lif Miktarı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Yayıllma (cm)	Kuruma Rötresi (7 Gün)	Kuruma Rötresi (28 Gün)	Otojen Rötresiz (3 Gün)	Otojen Rötresiz (28 Gün)	Arzu edilebilirlik
2,3	47,53	4,29	13,85	1417,77	2006,95	-111,463	-543,99	0,62

5. SONUÇLAR

Kısa poliamid lif içeren harç örneklerinde yapılan deneysel incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- s/ç oranı 0,28, 0,35 ve 0,42 olan serilerde en yüksek kullanabilen kısa lif oranları sırasıyla %2, %4 ve %5 olarak bulunmuştur.
- Karışıma eklenen kısa lif miktarı arttıkça, s/ç oranından bağımsız olarak işlenebilirlik azalmıştır.
- Kısa lif miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımının işlenebilirlik problemleri sebebiyle azaldığı gözlenmiştir.
- s/ç oranına bağlı olarak kullanılan kısa lif miktarı arttıkça eğilme dayanımının arttığı görülmüştür.
- Kısa lif katkısının çimentolu malzemenin kuruma ve otojen rötresini azaltmada olumlu etkileri olduğu görülmüştür.
- İşlenebilir, dayanımı yüksek, rötresiz değerleri düşük çimentolu karışımlar için optimum kısa lif miktarlarının bulunabileceği gösterilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin temini için Kordsa A.Ş., Nuh Çimento A.Ş. ve Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye teşekkür ederler.

Kaynaklar

1. Van Mier, J.G.M., "Framework for a generalized four-stage fracture model of cement-based materials", *Engineering Fracture Mechanics*, No. 75(118), pp. 5072-5086, 2008.
2. Grzybowski, M., Shah, S.P., "Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, No. 87(2), pp. 138-148, 1990.
3. Akcay, B., Tasdemir, M.A., "Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, No. 28 (1), pp. 287-293, 2012.
4. Akcay, B., "Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete", *Composites Part B: Engineering*, No. 43(2), pp. 766-778, 2012.

5. Akcay B., “Karma Lifli Betonların Tek Eksenli Çekme Altında Çatlak Yapısının İncelenmesi”, *Teknik Dergi*, No. 31(1), pp. 9773-9787, 2020.
6. Peled, A., Sueki, S., Mobasher, B., “Bonding in Fabric–Cement Systems: Effects of Fabrication Methods”, *Cement and Concrete Research*, No. 36(9), pp. 1661-1671, 2006.
7. Sertkaya, S., Erdoğan, H., Özalp, F., Akçay, B., “Çelik ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen Makro Lif Takviyeli Betonların Kırılma Davranışı”, *Hazır Beton Dergisi*, No. 75, pp. 75-79, 2018.
8. Akcay, B., Ozsar, D.S., “Do Polymer Fibres Affect the Distribution of Steel Fibres in Hybrid Fibre Reinforced Concretes?”, *Construction and Building Materials*, No. 228, 2019.
9. Akcay, B., Tasdemir, M.A., “Optimisation of Using Lightweight Aggregates in Mitigating Autogenous Deformation of Concrete”, *Construction and Building Materials*, No. 23 (1), pp. 353-363, 2009.