

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİMENTO ESASLI MALZEMELERDE YÜKSEK MİKTARDA
SENTETİK KISA LİF KULLANIMI

BERKİN ATAHAH GÖKBAYRAK

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİMENTO ESASLI MALZEMELERDE YÜKSEK MİKTARDA
SENTETİK KISA LİF KULLANIMI

BERKİN ATAHAH GÖKBAYRAK

Prof. Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

Jüri Üyesi, Yozgat Bozok Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Hakan ERDOĞAN

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.01.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
 - Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
 - Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
 - Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,
- beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

(İmza)

Berkin Atahan GÖKBAYRAK

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

(İmza)

Berkin Atahan GÖKBAYRAK

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada çimento esaslı kompozitlere eklenen mikro liflerin malzemenin mekanik davranışına, işlenebilirliğe ve rötreye olan etkileri deneysel açıdan incelenmektedir.

Çalışmalarım sırasında değerli bilgileri ve tecrübesiyle her konuda yol gösteren ve bana her koşulda destek olan danışman hocam Prof. Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ'a bana kendisiyle birlikte çalışma fırsatı tanıdığı için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca her zaman ve her konuda yanımda olan, desteğini sürekli hissettiğim ve beni asla yalnız bırakmayan anneme, her türlü sorunumda yanımda olan değerli büyüğüm Hüseyin AYDIN'a, kıymetli arkadaşım Ali Deniz EROĞLU'na ve meslektaşlarım İnş. Müh. Onur BATMAN'a ve İnş. Müh. Fatih Burak SEMİZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca malzeme tedariki konusunda sağladıkları destekler için KORDSA, Nuh Çimento A.Ş. ve SİKA Yapı Kimyasalları'na teşekkür ederim.

Ocak-2023

Berkin Atahan GÖKBAYRAK

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
2.1. Çimento Esaslı Malzemelerde Lif Kullanımı.....	3
2.1.1. Lif Katkılı Çimento Esaslı Malzemelerin Kullanım Alanları.....	8
2.1.2. Lifin Mekanik Özelliklere Etkisi.....	10
2.2. İşlenebilirlik.....	14
2.3. Rötire.....	14
2.3.1. Rötire Çeşitleri.....	15
2.3.1.1. Otojen Rötire.....	15
2.3.1.2. Kuruma Rötresi.....	16
2.3.1.3. Plastik Rötire.....	16
2.3.1.4. Karbonatlaşma Rötresi.....	16
2.3.1.5. Termal Rötire.....	17
2.3.2. Lif Katkısının Rötreye Etkisi.....	17
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	18
3.1. Deneysel Çalışmanın Amacı.....	18
3.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	18
3.2.1. Çimento.....	18
3.2.2. Agregat.....	18
3.2.3. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı.....	19
3.2.4. Lif.....	19
3.3. Numune Özellikleri.....	20
3.4. Taze Harç Deneyleri.....	22
3.4.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	22
3.5. Sertleşmiş Harç Deneyleri.....	23
3.5.1. Üç Noktalı Eğilme Deneyi.....	23
3.5.2. Basınç Deneyi.....	24
3.6. Rötire Deneyleri.....	25
4. DENEY BULGULARI.....	27
4.1. Taze Harç Deneyleri.....	27
4.2. Harcın Mekanik Özellikleri.....	33
4.2.1. Üç Noktalı Eğilme Deneyi.....	33
4.2.2. Basınç Deneyi.....	35
4.3. Rötire Sonuçları.....	38
5. OPTİMUM KARIŞIM TASARIMI.....	41
5.1. Optimizasyon Çalışması 1.....	42
5.2. Optimizasyon Çalışması 2.....	44

5.3. Optimizasyon Çalışması 3.....	45
5.4. Optimizasyon Çalışması 4.....	46
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
KAYNAKLAR.....	50
EKLER.....	53
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	59



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Çekme gerilmesi altında betonun davranışı.....	1
Şekil 2.1.	Lif sınıflandırması.....	3
Şekil 2.2.	3D sonlu elemanlar analizi ile liflerin matris içerisindeki dağılımı	5
Şekil 2.3.	Lif katkısı ve boyunun betonun enerji yutma kapasitesine etkisi	5
Şekil 2.4.	Lif-matris çalışma prensibi	6
Şekil 2.5.	Farklı lif türlerinin donma-çözülme etkisinde davranışı.....	7
Şekil 2.6.	Lifin elastisite modülünün matris ile olan aderansa etkisi.....	7
Şekil 2.7.	Yüksek sıcaklıklarda eriyen polipropilen liflerin oluşturduğu boşluklardan buharın dışarı çıkma mekanizması.....	9
Şekil 2.8.	Farklı boyutlara sahip liflerin çatlak köprülenmesine olan etkisi	10
Şekil 2.9.	Lifli betonun tipik gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	11
Şekil 2.10.	Lif miktarının çekme dayanımı ve yük-deplasman Eğrisinin altında kalan alan (tokluk) ile ilişkisi.....	12
Şekil 2.11.	Polipropilen lif katkılı harçların birim ağırlıkları.....	13
Şekil 3.1.	Deneyisel çalışmada kullanılan mikro liflerin görüntüsü.....	20
Şekil 3.2.	Deneyisel çalışmada kullanılan kalıplar.....	20
Şekil 3.3.	Yayılma tablası deney aleti.....	22
Şekil 3.4.	Numunenin yayılma çapının ölçülmesi.....	23
Şekil 3.5.	Üç noktalı eğilme deney düzeneği şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.6.	Üç noktalı eğilme deneyi.....	24
Şekil 3.7.	Basınç deney düzeneği.....	25
Şekil 3.8.	Rötre ölçüm cihazı.....	26
Şekil 3.9.	Rötre numuneleri.....	26
Şekil 4.1.	Lif oranı ve işlenebilirlik (yayılma) ilişkisi.....	29
Şekil 4.2.	Akışkanlaştırıcı katkı ve lif miktarı ilişkisi.....	30
Şekil 4.3.	s/ç oranı 0,28 olan seriye ait yayılma, akışkanlaştırıcı ve lif hacmi ilişkisi.....	30
Şekil 4.4.	s/ç oranı 0,35 olan seriye ait yayılma, akışkanlaştırıcı ve lif hacmi ilişkisi.....	31
Şekil 4.5.	s/ç oranı 0,42 olan seriye ait yayılma, akışkanlaştırıcı ve lif hacmi ilişkisi.....	31
Şekil 4.6.	Çimento esaslı malzemelerde “bataklık” oluşumu	32
Şekil 4.7.	Bataklık oluşumu gözlenmiş bir harç numunesi (K35-4)	32
Şekil 4.8.	M serilerine ait ortalama eğilme dayanımları	33
Şekil 4.9.	K serilerine ait ortalama eğilme dayanımları	34
Şekil 4.10.	%2 lif içeriğine sahip harçların ortalama eğilme dayanımlarının karşılaştırılması.....	34
Şekil 4.11.	İşlenebilirlik ile eğilme dayanımı ilişkisi.....	35
Şekil 4.12.	M serilerine ait ortalama basınç dayanımları.....	36
Şekil 4.13.	K serilerine ait ortalama basınç dayanımları.....	36
Şekil 4.14.	%2 lif içeriğine sahip harçların ortalama basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	37

Şekil 4.15.	Farklı lif içeriğine sahip numunelerin görsel karşılaştırması a)%5 lif (K42-5), b)yalın harç (M42).....	37
Şekil 4.16.	İşlenebilirlik ile basınç dayanımı ilişkisi.....	38
Şekil 4.17.	s/ç oranı 0,42 olan seriye ait kuruma rötresi grafiği (0-28 gün)	40
Şekil 4.18.	s/ç oranı 0,42 olan seriye ait otojen rötre grafiği (0-28 gün)	40
Şekil 5.1.	Lif miktarı ve arzu edilebilirlik ilişkisinin tepki yüzey modeli.....	43
Şekil 5.2.	Lif miktarı ve arzu edilebilirlik ilişkisinin tepki yüzey modeli	45
Şekil 5.3.	Lif miktarı ile işlenebilirlik ilişkisi	46



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Lifler ve mekanik özellikleri.....	4
Tablo 2.2.	Lif katkılı betonların normal betonlara kıyasla özellikleri.....	13
Tablo 3.1.	Deneyde kullanılan çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	18
Tablo 3.2.	Agrega granülometrisi.....	19
Tablo 3.3.	Deneylerde kullanılan mikro liflerin karakteristik özellikleri.....	19
Tablo 3.4.	Harç karışım içerikleri.....	21
Tablo 4.1.	S/Ç oranı 0,28 olan serilere ait yayılma sonuçları.....	27
Tablo 4.2.	S/Ç oranı 0,35 olan serilere ait yayılma sonuçları.....	27
Tablo 4.3.	S/Ç oranı 0,42 olan serilere ait yayılma sonuçları.....	28
Tablo 4.4.	Lif miktarı ve yayılma ilişkisi.....	29
Tablo 4.5.	S/Ç oranı 0,42 olan harçların rötre sonuçları.....	39
Tablo 4.6.	Rötre sonuçlarının referans numune ile karşılaştırılması.....	39
Tablo 5.1.	Deneyisel çalışmadan elde edilen modellerin denklemleri ve R katsayıları.....	41
Tablo 5.2.	Optimizasyon çalışması için parametreler	42
Tablo 5.3.	Optimizasyon çalışması için parametreler.....	43
Tablo 5.4.	Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışımlar	44
Tablo 5.5.	Optimizasyon çalışması için parametreler.....	44
Tablo 5.6.	Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışım.....	44
Tablo 5.7.	Optimizasyon çalışması için parametreler.....	45
Tablo 5.8.	Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışım.....	46
Tablo 5.9.	Optimizasyon çalışması için parametreler.....	47
Tablo 5.10.	Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışımlar.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_c	: Etkin kesit alanı, (m ²)
d_1, d_2	: Numune boyutları, (mm)
F	: Uygulanan kuvvet, (N)
f_c	: Net basınç dayanımı, (MPa)
f_{cf}	: Net eğilme dayanımı, (MPa)
L	: Mesnetler arasındaki mesafe, (mm)
P	: Kırılma yükü, (N)

Kısaltmalar

S/Ç	: Su/Çimento Oranı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

ÇİMENTO ESASLI MALZEMELERDE YÜKSEK MİKTARDA SENTETİK KISA LİF KULLANIMI

ÖZET

Çimentolu malzemelerin çekme dayanımları, enerji yutma kapasiteleri ve toklukları düşüktür. Bu özellikleri geliştirmek amacı ile çeşitli malzemelerden üretilmiş değişik boyutlarda lifler kullanılmaktadır. Bu lifler arasında en çok kullanılanlar çelik, polimer ve cam liflerdir. Bu çalışmada poliamid 12 mm uzunluğunda mikro lifler ile takviye edilmiş çimento esaslı malzemelerin işlenebilirlik özellikleri, eğilme ve basınç dayanımları ve rötre davranışları araştırılmıştır. Su/çimento (s/ç) oranı 0.28, 0.35 ve 0.42 olan karışımlar 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 mikro 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. Deneysel çalışma olarak taze haldeki harçların yayılma çapları ölçülmüş, sertleşmiş halde de üç noktalı eğilme deneyi ve basınç deneyi yapılmıştır. Ayrıca s/ç oranı 0,42 olan harçlarda otojen rötre ve kuruma rötresi ölçümleri yapılmıştır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar s/ç oranı ve lif içeriğinin çimentolu malzemelerin araştırılan özellikleri üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermiştir. İşlenebilir bir karışım elde etmek için gerekli akışkanlaştırıcı miktarı lif içeriği arttıkça artmıştır. Artan lif miktarı ile basınç dayanımı önemli derecede etkilenmez iken eğilme dayanımında artış görülmüştür. Mikro lif kullanımının çimentolu malzemelerdeki rötrei azaltmak için de iyi bir yöntem olduğu görülmüştür. Kullanılan liflerin özellikle erken yaşta ortaya çıkan otojen rötrei önlemede etkili olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak dayanımı ve işlenebilirlik özellikleri yüksek, rötre değeri en az olacak karışımları belirleyebilmek için çok amaçlı optimizasyon analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mekanik Özellikler, Mikro Lif, Optimizasyon, Rötre, Taze Hal Özellikleri.

HIGH AMOUNT OF SYNTHETIC SHORT FIBERS USE IN CEMENT-BASED MATERIALS

ABSTRACT

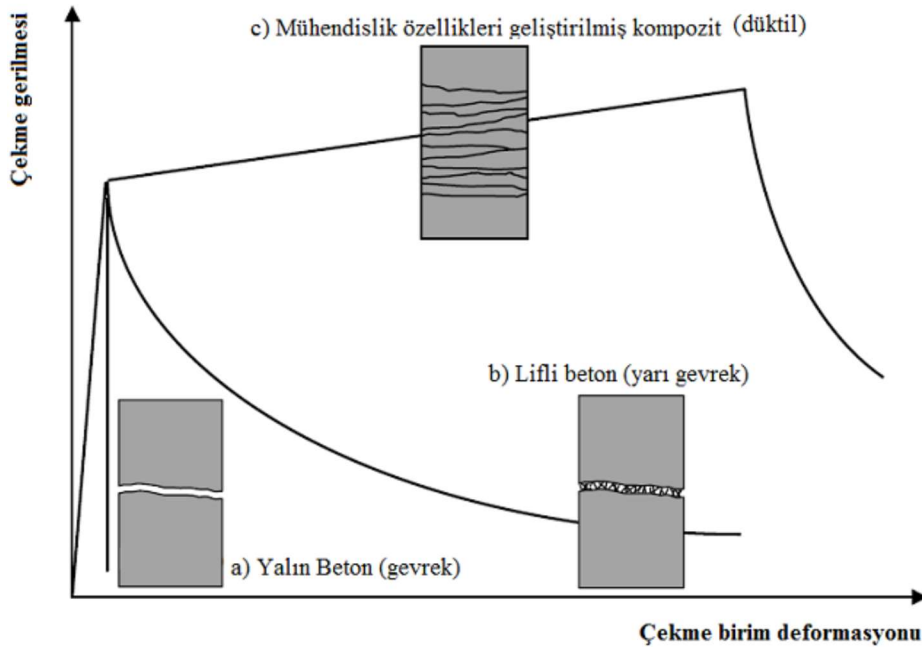
Cement-based materials have low tensile strength, energy absorption capacity and toughness. In order to improve these features, fibres with different sizes produced from various materials are used. Commonly used among these fibres are steel, polymer and glass fibres. In this study, workability properties, strength and shrinkage behaviours of cement-based materials reinforced with polypropylene micro-fibres of 12 mm length were investigated. Mixtures were produced 0.28, 0.35 and 0.42 water/cement (w/c) ratio. In 0,28 w/c series maximum usage of micro-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 containing 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. As an experimental study, the flow diameters of mortars were measured in the fresh state, bending and compressive strength tests were performed in the hardened state. In addition, autogenous shrinkage and drying shrinkage measurements were obtained in the mortars with a w/c ratio of 0.42.

Results from the experimental studies showed that the w/c ratio and fibre content had a significant effect on the investigated properties of cementitious materials. The amount of superplasticizer required to obtain a workable mixture increased as the fibre content increased. With increasing amount of fibre, the compressive strength was not significantly affected, while the flexural strength increased. It was seen that the usage of micro-fibre is also a good method to reduce shrinkage of cementitious materials. It has been observed that the used fibres are especially effective in preventing autogenous shrinkage that occurs at an early age. With using obtained results, a multi-objective optimization analysis was carried out to determine the mixtures with high strength and workability properties and the lowest shrinkage value.

Keywords: Mechanical Properties, Micro-Fibre, Optimization, Shrinkage, Fresh State Properties.

1. GİRİŞ

Beton üretim kolaylığı, rahat işlenebilmesi ve maliyet avantajı sayesinde günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Çok sayıda üstün özelliği olmasına rağmen bazı kusurları olduğu bilinmektedir. Bu kusurlardan öne çıkanlar düşük çekme dayanımı, sertleşmiş betonun gevrek bir yapıda olması ve rötire meydana gelmesidir. Betonun bu kusurlarını en az seviyeye indirmek için karışımının içerisine çeşitli malzemelerden imal edilmiş lifler eklenebilir. Lif katkısının beton özelliklerine olan etkisi, beton karışım dizaynına bağlı olduğu kadar liflerin üretildiği malzemeye, liflerin geometrisine ve karışıma eklenen lif miktarı gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu gözlemlenmiştir (Chawla, 1998, Türkmenoğlu ve Varol, 2016, Zollo, 1997). Lif katkısı betonda oluşan çatlakların büyümesinin engellenmesine ve betonun kırılma tokluğuna olumlu yönde etki etmektedir. Lifler çekme gerilmelerini betonun karşılayamadığı bölgelerde, gerilmeleri karşılayarak çatlakların oluşumunu ve ilerlemesi 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 (Özbay, 2016, Qian ve diğ., 2000). Lif katkılı çimento esaslı kompozitlerde lif türüne bağlı olarak da bu davranışın önüne geçilebilmektedir (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Çekme gerilmesi altında betonun davranışı (Gödek ve diğ., 2016)

Liflerin olumlu etkileri olduğu gibi tasarıma olumsuz etkileri de olabilmektedir. Lif ilavesinin olumsuz etkilerinin gözlenmemesi için amaca uygun bir şekilde karışım dizaynı yapılmalıdır (Gödek ve diğ., 2016, Özsar, 2017).

Beton içerisindeki suyun fiziksel ve kimyasal sebepler yüzünden beton matrisinden uzaklaşmasından dolayı betonda hacimce küçülme meydana gelir. Bu olaya rötre adı verilir. Rötre sebebiyle oluşan çatlaklar betonda kusur oluşumuna neden olur. Lifler, rötre çatlakları da dâhil olmak üzere yüzey gerilmelerini üzerine aldığı yapılan çalışmalar sonucu bilinmektedir (Topçu ve diğ., 2017, Özcan, 2018). Lifler, betonun çekme gerilmelerini karşılayamadığı yerlerde çatlak oluşumunu ve büyümesini engellemek için kullanılır.

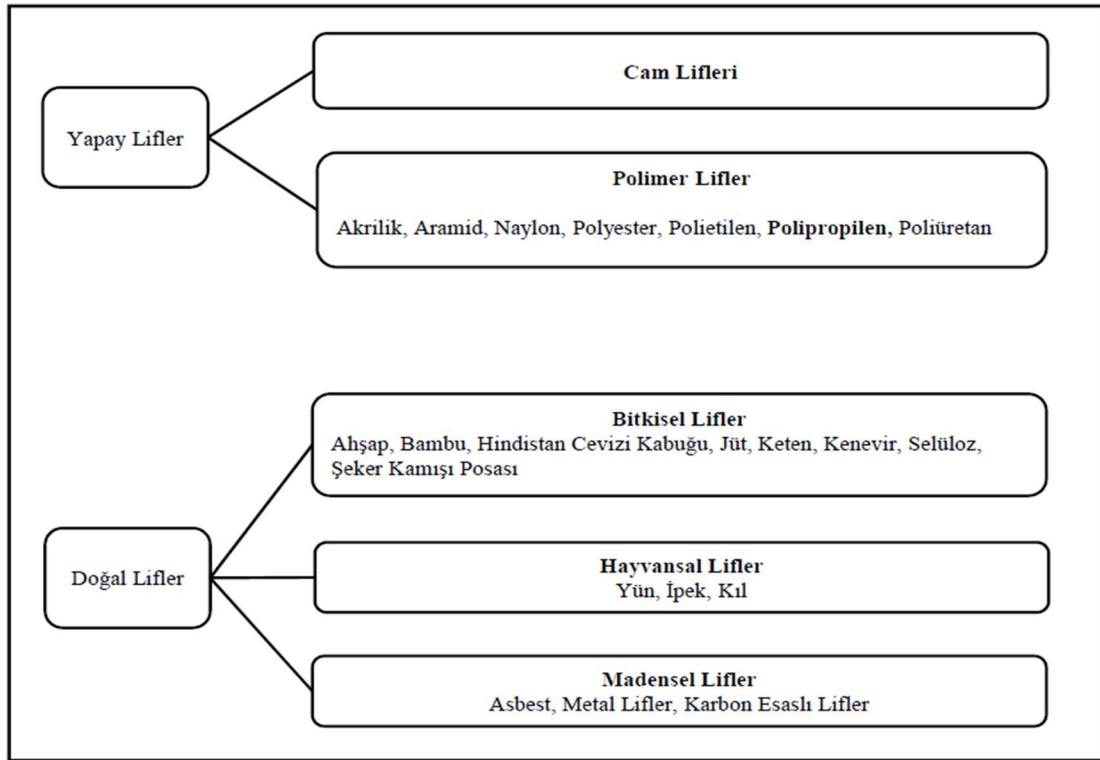
Bu çalışmada poliamid lif katkısının çimento esaslı malzemelerde mekanik özelliklere, rötreye ve işlenebilirliğe olan etkisi araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Çimento Esaslı Malzemelerde Lif Kullanımı

Lif katkılı çimento esaslı malzemeler; liflerin, çimento, su ve gerekli diğer malzemeler ile birlikte karıştırılmasıyla elde edilir. Çimento esaslı bir kompozit olan betonun çekme dayanımı, aşınma dayanımı ve çatlak sonrası dayanım özellikleri düşüktür. Beton içerisine değişik malzemelerden üretilmiş lifler eklenerek bu zayıf özellikler iyileştirilebilir. Lifler önceki çağlarda bitkisel kökenli iken günümüzde teknoloji ve üretim imkânlarının gelişmesi ile birlikte çelik, mineral, cam ve polimer esaslı olabilmektedir. Cam liflerin özellikle alkali çevre şartlarında dürabilite sorunları ortaya çıkarmasından dolayı günümüzde daha çok çelik ve polimer esaslı lifler tercih edilmektedir.

Lifler kendi içlerinde de sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma yapay lifler ve doğal lifler olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilmektedir. Bu ana başlıklar altında liflerin sınıflandırılması Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Lif sınıflandırılması (Chawla, 1998)

Her lif türü, her özelliği aynı şekilde iyileştiremez. Karışımda kullanılan lifler betonun belirli özelliklerine etki edip, değiştirebilirler. Betonda iyileştirilmesi istenen özelliğe göre bir veya birden fazla lif türü kullanılması gerekebilmektedir. Beton içerisinde birden fazla lif kullanılması durumunda karma lifli beton olarak adlandırılmaktadır. Çeşitli lif türlerinin bazı mekanik özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

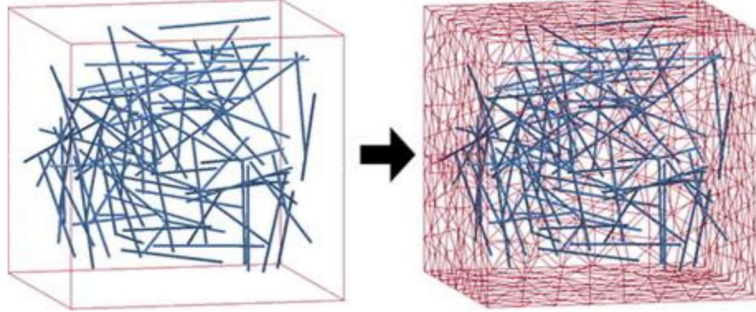
Tablo 2.1. Lifler ve Mekanik Özellikleri (Türkmenoğlu ve Varol, 2016)

Lif Çeşidi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Maksimum Uzama (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,1
Asbest	552-966	83-138	0,6	3,2
Pamuk	414-690	4,8	3-10	1,5
Cam	1035-3795	69	1,5-3,5	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8,3	11-13	1,4
Polietilen	690	0,14-0,4	10	0,95
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,9
Pamuk-Yün	414-621	6,9	10-25	1,5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,6	2,7
Çelik	276-2760	200	0,5-3,5	7,8

Tablo 2.1. incelendiğinde en çok dikkat çeken lif çeşidinin, çelik lifler olduğu görülmektedir. Çeliğin elastisite modülü, betondan çok daha büyük olduğu için çelik lifli betonun yük taşıma kapasitesi diğer lif türlerinin kullanıldığı betonlara kıyasla daha büyük olmaktadır. Ancak çelik liflerin en büyük dezavantajı ise korozyona karşı dayanıksız olmasıdır (Türkmenoğlu ve Varol, 2016).

Lif katkısının beton özelliklerine olan etkisi lifin üretildiği malzemeye, lifin geometrisine, lifin narinlik oranına (boy/çap) ve beton matrisi ile lif arasındaki aderansa bağlı olarak değişebilmektedir. Betona eklenen liflerin karışım içerisinde homojen olarak dağılması da malzemenin özelliklerini etkilemektedir. Karışım içerisinde homojen olarak dağılan lifler, betonda oluşabilecek çatlakları önleyebilmekte ve çatlakların ilerlemesini geciktirerek betonun daha dayanıklı bir hale gelmesini sağlamaktadır (Şekil 2.2.). Liflerin homojen bir şekilde dağılamaması veya liflerin topaklanması sonucu matris içerisinde boşluklu bir yapı oluşabilir ve malzemenin özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu yüzden lif katkılı bir çimento esaslı malzeme üretirken karıştırma aşamasına dikkat

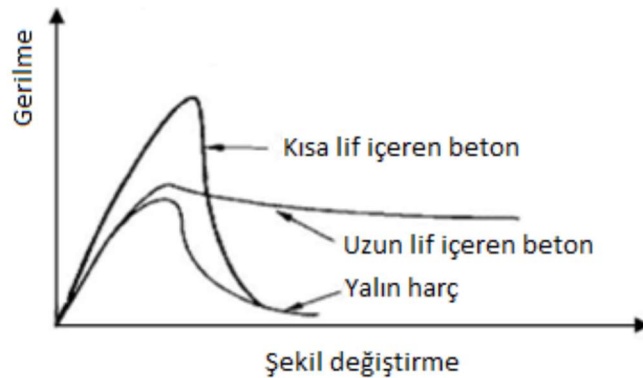
edilmelidir (Alkayış ve Başıyigit, 2021). Şekil 2.2.'de matris içerisinde dağılmış lifler gösterilmektedir.



Şekil 2.2. 3D Sonlu Elemanlar Analizi ile Liflerin Matris İçerisindeki Dağılımı (Fang ve Zhang, 2013)

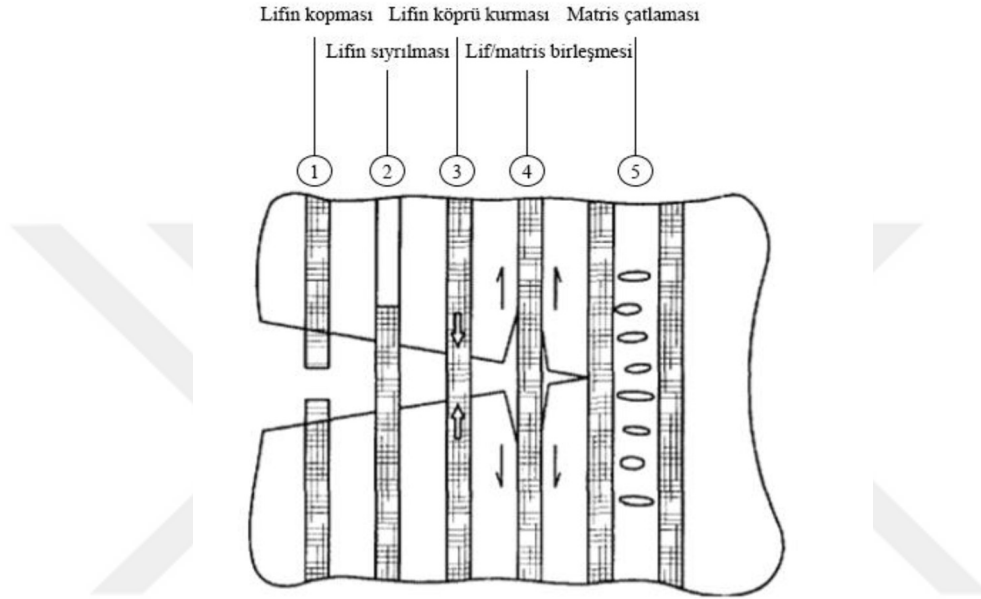
Lif kullanımının bir diğer avantajı ise yapının ağırlığını çelik donatı kadar arttırmaması ve donatı işçiliğinden de tasarruf sağlamasıdır. Lif ilave edilerek üretilen betonların birçoğunda korozyon oluşma riski olmadığı için pas payı kullanımına gerek yoktur. Bu sebeple de seçilen kesitler küçülmektedir. Korozyon oluşmadığı için de yapıların servis ömürleri daha uzun olmaktadır.

Tokluk terimi, betonun enerji yutma kapasitesini ifade etmektedir. Tokluk değeri, gerilme-şekil değiştirme grafiğinin altında kalan alanın hesaplanması ile bulunur. Farklı boylardaki lifler, çatlağın oluşum sürecine farklı etki etmektedir (Şekil 2.3). Uzun lifler çatlak büyüdüktan sonra malzemenin kırılma enerjisine olumlu katkı sağlayarak tokluğu arttıracak yönde etki ederler. Kısa lifler ise mikro çatlaklar ile etkileşime girerek çatlağın oluşmaya başlamasını engeller (Zollo, 1997, Taşdemir, 2010, Taşdemir, 2010).



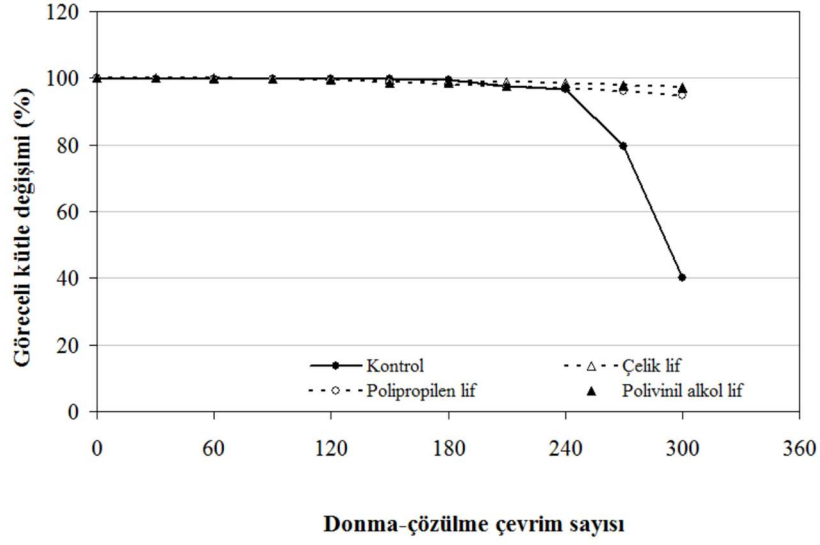
Şekil 2.3. Lif katkısı ve boyunun betonun enerji yutma kapasitesine etkisi (Qian ve diğ., 2000)

Şekil 2.4.'te çatlak oluşmaya başlamış çimento esaslı bir malzemede lif davranışı görülmektedir. Şekilde soldan sağa doğru olmak üzere lifin kopması, lifin sıyrılması, çatlak köprülemesi, lif ile matris yüzeyinin birleşmesi ve matrisin çatlama aşamaları gösterilmektedir. Lifler tek başlarına önemsiz bir miktarda yük aktarımı sağlasalar bile aynı çatlak etrafındaki çok sayıdaki lif bu miktarı önemli ölçüde arttırabilmişlerdir.



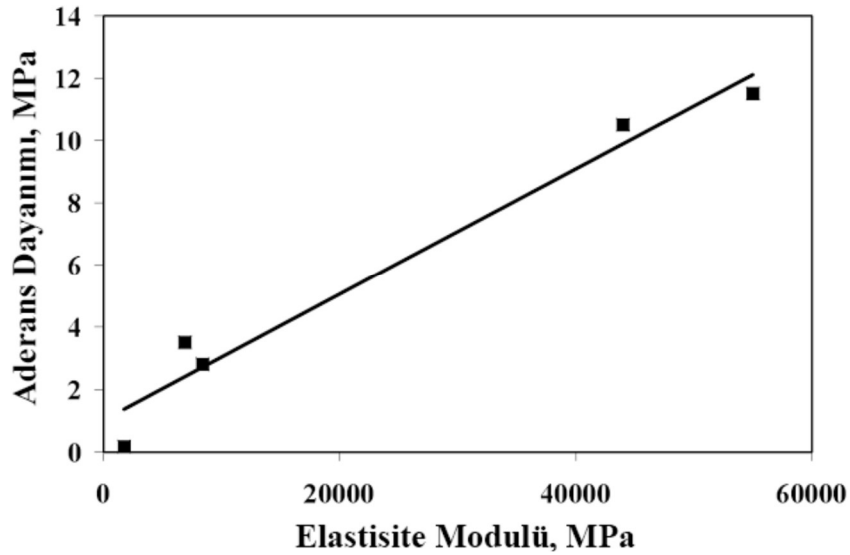
Şekil 2.4. Lif-matris çalışma prensibi (Özsar, 2017)

Çimento esaslı malzemelerin (özellikle betonlar ve harçlar) suya doygun olduğu durumlarda tekrarlı donma-çözülme etkisi altında önemli bir problemi ortaya çıkmaktadır. Bu etkinin sürekli devam ettiği çevresel şartlarda malzemede kısa sürede çatlaklar oluşmaya başlar ve dayanımda azalma görülmektedir. Lif katkısının matris içerisindeki boşluk oranını azalttığı gözlemlenmiştir. Boşluk oranının azalmasına bağlı olarak matris içerisinde serbest suyun durabileceği hacim de azalmaktadır. Buna bağlı olarak da lif katkısı donma-çözülme etkisine karşı malzemenin direncini arttırmaktadır (Şekil 2.5.). Kullanılan lif çeşidinin donma-çözülme etkisi sonucunda ortaya çıkan kütle kaybına bir etkisi görülmemiştir. Şekil 2.5.'te görüldüğü üzere donma-çözülme çevrimleri sonucunda her ne kadar çelik lif katkılı betonların eğilme dayanımı ve şekil değiştirme kapasiteleri polivinil alkol ve polipropilen lif içeren betonlara göre daha yüksek olsada, nihai eğilme dayanımları ve şekil değiştirme kapasitelerinde en büyük düşüş çelik lif katkılı betonlar gözlenmiştir (Özbay, 2016, Karahan ve Atış, 2011).



Şekil 2.5. Farklı lif türlerinin donma-çözülme etkisinde davranışı (Özbay, 2016)

Lif boyutunun yanında, lifin elastisite modülü de betonun mekanik davranışında önemli bir parametredir. Lif katkısının çimento esaslı malzemeler içerisinde etkin bir şekilde çalışabilmesi için, lifin elastisite modülünün çimento esaslı kompozitin elastisite modülünden daha büyük olması gerekmektedir. Lifin elastisite modülündeki artışın, lif ile matris arasında olan ilişkiye etkisi Şekil 2.6.'da gösterilmektedir (Peled ve Bentur, 2000).



Şekil 2.6. Lifin elastisite modülünün matris ile olan aderans dayanımına etkisi (Peled ve Bentur, 2000)

2.1.1 Lif Katkılı Çimento Esaslı Malzemelerin Kullanım Alanları

Lif katkılı betonlar yol döşemelerinde, havaalanı ve liman kaplamalarında, endüstriyel zemin kaplamaları, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, püskürtme beton (Shotcrete) uygulamalarında, beton altyapı elemanlarında, yüksek sıcaklık farklarına maruz kalan yapılarda, hidrolik yapıların inşasında ve depreme dayanıklı yapıların inşasında kullanılmaktadır. Farklı lif tiplerinin farklı özelliklere katkısından dolayı yapılarda farklı tür liflerin kullanılması kaçınılmazdır (Özsar, 2017, Yerlikaya, Kozak, 2013).

- Yol Döşemeleri

Beton yol kaplamalarında aşınma direnci ve çekme dayanımının yüksek olması istenmektedir. Bu sebeplerden dolayı dürabilitesi ve eğilme dayanımı yüksek beton kullanımı tercih edilir. Ayrıca lif kullanımı yol döşemesinin kalınlığının azaltılmasına olanak sağlar (Topçu ve diğ., 2017, Kozak, 2013).

- Havaalanı Kaplamaları

Havaalanı kaplamalarında lif kullanımı sonucunda derzler arasındaki mesafe arttırılabilmektedir. Lif katkısı tekrarlı yüklere ve zamanla oluşan yorulmalara karşı betonun dayanımını arttırmaktadır. Lif kullanımı sonucunda kaplama kalınlığı azaltılabilmekte ve buna bağılı olarak maliyetler düşmektedir (Kozak, 2013).

- Liman Kaplamaları

Liman kaplamaları diğerkaplama betonlarından farklı olarak ağır yük trafiğine dayanacak şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmelidir. Lif kullanımı betonun çarpma etkileri, dalga hareketleri, gel-git etkilerine karşı dayanımını arttırmaktadır (Kozak, 2013).

- Endüstriyel Zemin Kaplamaları

Endüstriyel zemin döşemeleri kullanım ömürleri boyunca ağır yüklere ve dinamik etkilere maruz kalmaktadırlar. Döşeme betonlarında lif takviyesi kullanıldığında, bu etkileri karşılayacak dayanıma sahip olmaktadır. Lifler hasır donatıyla birlikte kullanılabildiği gibi tek başına da kullanılabilmektedir. Hasır donatı yerine lif kullanımı maliyetleri ve işçiliği azaltmaktadır (Topçu ve diğ., 2017, Kozak, 2013).

- Kolon-Kiriş Birleşim Bölgelerinde

Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde yüksek kesme kuvvetleri oluşmaktadır. Liflerin bu etkileri üzerlerine alarak betonun çatlamasını engellediği gözlenmiştir (Şimşek, 2004).

- Püskürtme Beton Uygulamaları

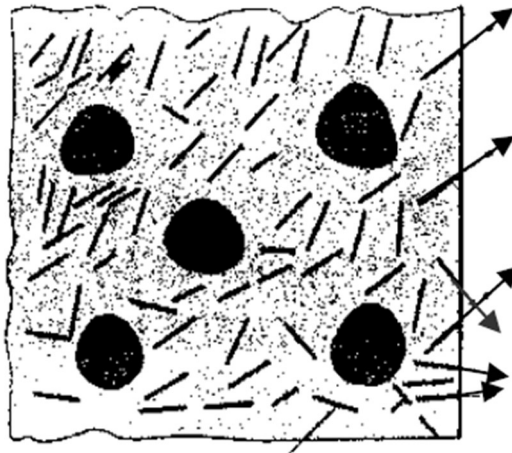
Püskürtme beton uygulamalarında kullanılan betonların çimento dozajı fazladır. Karışım içerisinde çimento yüzdesinin yüksek olmasından dolayı rötre çatlakları oluşmaktadır. Rötrenin yanı sıra püskürtme beton uygulaması yapılan yerler genellikle şevler ve eğik yüzeylerdir. Ve bu tür yüzeylerin kürlenmesi zor olmaktadır. Lif katkısı kür ihtiyacını azaltmaktadır (Topçu ve diğ., 2017, Kozak, 2013).

- Beton Altyapı Elemanları

Günümüzde beton elemanlarında hasır donatı yerine lif kullanımı oldukça yaygındır. Beton altyapı elemanlarında kimyasal maddelere karşı dayanıklılık ve sızdırmazlık özellikleri aranmaktadır. Karışım içerisinde lif kullanımı kimyasallara karşı direnci ve sızdırmazlık özelliklerini arttırmaktadır (Topçu ve diğ., 2017, Kozak, 2013).

- Yüksek Sıcaklık Farklarına Maruz Kalan Yapılar

Yüksek sıcaklıklarda matris içerisindeki serbest haldeki su ve çimento hamuruna kimyasal olarak bağlanmış şu buharlaşarak uzaklaşır. Sonuç olarak matris içerisinde boşlukların hacmi artar ve beton yüzeyinde dökülmeler meydana gelir. Bunun sonucu olarak donatı yüksek sıcaklık etkilerine açık hale gelir ve betonarme elemanların taşıma gücünde azalmalar meydana gelmektedir. Şekil 2.7.'de görüldüğü üzere yangın durumunda olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda da matris içerisindeki lifler eriyerek su buharının dışarıya çıkabileceği kanallar oluşturmaktadır. Böylece, yüzeylerdeki dökülmelerin önüne geçilebilmesi amaçlanmıştır (Taşdemir ve diğ., 2004).



Şekil 2.7. Yüksek sıcaklıklarda eriyen polipropilen liflerin oluşturduğu boşluklardan buharın dışarı çıkma mekanizması (Taşdemir ve diğ., 2004)

- Hidrolik Yapıları

Lif katkısı malzemenin kavitasyon ve aşınmaya karşı direncini arttırdığı için baraj ve kanal gibi hidrolik yapılarında lif kullanılmaktadır (Kozak, 2013).

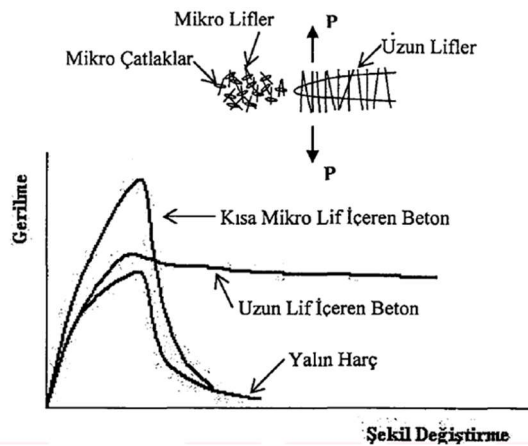
- Depreme Dayanıklı Yapılarda

Türkiye deprem kuşağında olan bir ülkedir. Betonun gevrek bir malzeme olduğu göz önüne alındığında bu zayıf özelliğin iyileştirilmesi gerekmektedir. Lif katkılı betonlarla inşa edilen betonarme yapıların deprem altındaki davranışı olumlu yönde etkilenecektir (Kozak, 2013).

2.1.2 Lifin Mekanik Özelliklere Etkisi

Çimentolu malzemeler şekil değiştirme yeteneği ve çekme dayanımı oldukça düşük olan gevrek yapıda malzemelerdir. Lif katkısının çekme dayanımına, sünekliğe ve tokluğa olumlu etkisi görülmektedir. Basınç dayanımı ise optimum bir lif oranına kadar artar, bu orandan sonra ise lif miktarı arttıkça basınç dayanımı azaltmaktadır.

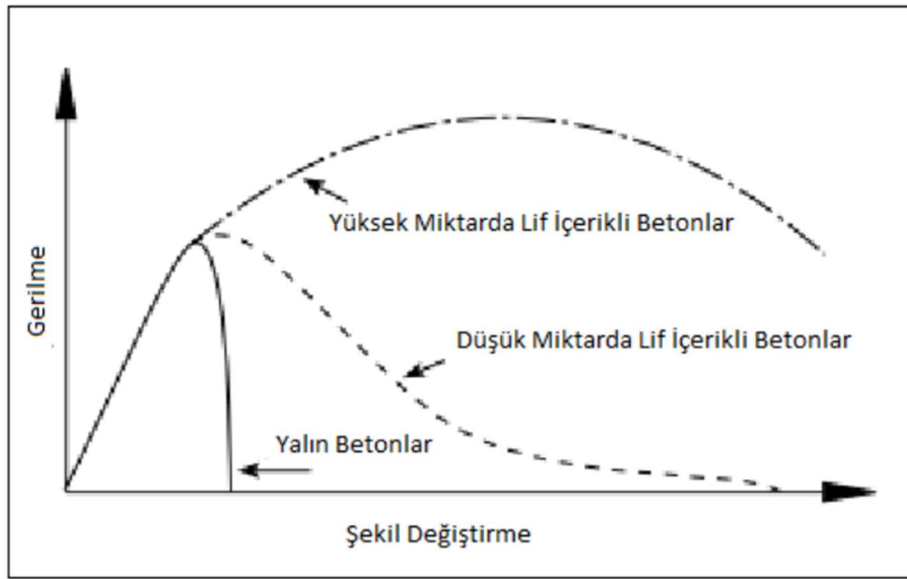
Şekil 2.8.'de görüldüğü üzere makro lifler çatlak köprüleme bölgesinde oluşan çatlakların oluşmasını engellerken, mikro lifler ise kesitin taşıyabileceği maksimum yük olan tepe yükü öncesinde oluşan mikro çatlakları önlemektedir. Mikro ve makro liflerin birlikte kullanılması ile karma lifli betonlar üretilmektedir. Karma lifli betonlar gelişmiş mekanik özellikler gösterirler (Akçay, 2020). Lifler, mikro çatlakların oluşmasını ve makro çatlakların oluşumuna neden olan mikro çatlakların birbirleriyle bağlantı oluşturma sürecini erteleyerek, kırılma sürecini önemli ölçüde etkiler (Türk ve Kına, 2017).



Şekil 2.8. Farklı boyutlara sahip liflerin çatlak köpülenmesine olan etkisi (Taşdemir ve diğ., 2004)

Lif ilavesinin, betonun tokluğunu arttırmasındaki diğer etken ise matris ve lif arasındaki aderanstır. Lif ile matris arasındaki aderans kuvvetli olduğu sürece lifin matristen sıyrılması zorlaşmaktadır. Matristen sıyrılmayan lif, yük taşıma kapasitesi aşılana kadar yük taşımaya devam etmektedir. Bunun sonucu olarak da çatlak ilerlemeye devam edemez (Özsar, 2017).

Matris içerisinde rastgele bir halde dağılmış lifler, çekme gerilmesi taşıyan, çatlak köprüleyen ve enerji yutabilen üç boyutlu bir ağ oluşturur. Betonun mekanik özellikleri, matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmış olan liflerin eklenmesiyle arttırılabildiği Şekil 2.9.'da görülmektedir. Matris içerisinde rastgele yönlenmiş lifler çatlak birleşmesini, çatlağın yayılmasını ve başlamasını kontrol ederek açılan çatlaklar boyunca yükü taşırlar (Türk ve Kına, 2017).

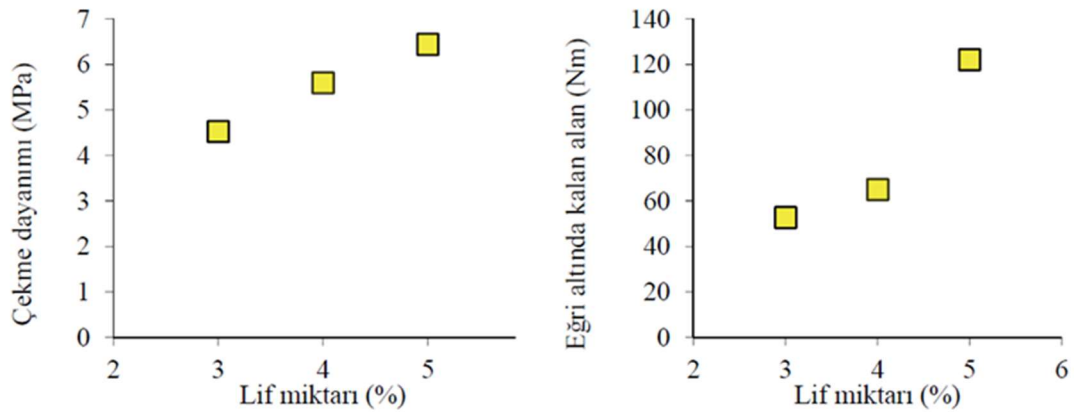


Şekil 2.9. Lifli betonun tipik gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Sarı, 2013)

Basınç dayanımının artmasına yükün uygulandığı düzleme dik doğrultuda yönelmiş lifler herhangi bir katkı sağlamazken, yükün uygulandığı düzleme paralel doğrultuda yönelmiş lifler basınç dayanımına katkı sağlamaktadır (Dsi, 1994). Liflerin çalışma prensibi, matrisin yükü taşıyamadığı yerde yükü liflerin taşımasıyla başlar. Daha sonra matris gerilmeleri lifler üzerinde aktarmaya devam eder. Bu yüzden matrisin dayanımı da önemli bir etkidir. Karışım içerisindeki lif oranının artmasıyla malzemenin tokluğunda da artış gözlemlenmiştir (Naaman, 2000). Darbe etkisi patlama, çarpma ve mermi gibi şekillerde

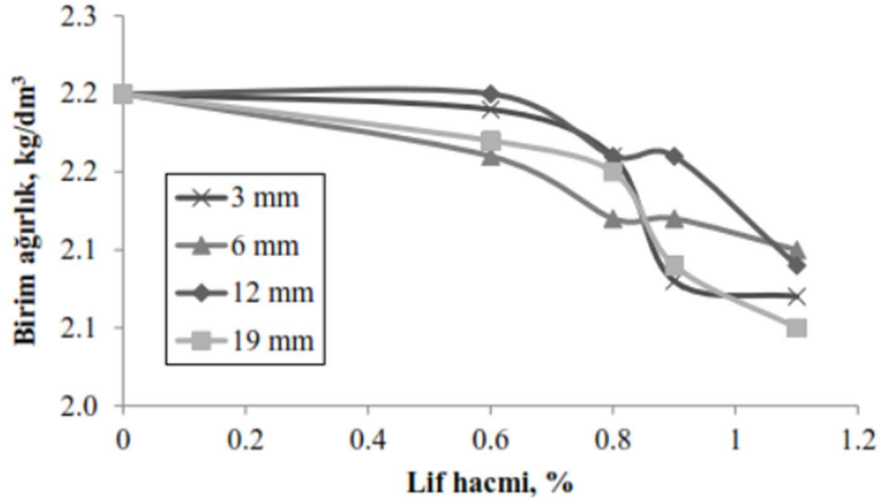
olabilmektedir. Darbe etkisi altındaki elemanlarda gerilmeler ani olarak yükselir, malzemenin dayanıksız olması durumunda çatlak oluşumu ve ilerlemesi sonucu malzeme dayanımını yitirir ve göçer. Darbe dayanımı, çimento esaslı bir elemanın ani ve tekrarlı yüklere karşı dayanımıdır. Enerji yutma kapasitesi ve tokluk, darbe dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Askeri yapılar, su yapıları, demiryolu traversleri ve havaalanı pistlerinde darbe dayanımı önemli bir parametredir. Yapılan çalışmalar sonucunda lif kullanımının betonun darbe dayanımını önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Kısa lifler, uzun liflere kıyasla darbe dayanımına daha fazla katkı sağlamıştır. Bunun nedeni ise kısa liflerin malzeme içerisinde daha homojen bir şekilde dağılmasıdır (Özalp ve diğ., 2022).

Gerilme-şekil değiştirme grafiğinin altında kalan alan tokluğu ifade etmektedir. Bir malzemenin tokluğunun yüksek olması malzemenin sünekliği ve dayanımı ile ilişkilidir (Alkayış ve Başyigit, 2021). Şekil 2.10.'da kullanılan lif miktarı ile tokluk arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Lif miktarının çekme dayanımı ve yük-deplasman eğrisinin altında kalan alan(tokluk) ile ilişkisi (Akçay, 2020)

Karışım içerisine eklenen farklı özelliklere sahip polipropilen liflerin, harçların birim hacim ağırlıklarının (kg/dm^3) azalmasına neden olduğu Şekil 2.11.'de görülmektedir. Kullanılan lif miktarının artmasıyla topaklanma artmış ve harç numuneleri kalıba daha boşluklu bir şekilde yerleşmiştir. Bunun sonucunda da lif katkısız numuneye göre birim hacim ağırlık (kg/dm^3) değerleri düşük kalmıştır (Topçu ve diğ., 2017, Zollo, 1997).



Şekil 2.11. Polipropilen lif katkılı harçların birim ağırlıkları (Topçu ve diğ., 2017)

Karışım içerisinde kullanılan lif miktarı arttıkça çimento esaslı kompozit malzemelerin bazı dayanım özelliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Polipropilen lifin kullanılması, betonun aşınma dayanımını ve su emme özelliklerini de olumlu etkilemiştir (Alkayış ve Başıyigit, 2021). Karışıma ilave edilen lif miktarı arttıkça su emme miktarının azaldığı görülmüştür (Açıkgenc ve diğ., 2012). Tablo 2.2’de lif ilavesinin betonun özelliklerine olan etkisi özet olarak verilmiştir (Köksal, 2004).

Tablo 2.2. Lif katkılı betonların normal betonlara kıyasla özellikleri (Köksal, 2004)

Özellik	Açıklama
Aşınma Dayanımı	Aşınmanın neden olduğu mikro-kırılma çatlaklarını kontrol eder.
Yorulma Dayanımı	Düşük lif içeriklerinde etkili yorulma dayanımı.
Donma-Çözülme Direnci	Donma-çözülme çevrimlerinin neden olduğu hasarı azaltılabilir.
Darbe Dayanımı	2-20 kat iyileşme.
Rötre Karşı Direnç	Düşük lif içeriklerinde bile daha iyi gerilme dağılımı ile çatlak genişliklerinde azalma.
Kayma Direnci	Düşük lif içeriklerinde bile etkili kayma direnci.
Pullanma-Dökülme Direnci	Matris içerisinde dağılan lif katkısı ile köşelerin ve kenarların korunması.
Sıcaklık Değişimlerine Direnç	Düşük lif içeriklerinde bile sıcaklık değişimlerine karşı etkili direnç.
Basınç Dayanımı	Lif tipine göre bağlı küçük değişiklikler gösterir.
Tokluk	Düşük lif içeriklerinde bile belirgin derecede iyileşme.

2.2 İşlenebilirlik

Çimento esaslı malzemelerin kolayca üretilebilmesi, segregasyona uğramadan taşınabilmesi, yerleştirilebilmesi, şekil verilebilmesi ve sıkıştırılabilmesi malzemenin işlenebilirlik özelliklerine bağlıdır.

Yeterli işlenebilirliğe sahip olmayan çimentolu malzemeler sertleştiğinde yeterli dayanımı ve dayanıklılığı gösteremez.

İşlenebilirliği etkileyen faktörler;

- Karışımın s/ç oranı,
- Karışımında kullanılan agreganın boyutları
- Kullanılan çimento tipi
- Ortam sıcaklığı
- Çeşitli katkı maddelerinin kullanımı olarak sıralanabilir.

Çimento esaslı malzemelere eklenen liflerin karışımın işlenebilirlik değerini azalttığı daha önce yapılan çalışmalardan bilinmektedir. Lif miktarının artmasıyla birlikte topaklaşmanın görülmeye başlanır. Topaklaşma ile birlikte karışım bileşenlerinin hareket kabiliyetleri azalarak karışımın işlenmesi zorlaşmaktadır. Karışım içerisinde kullanılan lif boylarının uzamasıyla ve kullanılan lif miktarının artmasıyla birlikte topaklanma artacağından dayanım ve birim hacim değerleri azalmıştır (Açıkgenç ve diğ., 2012). İşlenebilirlikteki azalma harcın kalıba yerleştirilmesini de etkilemekte ve lifsiz harca göre daha boşluklu kalmasına neden olduğu görülmüştür (Akçay, 2020).

2.3 Rötire

Çimento esaslı malzemelerin içerisindeki suyun fiziksel veya kimyasal yollara azalması sonucu malzemenin boyunda ve hacminin küçülmesine rötire denir. Matris içerisinde su buharlaşabilen ve buharlaşamayan su olarak iki ayrı şekilde bulunur. Buharlaşabilen su çimento hamurunun jel boşlukları ve kapiler boşluklarda bulunan sudur. Buharlaşamayan su ise hidratasyon ürünleri tarafından kimyasal ve fiziksel olarak bağlanmış sudur. Rötrenin ortaya çıkma nedenleri, matris içerisindeki su kaybı sebebiyle oluşan boşlukların içerisinde bulunan suyun buharlaşması veya hidratasyon sonucu oluşan ürünlerin matris içerisinde var olan suyu tutması olarak bilinir. Rötire olayının

görülmesinin en önemli nedeni buharlaşma yöntemiyle ortamdan uzaklaşan sudur. Buharlaşma hızını etkileyen faktörler;

- Hava sıcaklığı (arttıkça buharlaşma artar),
- Havadaki nem miktarı (azaldıkça buharlaşma hızlanır),
- Malzemenin sıcaklığı (havadan sıcaksa su kaybı hızlanır),
- Rüzgâr (hızı arttıkça buharlaşma artar).

Rötre oluşumunu etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bunlar;

- Çimento dozajı
- Kullanılan çimentonun türü,
- Çevre ve atmosfer koşulları,
- Yapının biçimi ve büyüklüğü,
- Su/çimento (s/ç) oranıdır.

Rötre oluşumunu azaltmak için çimento dozajını gereksiz şekilde arttırmamaya, kullanılan çimento türünün az rötre yapan bir çimento türü seçilmesine, karışıma gereksiz su eklenmemesine ve döküm işleminden sonra kür uygulamasına dikkat edilmelidir (Yatağan, 2010).

2.3.1 Rötre Çeşitleri

2.3.1.1 Otojen Rötre

Otojen rötre hidrasyon olayı sonucunda kapiler boşluklardaki suyun kaybolması ile ortaya çıkmaktadır. Çimentonun karakteristiği (fiziksel ve kimyasal özellikleri) otojen rötre oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Çimentonun öğütülme inceliğinin matrisin kılcal boşluk yapısı üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bentz ve Jensen (2004) yaptıkları çalışmada, çimento taneleri boyut dağılımının, eşit su/çimento oranlı çimento hamurlarının otojen rötreleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada ince tanecik boyutuna sahip numunelerde otojen rötre miktarının daha yüksek olduğunu gözlemlerken iri tanecik boyutlu çimento ile üretilen numunelerde ise erken yaşlarda rötrenin aksine bir miktar genleşme olduğunu belirlemişlerdir. İnce öğütülmüş çimento kullanımı daha yoğun bir içyapı oluşumuna neden olmakta ve oluşan kılcal boşlukların

Çapları daha kk olmaktadır. İnce kılcal boşluklar da otojen rötre miktarının artmasına neden olmaktadır (Tazawa ve Miyazawa, 1995).

2.3.1.2 Kuruma Rötresi

Betonun kuruması sırasında suyun fiziksel ve kimyasal olarak ortamdaki uzaklaşması sonucunda hacimde azalma gözlenmektedir. Bu hacimsel azalma olayı kuruma rötresi olarak adlandırılmaktadır. Kuruma rötresi sonucunda kuruma çatlakları meydana gelmektedir.

2.3.1.3 Plastik Rötre

Plastik rötre, malzemenin yerleştirilmesini takiben sonraki birkaç saat içerisinde meydana gelmektedir. Çimento esaslı malzeme sertleşmeden oluşur ve malzemenin yüzeyinde çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu rötre çeşidine plastik rötre denmesinin nedeni ise büzölmenin karışım plastik yani prizini almadan önce, karışıma hala şekil verilebilir halde iken gerçekleşmesidir.

Plastik rötre oluşumunun en büyük nedeni malzemenin yüzeyindeki suyun çok hızlı bir şekilde buharlaşmasıdır. Malzeme yüzeyindeki buharlaşma hızı, terleme hızından yüksek olması durumunda malzemenin yüzeyi kurur ve büzölme başlar. Alt tarafta bulunan daha plastik haldeki malzeme, yüzeydeki malzeme ile aynı ölçüde büzölme gösteremez, yüzeyde çekme gerilmeleri meydana gelir ve çatlaklar oluşumu gözlenmektedir.

2.3.1.4 Karbonatlaşma Rötresi

Karbonatlaşma, karbondioksitin (CO_2) çimento esaslı malzemeye nüfuz ettikten sonra ortamda yeteri kadar nem varsa oluşmaya başlar. Karbonatlaşma malzemenin dış kısmından başlayıp, iç kısımlara doğru ilerledikçe hızı azalmaktadır. Karbonatlaşma reaksiyonu çimento tipi, boşluk oranı, s/ oranı, sıcaklık, bağıl nem ve atmosferdeki CO_2 oranına bağlıdır. Yüksek bağıl nem durumunda, gözeneklerin su ile dolu olması nedeni ile CO_2 'in hamur içine girmesi zorlaşır ve bu nedenle karbonatlaşma olayı görülmez (Akman, 1997, Bekem ve diğ., 2009).

2.3.1.5 Termal Rötre

Hidratasyon sonucunda açığa çıkan ısı küçük kütlelerde hızlı bir şekilde kaybolurken, büyük kütlelerde kaybolması daha fazla zaman alır. Prizi biten ve yavaş yavaş sertleşmeye başlayan betonda, hidratasyon ısısının tüm beton kütlesini ısıtmaya yetecek olarak artmaması sonucu kütle soğuyarak termal rötre oluşmaktadır. Kısa süreli sıcaklık değişimlerinin bile termal rötreye sebep olduğu görülmektedir (Akçay, 2007).

2.3.2 Lif Katkısının Rötreye Olan Etkisi

Polimer liflerin rötreye olan en önemli etkisi oluşacak plastik rötre çatlaklarını kısıtlamasıdır. Polimer lifler imento esaslı malzemelerin enerji yutma kapasitelerini arttırabilmektedir, fakat bu artış elik liflerin sağladığı artışa kıyasla düşük kalmaktadır (Topçu ve diğ., 2017,  zcan, 2018). Polipropilen mikro lif kullanımının amacı ise karışımın taze hal ve plastik safhada ortaya çıkan rötre sorunlarını önlemek için kullanılır. Polipropilen liflerin fonksiyonu betonun yumuşak, plastik safhasıyla sınırlı iken, elik liflerin mukavemet arttırıcı etkisi beton prizini alıp sertle tikten sonra da belirgin şekilde devam eder ( zalp ve diğ., 2022). Polipropilen liflerin taze halde oluşan rötre çatlaklarına karşı etkili olduğu dolayısıyla taze betonun bakım masraflarını azalttığı görülmüştür. Lif katkılı numunelerin kuruma rötresinin lifsiz numunelere göre daha düşük olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir (Acun, 2000, Sertkaya ve diğ., 2018).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada mikro lif kullanımının çimento esaslı malzemelerde kullanım imkânlarına, malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisine, taze haldeki işlenebilirliğe ve rötreye olan etkisi belirlenmeye çalışıldı. Mikro liflerin farklı oranlarda kullanılması sonucu liflerin ölçülmek istenen parametrelere olan etkisi incelendi. Deneysel çalışmanın diğer değişkeni ise s/ç oranıdır.

3.2 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

3.2.1 Çimento

Bu deneysel çalışmalarda CEM I 42,5R Portland çimentosu kullanıldı. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir (Üretici tarafından beyan edilen).

Tablo3.1. Deneyde kullanılan çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Fiziksel Özellikler									
Özgöl Ağırlık	3,16 g/cm³								
Blaine Özgöl Yüzey	3490 cm²/g								
Priz Başlangıç	160 dakika								
Priz Sonu	200 dakika								
Hacim Sabitliği (Le Chatelier)	1,05 mm								
2 Günlük Basınç Dayanımı	48,2 MPa								
28 Günlük Basınç Dayanımı	59,5 Mpa								
Kimyasal Bileşim (%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Çözünmeyen Kalıntı	Kızdırma Kaybı	Serbest Kireç	Toplam Alkali
22,01	4,28	3,30	65,72	1,4	2,63	0,66	2,6	1,24	0,58

3.2.2 Agregata

Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan agregata kuvarz kökenli doğal kumdur. Kumun özgül ağırlığı 2400 kg/m³, su emme değeri ise %2,1’dir. Malzemeye ait elek analizi Tablo 3.2.’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Agrega granülometrisi

Doğal Kum				
Elek	Toplam Elek Üstünde Kalan (g)	Elek Üstünde Kalan (g)	Toplam Elek Üstünde Kalan (%)	Toplam Elekten Geçen (%)
16	-	-	-	100
8	3	3	0,3	99,7
4	123	120	12,4	87,6
2	346	223	22,3	65,3
1	555	209	20,9	44,5
0,5	745	190	19	25,5
0,25	919	174	17,4	8,1
Tepsi	1000	81	8,1	0

3.2.3 Akışkanlaştırıcı Katkı

Akışkanlaştırıcı katkı olarak Sika firması tarafından üretilen üçüncü nesil yüksek performanslı, modifiye polikarboksilat esaslı ViscoCrete-SF 18 süper akışkanlaştırıcı katkı kullanıldı. Katkıya ait üretici firmanın bildirdiği teknik bilgiler; yoğunluğu 1,10 kg/l, pH değeri 3 ile 7 arasında, donma noktası -10C°’dir, suda çözülebilir klorür yüzdesi ise maksimum %1’dir.

3.2.4 Lif

Çalışmada poliamid esaslı 12 mm boyunda mikro lifler kullanılmıştır. KORDSA İzmit tesislerinde üretilen liflerin görüntüsü Şekil 3.1.’deki gibidir. Mikro liflerin üretici tarafından bildirilen özellikleri Tablo 3.3.’te verilmiştir.

Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan mikro liflerin karakteristik özellikleri

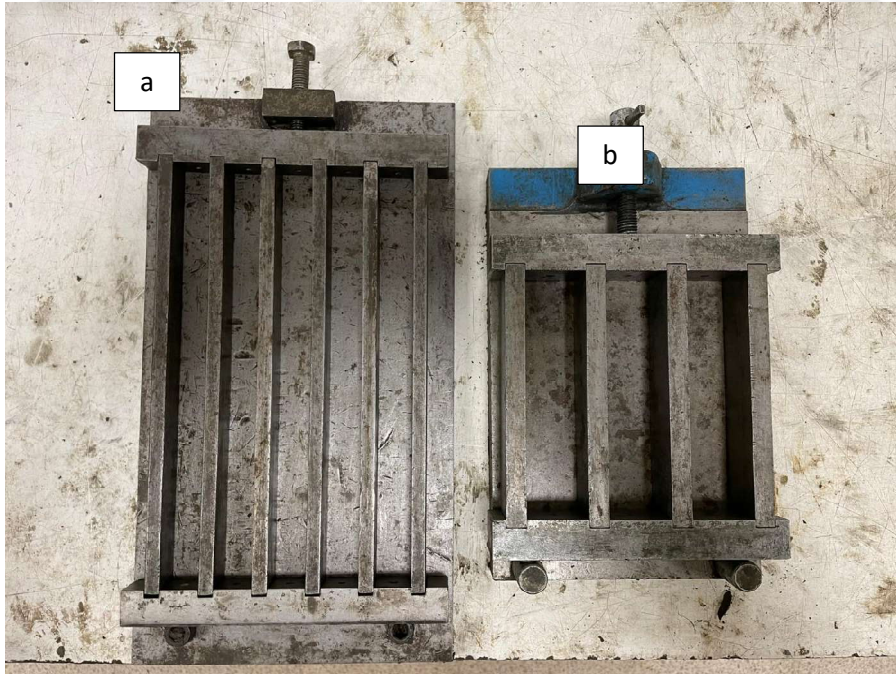
Fiber Sınıfı	EN 14889-2 Sınıf I
Ham Madde	Poliamid 6.6
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1,14
Uzunluk (mm)	12
Çekme Gerilmesi (MPa)	900
Erime Sıcaklığı (°C)	260
Fiber Adedi/kg	111 Milyon (12mm)



Şekil 3.1. Poliamid mikro liflerin görüntüsü

3.3 Numune Özellikleri

Deneysel çalışma için 48 farklı harç üretilmiştir. Bu dökümler sonucunda $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarında olan prizmatik numuneler basınç ve eğilme dayanımlarını ölçmek üzere, $25 \times 25 \times 285$ mm boyutlarında olan prizmatik numuneler ise rötire ölçümlerini gerçekleştirmek üzere kullanıldı.



Şekil 3.2. a) $25 \times 25 \times 285$ mm rötire numunesi kalıbı, b) $40 \times 40 \times 160$ mm prizmatik kalıp

Karışımlar hazırlanırken karışım içerisindeki lif miktarı ve istenen kıvama bağlı olarak kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarı değiştirildi. Üretilen harçların kalıplara boşluksuz bir şekilde yerleşmesi için şişleme yapıldı ve kalıpların dış yüzeylerinden tokmakla vurularak harçlar homojen bir şekilde kalıplara yerleştirildi. Deney için üretilen numunelerde s/ç oranı, lif oranı, akışkanlaştırıcı katkı ve kıvam değişkendir. Deney sonucunda lif oranı ve s/ç oranının basınç ve eğilme dayanımı, işlenebilirlik ve rötre üzerindeki etkileri gözlenmeye çalışıldı.

Tablo 3.4. Harç karışım içerikleri

Karışım Kodu	M28	K28	M35	K35	M42	K42
Mikro Lif İçeriği	Değişken	Değişken	Değişken	Değişken	Değişken	Değişken
Su/Çimento	0,28	0,28	0,35	0,35	0,42	0,42
Su (gr)	754	754	794	794	963	963
Çimento (gr)	2693	2693	2269	2269	2291	2291
Kum (gr)	1098	1098	1005	1005	1139	1139
Akışkanlaştırıcı Katkı (% çimento ağırlığı)	0,22	Değişken	0,07	Değişken	0	Değişken

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 kullanıldı. M ile başlayan karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı miktarı sabit tutulup lif miktarının işlenebilirliğe etkisi gözlendi. 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. Çalışmada üretilen tüm numune serilerinin içerikleri EK A'da verilmiştir.

Karıştırma işlemi için standart RILEM karıştırıcı kullanıldı. Öncelikle kuru malzemeler (çimento ve kum) karıştırıldı. Su karışımın homojen bir kıvama sahip olması için kontrollü bir şekilde karışıma eklendi. Lifler karışım homojen bir kıvam aldıktan sonra eklendi. Akışkanlaştırıcı katkı ise lifler karışım içerisinde dağıldıktan sonra kontrollü bir şekilde eklendi.

Her numune kalıba yerleştirildikten 24 saat sonra kalıptan alındı. Rötre numuneleri dışında kalan (eğilme ve basınç dayanımı deneylerinde kullanılacak numuneler) tüm numuneler 20  C sıcaklığında kirece doygun havuzlarda standart k r prosedürüne tabi tutuldu. Numuneler 28. günde k r havuzundan çıkarılıp, 1 gün oda sıcaklığında kurumaya bırakıldıktan sonra 29. günde deneylere tabi tutuldu.

3.4 Taze Harç Deneyleri

3.4.1 Yayılma Tablası Deneyi

Hazırlanan harç karışımlarının kıvamlarının belirlenmesi için yayılma tablası deneyi uygulandı. Karıştırma kabından alınan harç, üst çapı 6,5 cm, alt çapı 7,5cm ve yüksekliği 4cm olan tabla üzerindeki kalıba iki kademedede olacak şekilde her seferinde 25 kez vurularak yerleştirildi (şekil 3.3.). Kalıbın  st yüzeyi spatula ile düzeltildikten sonra kalıp çekilerek alındı. Deney aletinin kolu TS EN-1015/3'e göre saniyede 1 kez olacak şekilde 15 kez çevrilerek, yayılan numunenin çapı en az 2 farklı ekseninde kumpas yardımı ile ölçüldü ve okunan değerlerin ortalaması kaydedildi (şekil 3.4.).



şekil 3.3. Yayılma tablası deney aleti



Şekil 3.4. Numunenin yayılma çapının ölçülmesi

3.5 Sertleşmiş Harç Deneyleri

Sertleşmiş harç deneyi olarak üç noktalı eğilme deneyi, basınç deneyi ve rötre ölçümleri yapıldı.

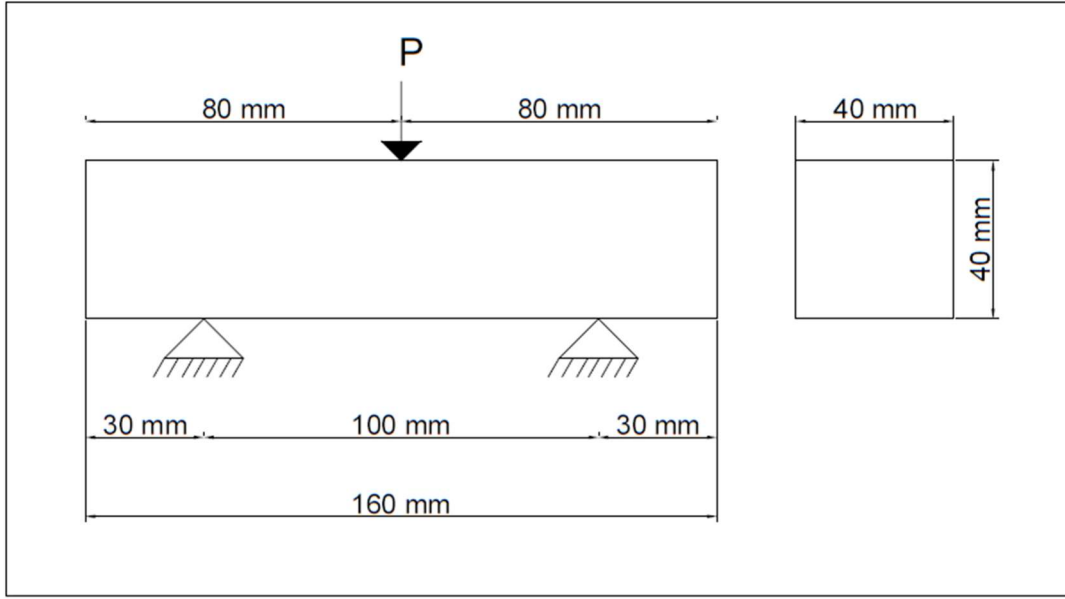
3.5.1 Üç Noktalı Eğilme Deneyi

Deneyler TS EN-12390/5 standardına göre yapıldı. Net eğilme dayanımı hesaplanırken Denklem 3.1 kullanıldı.

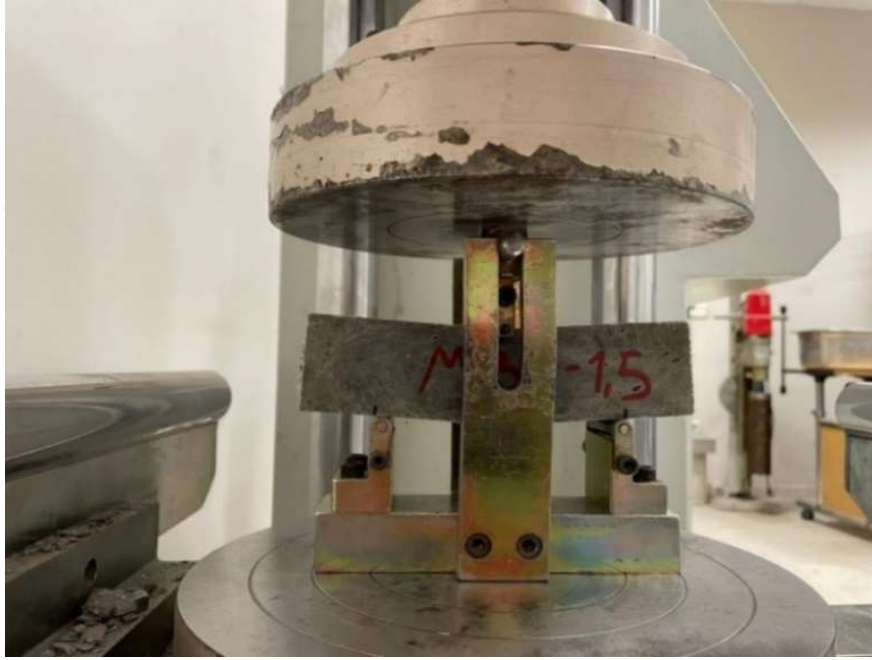
$$f_{cf} = (F \times L) / (d_1 \times d_2^2) \quad (3.1)$$

(f_{cf} =Net Eğilme Dayanımı, F =Kuvvet, L =Mesnetler arasındaki mesafe, d_1, d_2 =Numune enkesit ölçüleri)

Üç noktalı eğilme deneyi düzeneği Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.'da görülebilir. Yükleme 100 kN kapasiteli deney aleti yardımıyla yapıldı.



Şekil 3.5. Üç noktalı eğilme deney düzeneği şematik gösterimi



Şekil 3.6. Üç noktalı eğilme deneyi

3.5.2 Basınç Deneyi

Basınç deneyi üç noktalı eğilme deneyinden sonra kırılma düzleminde ikiye bölünmüş numuneler üzerinde yapıldı. 40×40×40 mm boyutlarındaki çelik küpler numunenin her iki yüzüne aynı hizada yerleştirildikten sonra deney yapıldı. Basınç dayanımı hesaplanırken

Denklem 3.2 kullanıldı. Basınç deneyi 100 kN kapasiteli standart hidrolik basınç deneyi ile yapıldı.

$$f_c = F / A_c \quad (3.2)$$

(f_c = Net Basınç Dayanımı, F = Kuvvet, A_c =Etkin Kesit Alanı)



Şekil 3.7. Basınç deney düzeneği

3.6 Rötire Deneyleri

Rötire ölçümleri için 25×25×285 mm boyutlarındaki numunelerden M42 deney grubu numunelerinin her biri için 4 adet olacak şekilde toplam 44 adet rötire numunesi üretildi. Üretilen her seriden iki adet numune üzerinde oda sıcaklığında kuruma rötresi ölçümleri gerçekleştirildi. Diğer iki numune ise önce streç film sonra alüminyum folyo ile sarılarak dış ortamdan izole edildi. İzole edilen numuneler otojen rötire ölçümleri için kullanıldı. Kuruma rötresi ve otojen rötire ölçümleri için kullanılacak numunelerin üzerine ölçüm pimleri 200mm ara ile yerleştirildi ve ölçümler 0,001 m/m hassasiyetle 24 saatlik periyotlarla yapıldı (Şekil 3.8. ve Şekil 3.9.).



Şekil 3.8. Rötre ölçüm cihazı



Şekil 3.9. Rötre numuneleri

4. DENEY BULGULARI

4.1 Taze Harç Deneyleri

Taze harç ile yayılma tablası deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.1., Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.'te verildiği gibidir. Tablolarda görüldüğü üzere mikro lif kullanımı harcın işlenebilirliğini beklenildiği gibi azaltmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak işlenebilirlik belirli bir düzeye kadar arttırabilmektedir. Mikro lifler, akıcı kıvamlı harçlarda çökme miktarını azaltmışlardır. Lif miktarı arttıkça yalın harç numunelerine benzer işlenebilirlik değerleri elde edebilmek için kullanılması gereken akışkanlaştırıcı katkı miktarı artmaktadır. Bu artış s/ç oranı 0,28 olan seride %300'e kadar çıkmaktadır.

Tablo 4.1. s/ç oranı 0,28 olan serilere ait yayılma deney sonuçları

Numune Kodu	Mikro Lif (g)	Akışkanlaştırıcı (% çimento ağırlığı)	Yayılma (cm)
M28	0,0	0,22	15,38
M28-0,5	13,5	0,22	14,67
M28-1	26,9	0,22	12,90
M28-1,5	40,4	0,22	11,68
M28-2	53,9	0,22	11,20
K28-0,5	13,5	0,37	17,63
K28-1	26,9	0,49	16,73
K28-1,5	40,4	0,60	15,20
K28-2	53,9	0,71	13,90

Tablo 4.2. s/ç oranı 0,35 olan serilere ait yayılma deney sonuçları

Numune Kodu	Mikro (Lif g)	Akışkanlaştırıcı (% çimento ağırlığı)	Yayılma (cm)
M35	0	0,07	17,00
M35-0,5	11,4	0,07	14,95
M35-1	22,7	0,07	13,85
M35-1,5	34,0	0,07	12,80
M35-2	45,4	0,07	11,83
M35-2,5	56,7	0,07	11,34
M35-3	68,1	0,07	10,83
M35-3,5	79,4	0,07	10,85
M35-4	90,8	0,07	10,38

Tablo 4.2. Devam s/ç oranı 0,35 olan serilere ait yayılma deney sonuçları

K35-0,5	11,4	0,08	16,57
K35-1	22,7	0,09	15,2
K35-1,5	34	0,09	15,1
K35-2	45,4	0,13	15,03
K35-2,5	56,7	0,21	13,27
K35-3	68,1	0,24	12,48
K35-3,5	79,4	0,30	12,6
K35-4	90,8	0,38	12,18

Tablo 4.3. s/ç oranı 0,42 olan serilere ait yayılma deney sonuçları

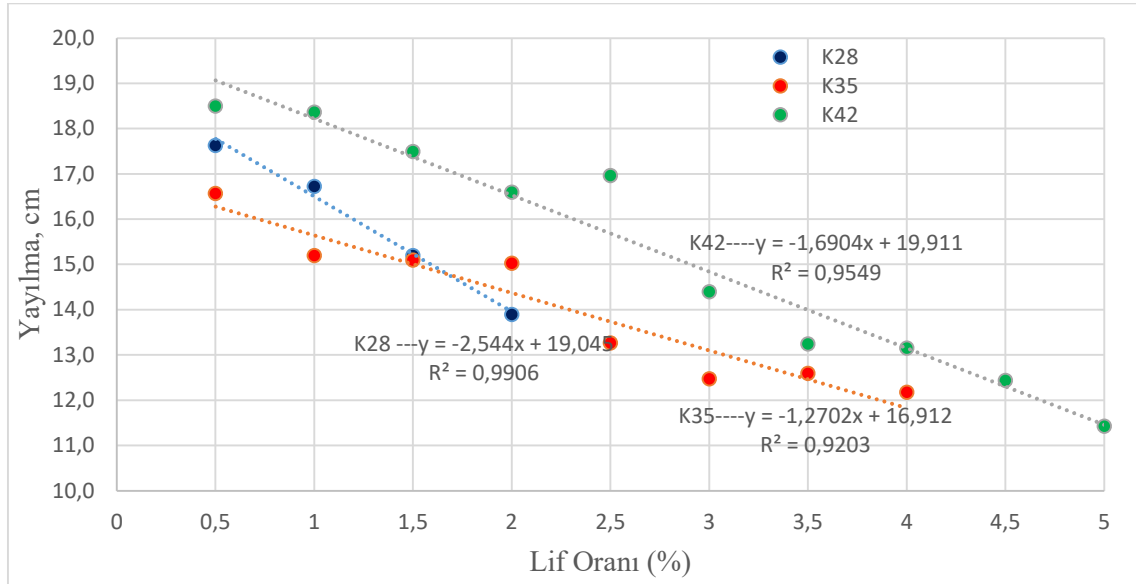
Numune Kodu	Mikro Lif (g)	Akışkanlaştırıcı (% çimento ağırlığı)	Yayılma (cm)
M42	0	-	17,77
M42-0,5	11,5	-	17,73
M42-1	22,91	-	16,60
M42-1,5	34,4	-	15,20
M42-2	45,8	-	14,29
M42-2,5	57,3	-	13,40
M42-3	68,7	-	12,72
M42-3,5	80,2	-	11,95
M42-4	91,6	-	11,77
M42-4,5	103,1	-	10,82
M42-5	114,6	-	10,70
K42-0,5	11,5	0,04	18,50
K42-1	22,9	0,05	18,37
K42-1,5	34,4	0,08	17,50
K42-2	45,8	0,10	16,60
K42-2,5	57,3	0,13	16,97
K42-3	68,7	0,13	14,40
K42-3,5	80,2	0,19	13,25
K42-4	91,6	0,25	13,16
K42-4,5	103,1	0,26	12,44
K42-5	114,6	0,3	11,43

Tablo 4.4.'te 0,42 s/ç oranına sahip harçların yayılma özellikleri verilmiştir. Tablo 4.4.'te görüldüğü üzere karışımdaki lif miktarı arttıkça yayılma azalmaktadır. Dolayısıyla işlenebilirlik olumsuz etkilenmektedir.

Tablo 4.4. Lif miktarı ve yayılma ilişkisi

Numune Kodu	M42 (Ref)	M42-1	M42-2	M42-3	M42-4	M42-5
Yayılma (cm)	17,77	16,60	14,29	12,72	11,77	10,70

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere K kodu ile başlayan karışımlarda kullanılan katkı miktarı artmasına rağmen lif oranı arttıkça s/ç oranından bağımsız olarak işlenebilirlik (yayılma) azaldığı görülmektedir. Deneysel olarak elde edilen yayılma ile lif oranı arasındaki ilişkinin regresyon katsayılarının tüm serilerde yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1 Lif oranı ve işlenebilirlik (yayılma) ilişkisi

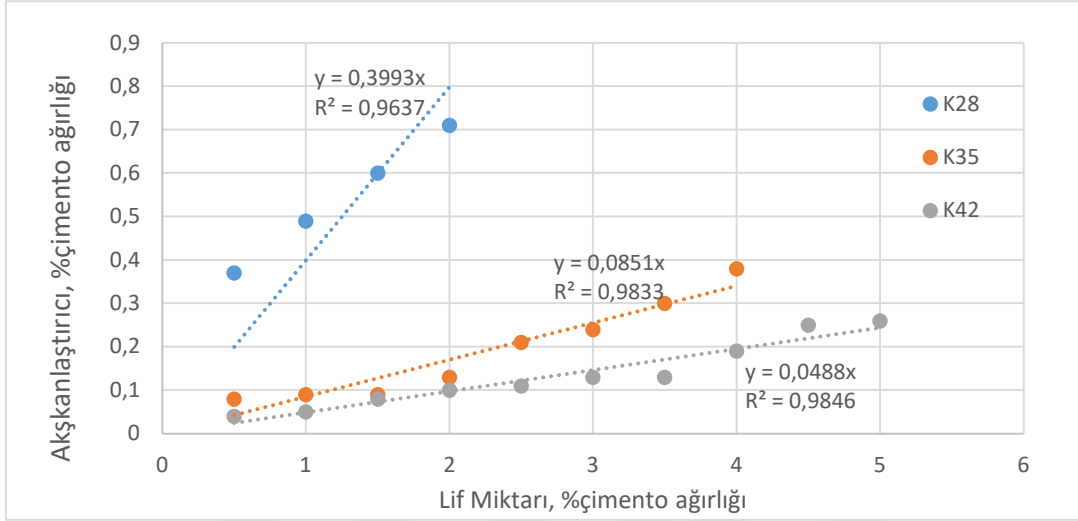
Şekil 4.2.’de karışımda kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarı ve lif oranı arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 4.2.’de görülen bağıntılar üzerinden karışım içerisindeki lif miktarına (% çimento ağırlığı) göre kullanılması gereken akışkanlaştırıcı katkı miktarı (% çimento ağırlığı) tayin edilebilmektedir.

s/ç oranı 0,28 olan karışımlar için kullanılması gereken akışkanlaştırıcı katkı miktarı;
 $y = 0,3993 x$ (y: akışkanlaştırıcı, x: lif miktarı) (4.1)

s/ç oranı 0,35 olan karışımlar için kullanılması gereken akışkanlaştırıcı katkı miktarı;
 $y = 0,0851 x$ (y: akışkanlaştırıcı, x: lif miktarı) (4.2)

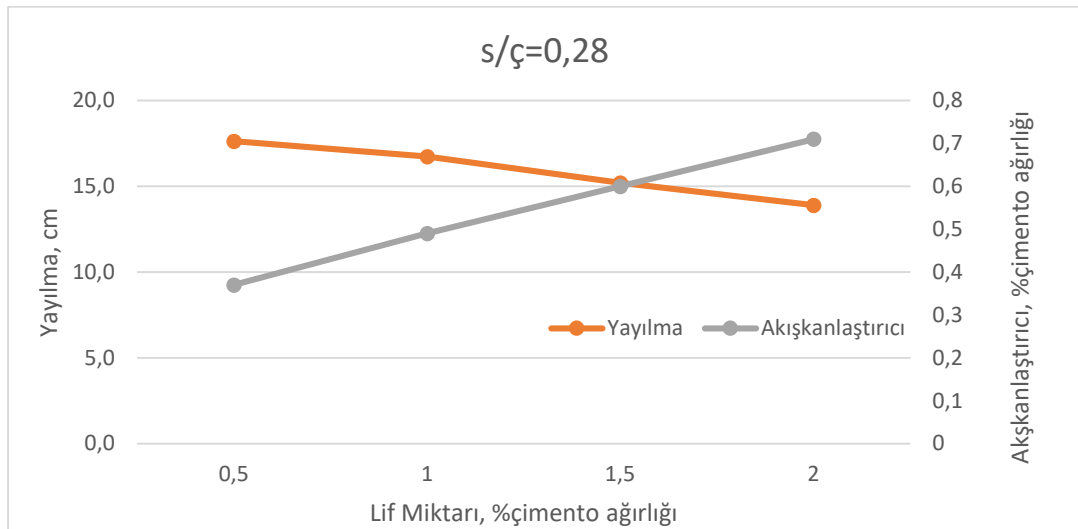
s/ç oranı 0,35 olan karışımlar için kullanılması gereken akışkanlaştırıcı katkı miktarı;
 $y = 0,0488x$ (y: akışkanlaştırıcı, x: lif miktarı) (4.3)

Denklem 4.1, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 kullanılarak gereken akışkanlaştırıcı miktarı yaklaşık olarak kolayca hesaplanabilmektedir.

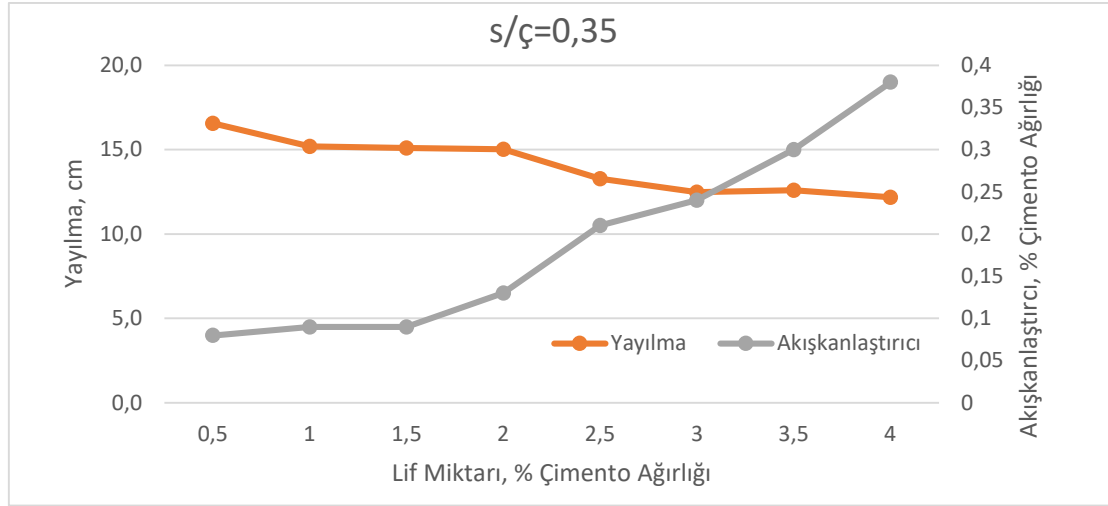


Şekil 4.2. Akışkanlaştırıcı katkı ve lif miktarı ilişkisi

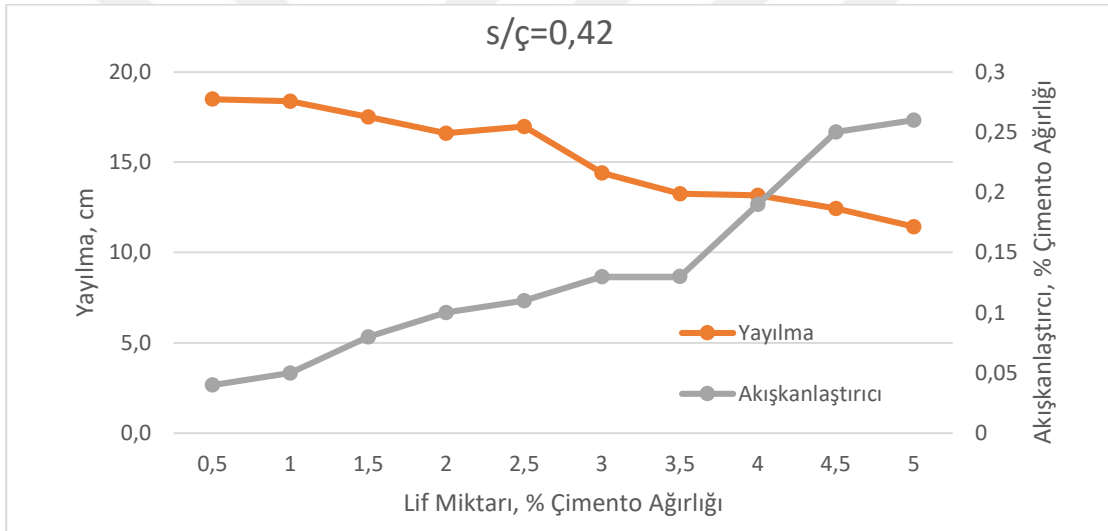
Şekil 4.3., Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'te görüldüğü üzere s/ç oranından bağımsız olarak lif miktarı arttıkça yayılma (işlenebilirlik) azalmaktadır. Buna bağlı olarak karışımı işleyebilmek için gerekli akışkanlaştırıcı katkı miktarı artmaktadır.



Şekil 4.3. s/ç oranı 0,28 olan seriye ait yayılma, akışkanlaştırıcı ve lif hacmi ilişkisi

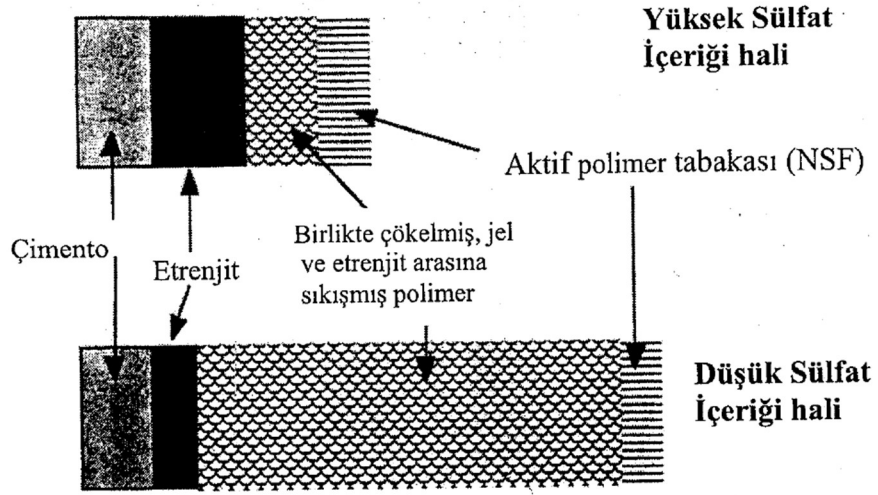


Şekil 4.4. s/ç oranı 0,35 olan seriye ait yayılma, akışkanlaştırıcı ve lif hacmi ilişkisi



Şekil 4.5. s/ç oranı 0,42 olan seriye ait yayılma, akışkanlaştırıcı ve lif hacmi ilişkisi

Ortamda mevcut alüminlerle hemen çökelen ve miçelleşen süper akışkanlaştırıcı molekülleri bir jel öge oluştururlar ve bunun içinde etrenjit kristalleri de sıkışır (Şekil 4.6.). Bu jel bir kimyasal bataklıktır ve yeni süper akışkanlaştırıcı moleküllerinin katı tanelere erişmesini önler. Ortamda SO_4^{2-} iyonlarının varlığı da bu bataklığın oluşmasını önler (Akman ve Akçay, 2005). Süper akışkanlaştırıcı katkı fazla miktarlarda kullanıldığında harç numunelerinde çimento şerbetinin lif ve kumdan ayrıştığı görülmüştür (Şekil 4.7). Bataklık oluşumu K42-4,5/5, K35-3,5/4 ve K28-2 serilerinde gözlenmiştir. Harç örneklerinde görülen bu durum ve işlenebilirlik problemleri bataklık oluşumu ile açıklanabilir.



Şekil 4.6. Çimento esaslı malzemelerde “bataklık” oluşumu (Akman ve Akçay, 2005)



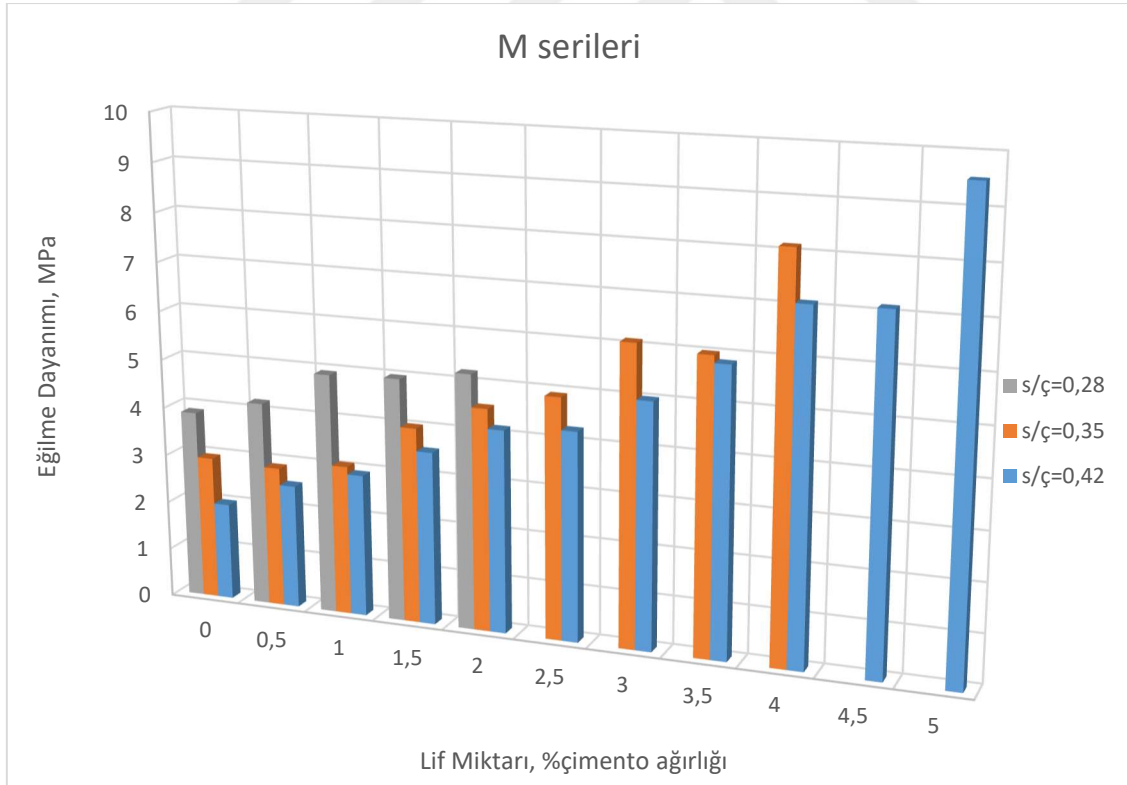
Şekil 4.7. Bataklık oluşumu gözlenmiş bir harç numunesi (K35-4)

4.2 Harcın Mekanik Özellikleri

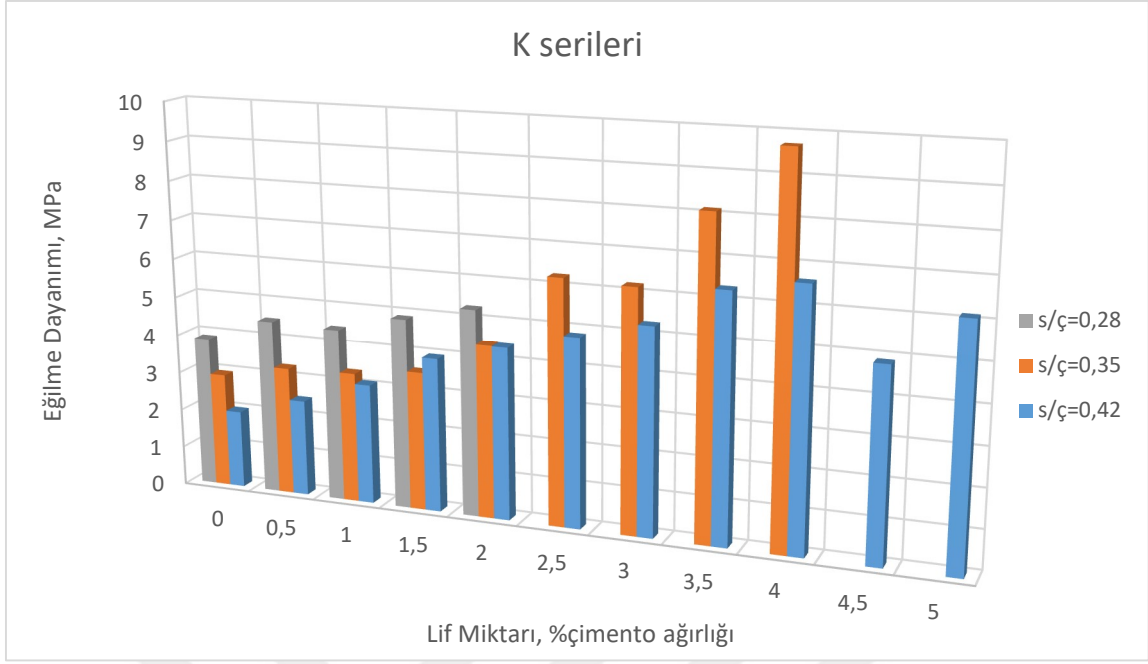
Lif katkısını malzemenin mekanik özelliklerine etki ettiği bilinmektedir. Lif katkısını optimum düzeyde kullanabilmek için s/ç oranı, kullanılan akışkanlaştırıcı katkı çeşidi ve miktarı büyük önem taşımaktadır. Genel anlamda mikro liflerin basınç dayanımına olumlu bir katkısı olmamıştır. Süneklik ve eğilme dayanımı üzerinde kayda değer artış gözlenmiştir. Tüm serilere ait mekanik özelliklerin (eğilme dayanımı ve basınç dayanımı) ortalama değerleri EK-B’de verilmiştir.

4.2.1 Üç Noktalı Eğilme Deneyi

Şekil 4.8.’te görüldüğü üzere yalın harç numunelerinde s/ç oranı arttıkça numunelerin eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla s/ç oranının eğilme dayanımına doğrudan etkisi olduğu görüldü. Karışıma %1,5 lif eklendiğinde, yalın harç numunelerine göre %78’e varan (M42 ve M42-1,5) artış gözlemlendi. Şekil 4.9’da ise akışkanlaştırıcı katkının eğilme dayanımına bir etkisi olmadığı görüldü.

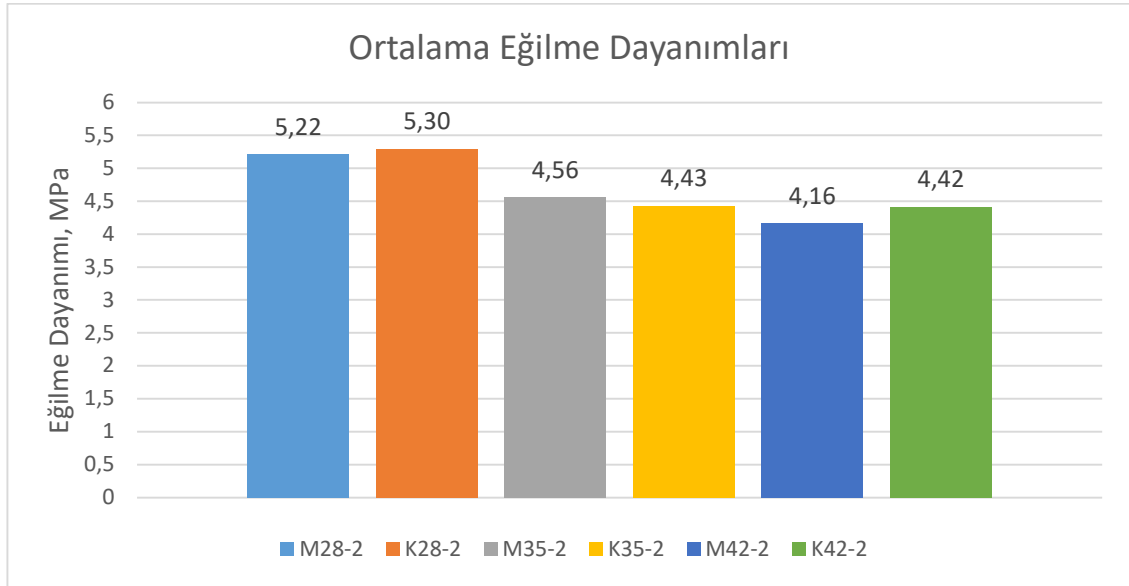


Şekil 4.8. M serilerine ait ortalama eğilme dayanımları



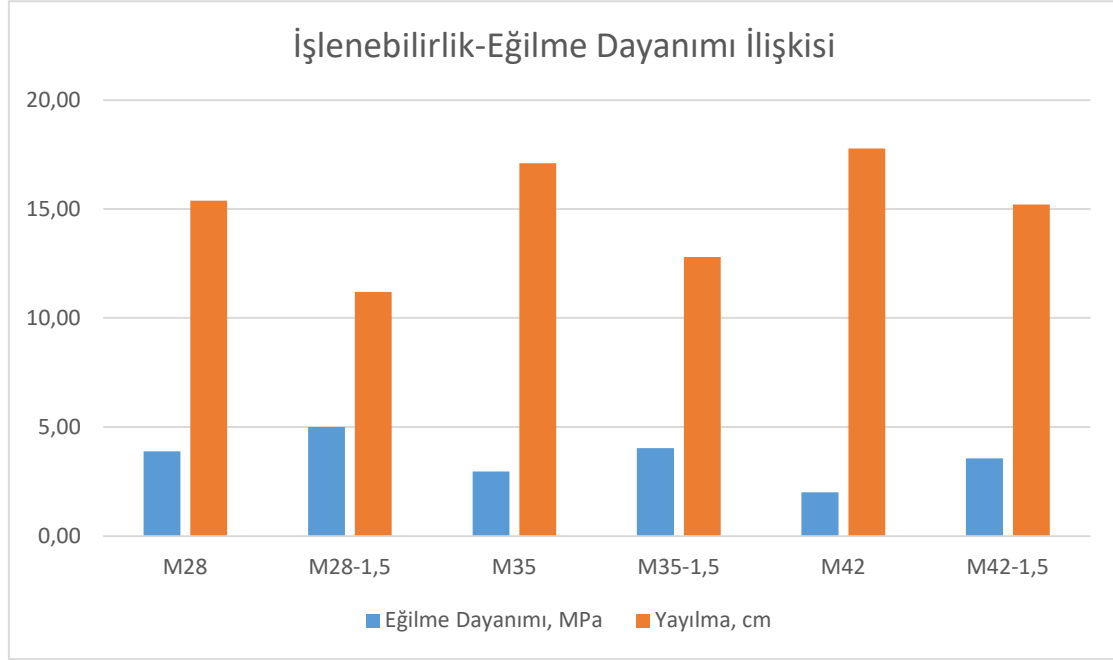
Şekil 4.9. K serilerine ait ortalama eğilme dayanımları

Şekil 4.10.'da aynı lif oranına ve farklı s/ç oranlarına sahip numuneler karşılaştırıldı. 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.



Şekil 4.10. %2 lif içeriğine sahip harçların ortalama eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

Mikro 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 lifsiz harçlarda çatlak oluşumu gözlenmiştir. Oluşan ilk çatlak genişliği ve harç içerisine katılan lif miktarı arasında ters bir ilişki bulunmaktadır. Kullanılan lif miktarının artmasıyla ilk çatlak genişliği azalmaktadır (Ünal ve diğ., 2007).

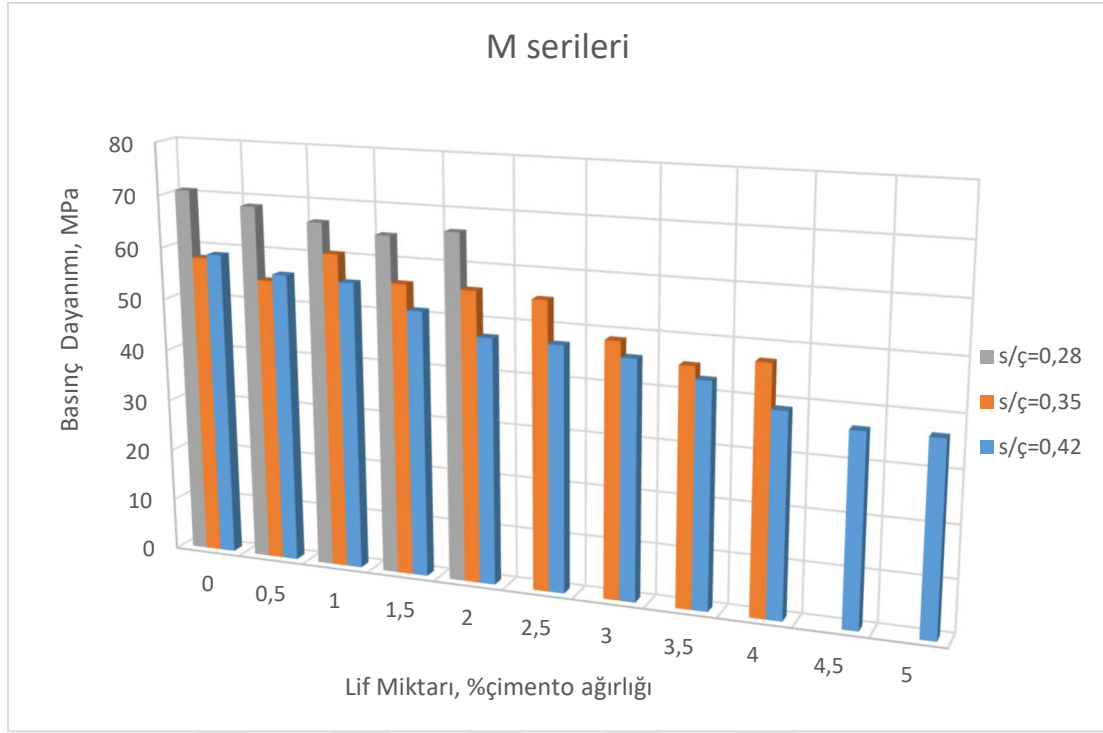


Şekil 4.11. İşlenebilirlik ile eğilme dayanımı ilişkisi

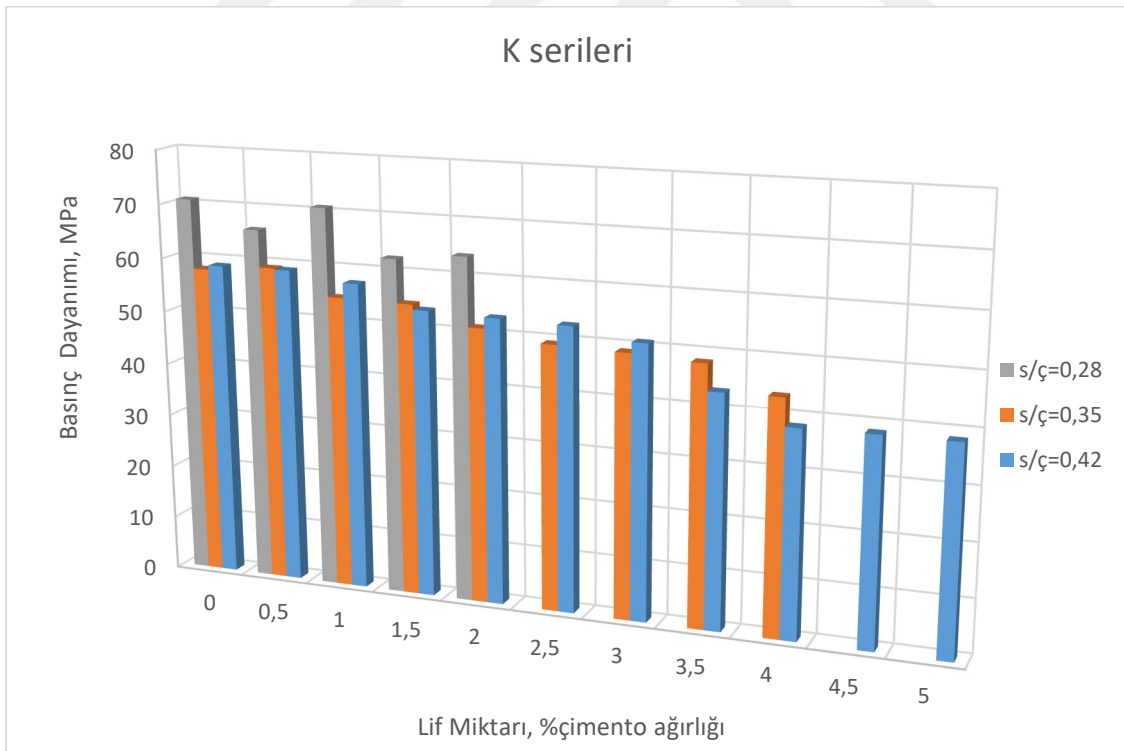
Şekil 4.11.'de görüldüğü üzere benzer s/ç oranlarında akışkanlaştırıcı katkının sabit tutulduğu serilerde, işlenebilirlik azaldıkça eğilme dayanımı artmaktadır.

4.2.2 Basınç Deneyi

Harç örneklerinden elde edilen tüm basınç dayanımı sonuçları EK B üzerinden görülebilir. Şekil 4.13. ve 4.14'te ise M ve K serilerine ait basınç dayanımları farklı s/ç oranlı serilerde görülebilmektedir.

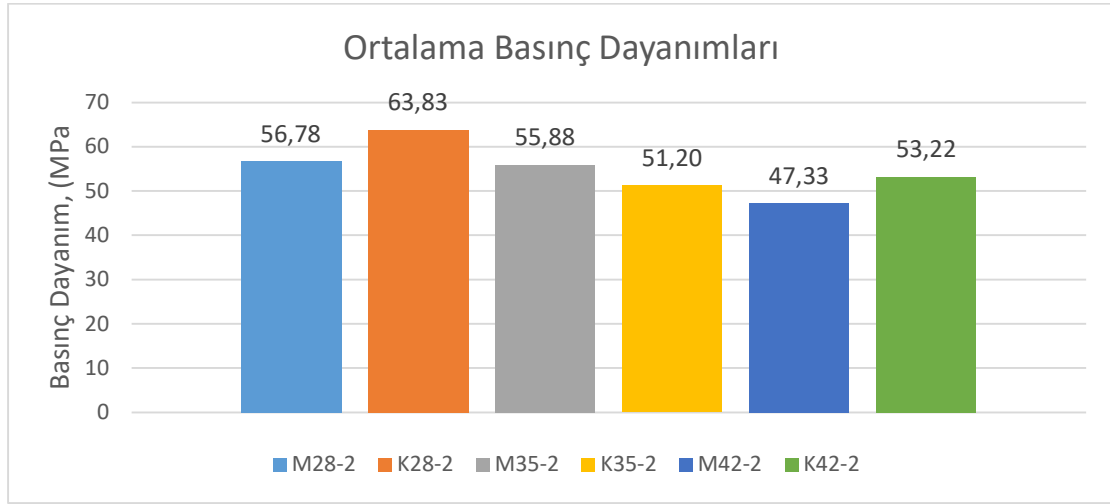


Şekil 4.12. M serilerine ait ortalama basınç dayanımları



Şekil 4.13. K serilerine ait ortalama basınç dayanımları

Yalın harca göre mikro lif katkılı harçların basınç dayanımlarının daha düşük olduğu görülmektedir. Kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarı aynı olan numunelerde %37'ye varan (M42 Ref/M42-5) dayanım kaybı görülmektedir. Bu kayıp matriste lif kaynaklı olarak boşluk hacminin artıyor olmasıdır. Bu durum işlenebilirlik özelliklerinin çimentolu karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki önemli etkisi olduğunu da göstermektedir (Şekil 4.15).

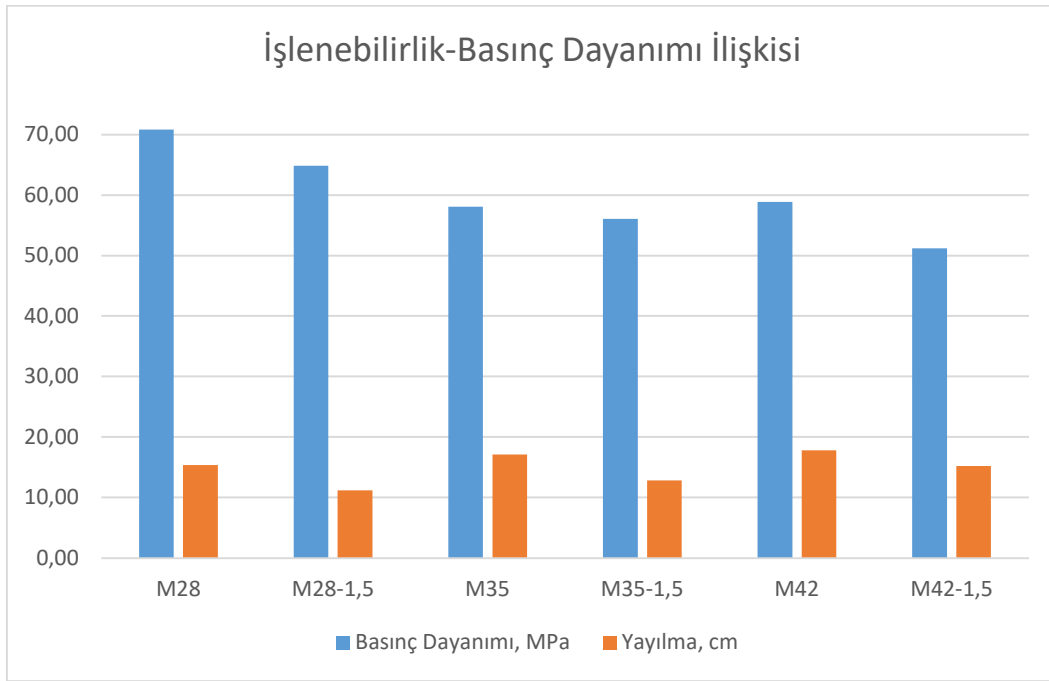


Şekil 4.14. %2 lif içeriğine sahip harçların ortalama basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.15. Farklı lif içeriğine sahip numunelerin görsel karşılaştırması a) %5 lif (K42-5), b) yalın harç (M42)

Karışımında kullanılan lif miktarı ile basınç dayanımı arasında değişken bir ilişki bulunmaktadır. Optimum bir değere kadar lif miktarı arttıkça basınç dayanımı artar. Ancak optimum değerden sonra lif miktarı arttıkça basınç dayanımı azalır. Bu durum üzerinde lif tipi ve birçok değişken etkilidir (Açıkgenç ve diğ., 2012). Şekil 4.16.'da görüldüğü üzere benzer s/ç oranlarında akışkanlaştırıcı katkının sabit tutulduğu serilerde, işlenebilirlik azaldıkça basınç dayanımı azalmaktadır.



Şekil 4.16. İşlenebilirlik ile basınç dayanımı ilişkisi

4.3 Rötire Sonuçları

Tablo 4.5.'te s/ç oranı 0,42 olan harç 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. Tablo 4.5.'te ise kullanılan lif oranının rötreye olan etkisinin farklı olduğu gözlenmektedir. Dolayısıyla tasarım yaparken bu etkiyi göz önüne almak gerekmektedir. Mikro poliamid lif katkısının çimento esaslı malzemelerin rötire etkisinden korunması için etkili bir yöntem olduğu görülmektedir.

Tablo 4.5. S/Ç oranı 0,42 olan harçların rötre sonuçları (µm/m)

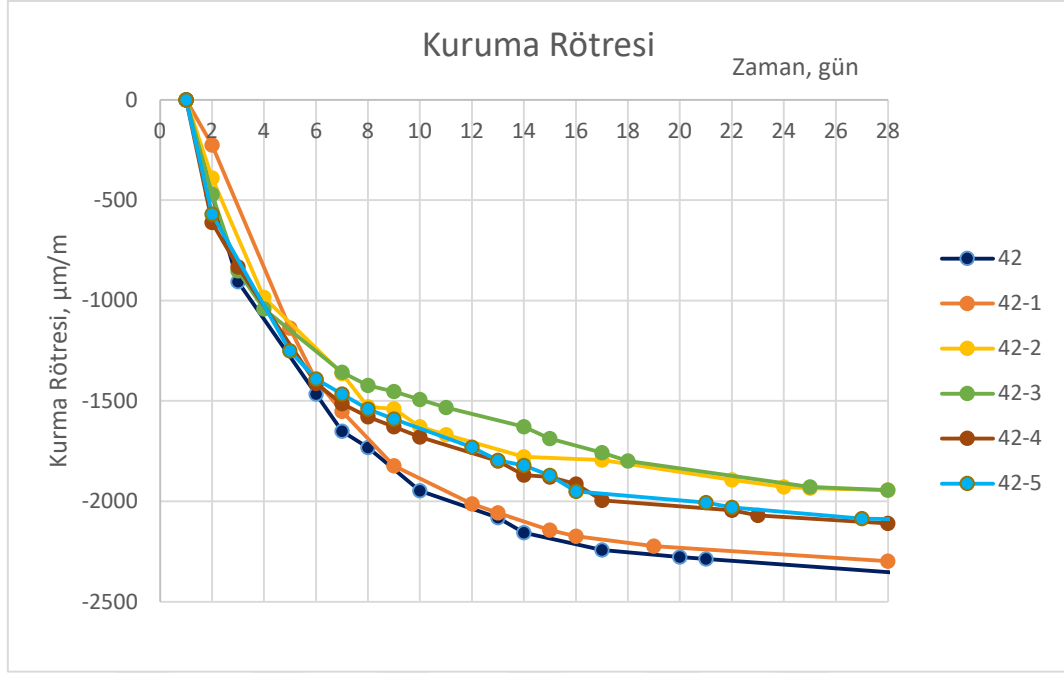
Kuruma Rötresi	Beton Yaşı (Gün)	M42 (Ref)	M42-1	M42-2	M42-3	M42-4	M42-5
	1	-470,470	-225,338	-389,805	-470,942	-611,529	-570,285
	3	-905,906	-1136,705	-687,156	-851,703	-832,080	-797,065
	7	-1651,652	-1552,328	-1364,318	1357,715	-1513,784	1465,733
	14	-2157,157	-2100,651	-1779,110	1628,257	-1869,674	1820,910
	28	-2372,372	-2298,448	-1944,028	1943,888	-2110,276	2088,544
	90	-2627,628	-2643,966	-2201,935	2263,327	-2374,150	2248,620
Otojen Rötre	Beton Yaşı (Gün)	M42 (Ref)	M42-1	M42-2	M42-3	M42-4	M42-5
	1	14,993	60,030	99,850	45,045	-99,950	-54,918
	3	-69,965	63,0325	-69,895	-155,155	-189,905	-74,888
	7	-254,873	-135,068	-124,813	-270,270	-319,840	-114,828
	14	-579,710	-455,278	-359,461	-388,722	-439,780	-249,626
	28	-809,595	-695,518	-584,124	-493,140	-672,521	-394,408
	90	-1314,343	-1226,050	-1266,140	-983,088	-1281,590	1100,850

Tablo 4.5.'te belirtildiği üzere %3 oranında lif kullanımının hem kuruma rötresi hem de otojen rötreyi önlemek için etkili bir yol olduğu görülmektedir.

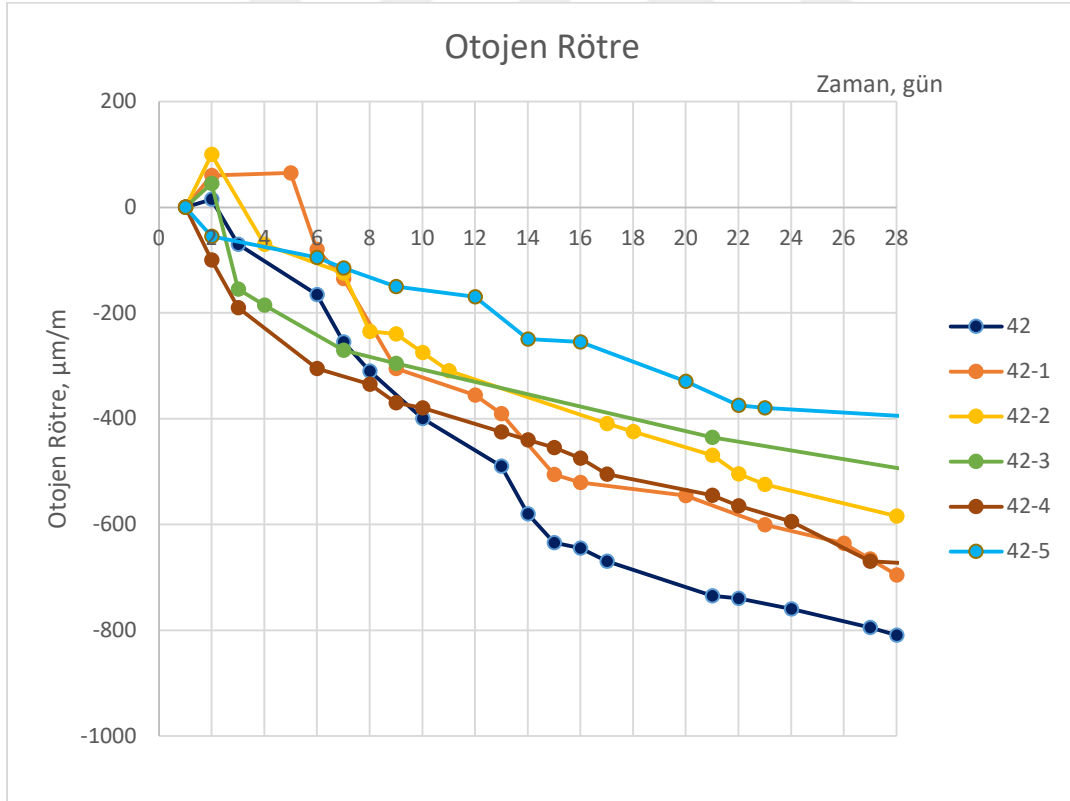
Tablo 4.6. Rötre sonuçlarının referans numune ile karşılaştırılması

Kuruma Rötresi	Numune Yaşı 28 Gün	M42 (Ref)	M42-1	M42-2	M42-3	M42-4	M42-5
	Rötre Değerleri	- 2372,372	-2298,448	-1944,028	-1943,888	-2110,276	-2088,544
	Değişim (%)	-	-%3,1	-%18,0	-%18,	-%11,0	-%11,9
Otojen Rötre	Numune Yaşı 7 Gün	M42 (Ref)	M42-1	M42-2	M42-3	M42-4	M42-5
	Rötre Değerleri	-254,873	-135,068	-124,813	-270,270	-319,84	-114,828
	Değişim (%)	-	-%47,0	-%51,0	%6,0	%25,4	-%54,9

Tablo 4.6.'da görüldüğü üzere lif kullanımının kuruma rötresi ve otojen rötrenin etkilerini azaltmak için etkili bir yöntemdir.



Şekil 4.17. s/ç oranı 0,42 olan seriye ait kuruma rötresi grafiği (0-28 gün)



Şekil 4.18. s/ç oranı 0,42 olan seriye ait otojen rötire grafiği (0-28 gün)

5. OPTİMUM KARIŞIM TASARIMI

Bu çalışmada üç farklı s/ç oranı için değişik lif oranlarına sahip çimentolu karışımların işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve rötre 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. Deneysel verilerin analizi, istatistiksel değerlendirmeleri ve sonuçların optimizasyonu Design-Expert TM yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Deneysel çalışmadaki $0,28 \leq s/\ç \leq 0,42$ ile $0 \leq V_f$ (çimento ağırlığınca % lif oranı) ≤ 5 alt ve üst sınırları kullanılmıştır. Tablo 5.1’de gösterilen R korelasyon katsayısıdır. Korelasyon iki ya da daha fazla değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi gösterir. Her bir tepki için elde edilen denklemler Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneysel çalışmadan elde edilen modellerin denklemleri ve R değerleri (korelasyon katsayıları)

Tepki	R
$f_c = 182,2 + 0,6 * V_f - 608,1 * (s/\ç) - 0,3 * V_f^2 + 732,7 * (s/\ç)^2 - 7,9 * V_f * (s/\ç)$	0,98
$f_{e_{gille}} = 14,4 + 0,6 * V_f - 54,8 * (s/\ç) + 0,2 * V_f^2 + 63 * (s/\ç)^2 - 0,6 * V_f * (s/\ç)$	0,96
$yayılma = 26,7 - 1,2 * V_f - 86,4 * (s/\ç) + 0,2 * V_f^2 + 158,9 * (s/\ç)^2 - 3 * V_f * (s/\ç)$	0,97

Çoklu optimizasyon tekniğinde birden fazla tepkinin maksimize veya minimize edilerek elde edilen arzu edilebilirlik fonksiyonu (d_j) kullanarak sayısal optimizasyon yapılır [31,38]. Tekil arzu edilebilirlik fonksiyonu $0 \leq d_j \leq 1$ aralığındadır. Çok amaçlı optimizasyondan tekil arzu edilebilirliğin maksimum ve minimum hedeflenmesi durumundaki büyüklükleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$d_j = \begin{cases} 0 & Y_j \leq \min f_j \\ \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{wt_j} & 0 < d_j < 1, \min f_j < Y_j < \max f_j \\ 1 & Y_j \geq \max f_j \end{cases} \quad \text{ve} \quad (5.1)$$

$$d_j = \begin{cases} 1 & Y_j \leq \min f_j \\ \left[\frac{\max f_j - Y_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{wt_j} & 0 < d_j < 1, \min f_j < Y_j < \max f_j \\ 0 & Y_j \geq \max f_j \end{cases} \quad \text{ve} \quad (5.2)$$

Burada, d_j , Y_j , $\min f_j$ ve $\max f_j$ sırasıyla, j . tepkinin arzu edirlilik fonksiyonu, tepki yüzey yöntemi ile bulunan değeri, deneysel elde edilen alt ve üst sınır değerleridir. wt_j ise optimizasyonda göz önüne alınan j . tepkinin ağırlık faktörü olup, o tepkiye verilen önemi ifade etmektedir (Myres ve Montgomery, 2002).

Bu fonksiyonlar her bir tepki için hesaplandıktan sonra geometrik ortalamalarıyla kompozitin çoklu arzu edilebilirlik derecesi (D) Denklem 5.3 ile bulunur.

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_z)^{1/z} \quad (5.3)$$

Burada z optimizasyondaki tepki sayısıdır. Modellenen bu tepkiler kullanılarak dört farklı optimizasyon çalışması yapılmıştır.

5.1. Optimizasyon Çalışması 1

İlk çalışma olarak Tablo 5.2.'de görüldüğü gibi lif miktarı %2,5'a kadar olan karışımlar için eğilme dayanımı en yüksek ve yayılma değeri 13,5 cm'den az olmayacak şekilde en yüksek olan optimum karışım tasarımı yapılmıştır.

Tablo 5.2. Optimizasyon çalışması için parametreler

Parametre	Hedef	Alt Limit	Üst Limit
Lif Miktarı (%)	Aralıkta	0	2,5
s/ç oranı	Aralıkta	0,28	0,42
Basınç Dayanımı (MPa)	Maksimum	46,86	71,86
Eğilme Dayanımı (MPa)	Maksimum	2,11	5,16
Yayılma (cm)	Aralıkta	13,5	17,77

Elde edilen sonuçlar Tablo 5.3'te verilmiştir. Program çıktısına göre iki 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 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışımlar

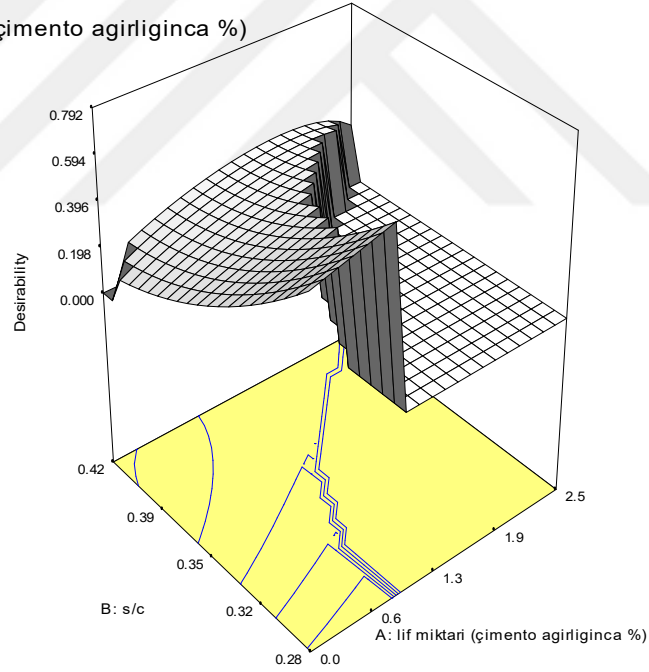
Lif Miktarı (%)	s/ç oranı	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Yayılma (cm)	Arzu edilebilirlik
0,8	0,28	67,77	4,49	13,5	0,802
0,2	0,28	68,60	4,09	14,77	0,723

DESIGN-EXPERT Plot

Desirability

X = A: lif miktarı (çimento ağırlığınca %)

Y = B: s/c



Şekil 5.1. Lif miktarı ve arzu edilebilirlik ilişkisinin tepki yüzey modeli

Optimizasyon 1 çalışması basınç dayanımı aralıkta olacak şekilde tekrarlandığında ise iki adet optimum sonuç elde edilmiştir. Tablo 5.4'ten de görüldüğü gibi s/ç oranı 0.42 olan ve lif miktarı %2,5 olan karışım daha yüksek arzu edilebilirlik değeri vermiştir.

Tablo 5.4. Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışımlar

Lif Miktarı (%)	s/ç oranı	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Yayılma (cm)	Arzu edilebilirlik
2,5	0,42	47,43	4,66	13,5	0,836
0,8	0,28	67,61	4,47	13,5	0,782

5.2. Optimizasyon Çalışması 2

Tablo 5.5'te lif miktarı %5'e kadar olan ve akışkanlaştırıcı miktarının da faktör olduğu durumda eğilme dayanımı en yüksek olan, yayılma miktarı 13 cm' den az olmayacak şekilde en yüksek olan optimum karışım tasarımı yapılmıştır.

Tablo 5.5. Optimizasyon çalışması için parametreler

Parametre	Hedef	Alt Limit	Üst Limit
Lif Miktarı (%)	Aralıkta	0	5
s/ç oranı	Aralıkta	0,28	0,42
Akışkanlaştırıcı (%)	Aralıkta	0	0,23
Basınç Dayanımı (MPa)	Aralıkta	46,86	71,86
Eğilme Dayanımı (MPa)	Maksimum	2,11	5,16
Yayılma (cm)	Aralıkta	13	17,77

Yapılan optimizasyon sonucunda çıkan karışım içeriği sonuçları Tablo 5.6.'da gösterilmektedir. Program çıktısına göre birbirine yakın arzu edilebilirlik derecesinde farklı karışımlar bulunmaktadır. Bu karışımların içerisinde üretilmesi en uygun harc karışımı lif miktarı çimento ağırlığının %1,2 oranında lif içeren, s/ç oranın 0,28 olan ve akışkanlaştırıcı katkı miktarı çimento ağırlığının %0,23 oranında olan karışımdır. Tepki yüzeyleri Şekil 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.6 Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışımlar

Lif Miktarı (%)	s/ç oranı	Akışkanlaştırıcı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Yayılma (cm)	Arzu edilebilirlik
1,1	0,28	0,23	67,50	4,68	13	0,844
2,6	0,41	0	46,86	4,64	13	0,830

DESIGN-EXPERT Plot

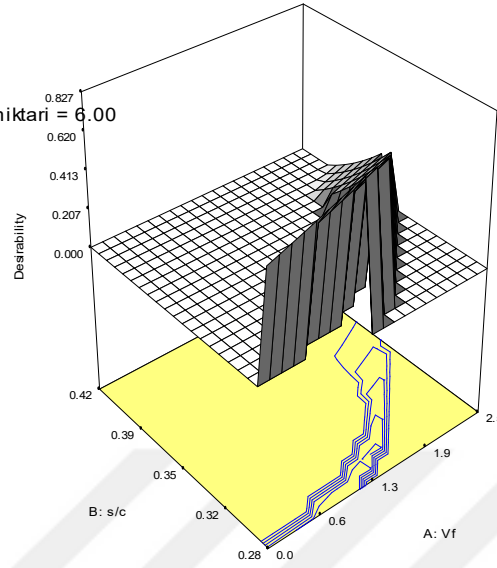
Desirability

X = A: Vf

Y = B: s/c

Actual Factor

C: akışkanlaştırıcı miktarı = 6.00



Şekil 5.2. Lif miktarı ve arzu edilebilirlik ilişkisinin tepki yüzey modeli

5.3 Optimizasyon Çalışması 3

Yukarıda verilen modellemelerin yanı sıra s/ç oranı 0,42 olan karışımlar için otojen ve kuruma rötrelerinin farklı günlerindeki değerleri de alınarak yeni modeller oluşturulmuştur. Tablo 5.7’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.

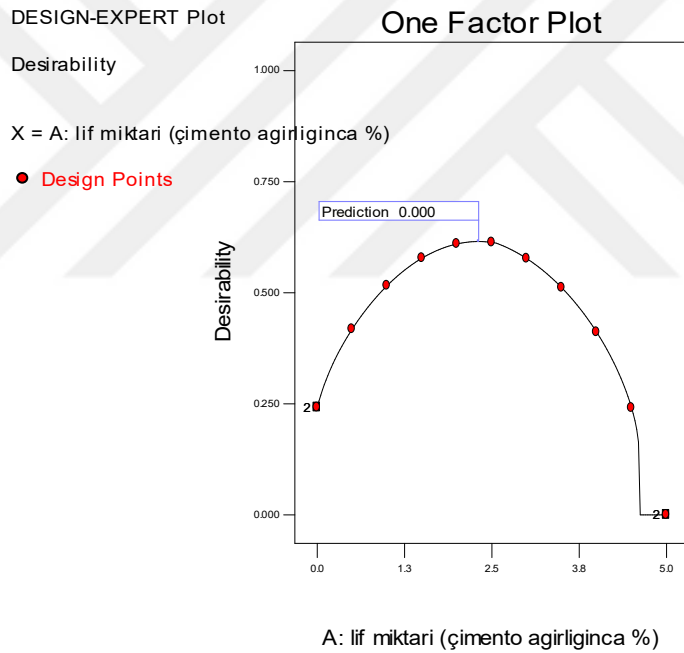
Tablo 5.7. Optimizasyon çalışması için parametreler

Parametre	Hedef	Alt Limit	Üst Limit
Lif Miktarı (%)	Aralıkta	0	5
Basınç Dayanımı (MPa)	Maksimum	36,31	56,8
Eğilme Dayanımı (MPa)	Maksimum	2,11	9,6
Yayılma (cm)	Maksimum	10,7	17,77
Kuruma Rötresi (7 Gün)	Minimum	-1357	-1651
Kuruma Rötresi (28 Gün)	Minimum	-1944	-2372
Otojen Rötre (3 Gün)	Maksimum	-245	-69
Otojen Rötre (28 Gün)	Maksimum	-809	-520

Yapılan optimizasyon sonucunda çıkan karışım içeriği sonuçları Tablo 5.8’de gösterilmektedir. Program çıktısına göre en uygun çözüm çimento ağırlığınca %2,3 oranında lif kullanılmasıdır. Optimum tasarımın arzu edilebilirlik grafiği Şekil 5.3’te verilmiştir. Bu değerlendirme basınç dayanımı aralığında olacak şekilde tekrarlandığında da aynı karışımı optimum çözüm olarak bulunmuştur.

Tablo 5.8. Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışım

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



Şekil 5.3. Lif miktarı ile işlenebilirlik ilişkisi

5.3 Optimizasyon Çalışması 4

Yukarıda verilen modellemelerin yanı sıra belli bir yayılma değeri hedef gösterilerek de optimum tasarımlar bulunabilir. Liflerin yüksek maliyetleri de göz önünde bulundurularak lif miktarının en az olacak şekilde ekonomik bir karışım bulunması bu

tasarım için hedeflerin arasına konulmuştur. Tablo 5.9’da görüldüğü gibi hedef yayılma değerleri 13, 14, 15 ve 16 cm olarak seçilmiştir.

Tablo 5.9. Optimizasyon çalışması için parametreler

Parametre	Hedef	Alt Limit	Üst Limit
Lif Miktarı (%)	Minimum	0	5
s/ç oranı	Aralıkta	0,28	0,42
Basınç Dayanımı (MPa)	Aralıkta	46,86	71,86
Eğilme Dayanımı (MPa)	Maksimum	2,11	5,16
Yayılma (cm)	Hedef	13, 14, 15	

Yapılan optimizasyon sonucunda çıkan karışım içeriği sonuçları Tablo 5.10’da gösterilmektedir. Program çıktısına göre ekonomik çözümler 0,28 ve 0,42 s/ç oranlı karışımlar için elde edilmiştir. Bu karışımlarda hedef yayılma değerleri için farklı lif miktarları elde edilirken, hedef 16 cm yayılmaya ulaşamadığı yine de arzu edilebilirlik derecesi 0,769 ve 0,655 olan karışımların olabileceği görülmüştür.

Tablo 5.10. Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen karışımlar

Hedef Yayılma (cm)	Yayılma (cm)	Lif Miktarı (%)	s/ç	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Arzu edilebilirlik
13	13	1,1	0,28	67,36	4,67	0,885
13	13	2,7	0,42	46,86	4,47	0,795
14	14	0,6	0,28	68,14	4,33	0,860
14	14	2,3	0,42	48,63	4,34	0,772
15	15	0,1	0,28	68,72	4,02	0,832
15	15	1,7	0,42	50,78	3,75	0,716
16	15,20	0,08	0,28	68,81	3,97	0,769
16	15,14	1,6	0,42	51,05	3,68	0,655

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sentetik kısa lif kullanımının s/ç oranı 0,28, 0,35 ve 0,42 olan çimento esaslı malzemelerin taze haldeki işlenebilirlik, mekanik özellikler ile otojen ve kurutma rötresi davranışı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışıldı. Lif miktarı %0'dan başlayarak %0,5 artışla iletildi. Bu karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı miktarı sabit tutulup lif miktarının işlenebilirliğe etkisi gözlemlendi. Diğer yandan benzer karışımlar tekrar üretilerek istenen kıvamı elde etmek için akışkanlaştırıcı katkı miktarı da belirlenmiştir.

Deney bulguları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 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 kullanılabilmiştir.
- Karışıma eklenen kısa lif miktarı arttıkça, s/ç oranından bağımsız olarak işlenebilirlik beklenildiği gibi azalmıştır.
- Karışımlarda kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarı ve lif oranı arasında yüksek regresyon katsayısına sahip bağıntılar kurulmuştur. Böylece karışım içerisindeki lif miktarına (% çimento ağırlığı) göre kullanılması gereken akışkanlaştırıcı katkı miktarının (% çimento ağırlığı) tayin edilebileceği görülmüştür.
- Mikro lif katkısı arttıkça numunelerin basınç dayanımının işlenebilirlik problemleri sebebiyle azaldığı gözlemlenmiştir.
- s/ç oranına bağlı olarak kullanılan mikro lif miktarı arttıkça eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. Aynı s/ç oranına ve lif miktarına sahip olan numunelerde akışkanlaştırıcı katkı miktarının eğilme dayanımına önemli bir etkisi olmamıştır. En yüksek eğilme dayanımı beklenildiği gibi s/ç oranı en düşük, lif katkısı ise en fazla olan karışımlarda olduğu görülmüştür.
- Rötire ölçümleri s/ç oranı 0,42 olan serilerde yapılmıştır. Sentetik kısa lif katkısı ile çimentolu malzemelerin kuruma ve otojen rötresinin önlenildiği belirlenmiştir.
- İşlenebilir, mekanik özellikleri yüksek, rötire değerleri düşük çimentolu karışımlar için optimum kısa lif oranlarının bulunabileceği yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda bulunmuştur.

Deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda bu alanda yapılabilecek gelecek çalışmalarda kısa lif katkılı çimento esaslı malzemelerin enerji yutma kapasiteleri ve aşınma dayanımları üzerine çalışmalar yürütülebileceği ve bu özelliklerin hepsinin belirli oranda artış gösterdiği optimum tasarım ilkelerinin araştırılabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Acun, S. (2000), Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 101059.
- Açıkgenç, M., Arazsu, U., Alyamaç, K. E. (2012). Farklı Karışım Oranlarına Sahip Polipropilen Lifli Betonların Dayanım ve Durabilite Özellikleri. *SDU International Technologic Science* 4(3), 41-54.
- Akçay, B. (2007), Effects of Lightweight Aggregates on Autogenous Deformation and Fracture of High Performance Concrete. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 223721.
- Akçay, B., (2020). Karma Lifli Betonların Tek Eksenli Çekme Altında Çatlak Yapısının İncelenmesi. *Teknik Dergi*, 31(1), 9773-9787.
- Akman, M. S., Akçay, B. (2005). Kimyasal Beton Katkılarının Gelişimi ve Çimentoların Uyumu. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, 24 Mart 2005.
- Akman, M.S. (1997). Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi*, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, 01-04 Eylül 1997.
- Alkayış, M. H., Başığit, C. (2021). Lif Katkısının Beton Darbe Dayanımına Etkisi. *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 24, 455-462.
- Bekem, İ., Gultekin, A. B., Dikmen, C. B. (2009). Yapı Ürünlerinin Hizmet Ömrü Açısından İrdelenmesi: Betonarme Örneği. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 13-15 Mayıs 2009.
- Bentz, D.P., Jensen, O.M. (2004) Mitigation Strategies for Autogenous Shrinkage Cracking. *Cement and Composites*, 26(6), 677-685.
- Chawla K.K. (1998). *Fibrous Materials* (1). Cambridge University Press, United Kingdom.
- Derringer, G., Suich, R., Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality and Technology*, 12(4), 214-219, (1980).
- DSİ, *Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton*, Devlet Su İşleri, Ankara, Türkiye, 1994.
- Fang, Q., Zhang, J. (2013). Three Dimensional Modelling Of Steel Fiber Reinforced Concrete Material Under Intense Dynamic Loading. *Construction And Building Materials*, 44, 118-132.

- Gödek, E., Keskinates, M., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K. T. (2016) Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerde Su/Çimento Oranı ve Mineral Katkı Türünün Çoklu Çatlak Davranışına Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(54), 440-454.
- Karahan, O., Atış, C.D. (2011). The Durability Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Concrete. *Materials and Design*, 32(10), 44–49.
- Kozak, M., (2013). Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması. *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, 3(5), 26-35.
- Köksal, F. (2004). Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 175857.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C. (2002). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. New York: John Wiley&Sons.
- Naaman, E., A. (2000). Fibre Reinforcement for Concrete: Looking Back, Looking Ahead. *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, Fransa, 13-15 Eylül 2000.
- Özalp, F., Yılmaz, H.D., Akçay, B. (2022). Mechanical Properties and Impact Resistance of Concrete Composites with Hybrid Steel Fibers. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16, 615-623.
- Özbay, E. (2016). Lif Türünün Betonların Yük-Deplasman Davranışı ve Donma-Çözülme Direncine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 273-279.
- Özcan, Z. (2018). Sentetik Makro Fiber Liflerin Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması, *2ND International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*, Sakarya, 04-06 Mayıs 2018.
- Özsar, S. D. (2017). Naylon 66 Lif Kullanımının Betonda Mekanik Parametreler ve Rötreye Etkisi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 494782.
- Peled, A., Bentur, A. (2000). Geometrical Characteristics and Efficiency of Textile Fabrics for Reinforcing Cement Composites. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 781-790.
- Peled, A., Sueki, S., Mobasher, B. (2006). Bonding in Fabric–Cement Systems: Effects of Fabrication Methods. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1661-1671.
- Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D.H., Moczko, A. (2000). Fracture Properties and Acoustic Emission Response of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre Reinforced Concrete, *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, Fransa, 13-15 Eylül 2000.

- Sarı, M., (2013). Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışa Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 349890.
- Sertkaya, S., Erdoğan, H., Özalp, F., Akçay, B., (2018). Çelik ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen Makro Lif Takviyeli Betonların Kırılma Davranışı. *Hazır Beton Dergisi*, 75, 75-79.
- Şimşek, O., (2004). *Beton ve Beton Teknolojisi*. Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Taşdemir M. A., Bayramov F., Kocatürk A. N., Yerlikaya M., 2004. *Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 10-12 Haziran 2004.
- Taşdemir, M. A. (2010). High Performance Fiber-Reinforced Cement Based Composites and Their Applications, *İMO-JSCE Joint Symposium On Concrete Engineering*, İstanbul, 9-10 Haziran 2010.
- Tazawa, E., Miyazawa, S. (1995). Influence of Cement and Admixture on Autogenous Shrinkage of Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 281-287.
- Topçu, İ. B., Demirel, O. E., Uygunoğlu, T. (2017) Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 20(1), 91-96.
- Türk, K., Kına, C., (2017). Çimento Esaslı Kompozitlerde Karma Lif Kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 671-678.
- Türkmenoğlu, Z.F., Varol, O.O. (2016). Lifli Beton Türleri ve Kullanım Alanları. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana, 26-28 Ekim 216.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T., Gençel, O. (2007). Çelik Liflerin Beton Basınç ve Eğilme Özelliklerine Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 23-30.
- Yatağan, S. (2010). Beton ve Harçlarda Agrega Dane Boyutunun Rötrev ve Durabiliteye Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 315377.
- Yerlikaya M., Çelik Tel Donatılı Beton ve Uygulamaları, Beksa Çelik Kord San. ve Tic. A.Ş., Kocaeli, Türkiye.
- Zollo, R.F. (1997).Fibre-reinforced Concrete: an Overview after 30 years of Development. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 107-122.



EKLER

Ek-A Tüm serilere ait karışım içerikleri

Numune Kodu	Hacim (dm³)	Çimento (g)	Su (g)	Kum (g)	Katkı Ak. (g)	Lif (g)
M28	2,1	2693	754	1098	6,0	0,0
M28-0,5	2,1	2693	754	1098	6,0	13,5
M28-1	2,1	2693	754	1098	6,0	26,9
M28-1,5	2,1	2693	754	1098	6,0	40,4
M28-2	2,1	2693	754	1098	6,0	53,9
K28-0,5	2,1	2693	754	1098	9,9	13,5
K28-1	2,1	2693	754	1098	13,1	26,9
K28-1,5	2,1	2693	754	1098	16,2	40,4
K28-2	2,1	2693	754	1098	19,6	53,9
M35	1,9	2269	793,5	1005	1,6	0,0
M35-0,5	1,9	2269	793,5	1005	1,6	15,1
M35-1	2,0	2269	793,5	1005	1,6	30,2
M35-1,5	2,0	2269	793,5	1005	1,6	34,0
M35-2	2,0	2269	793,5	1005	1,6	45,4
M35-2,5	2,0	2269	793,5	1005	1,6	56,7
M35-3	2,0	2269	793,5	1005	1,6	68,1
M35-3,5	2,0	2269	793,5	1005	1,6	79,4
M35-4	2,0	2269	793,5	1005	1,6	90,8
K35-0,5	1,9	2269	793,5	1005	1,9	15,1
K35-1	2,0	2269	793,5	1005	2,0	30,2
K35-1,5	2,0	2269	793,5	1005	2,1	34,0
K35-2	2,0	2269	793,5	1005	2,9	45,4
K35-2,5	2,0	2269	793,5	1005	4,7	56,7
K35-3	2,0	2269	793,5	1005	5,5	68,1
K35-3,5	2,0	2269	793,5	1005	6,8	79,4
K35-4	2,0	2269	793,5	1005	8,6	90,8
M42	2,2	2291	963,0	1139	0,0	0,0
M42-0,5	2,2	2291	963,0	1139	0,0	11,5
M42-1	2,2	2291	963,0	1139	0,0	22,9
M42-1,5	2,2	2291	963,0	1139	0,0	34,4
M42-2	2,2	2291	963,0	1139	0,0	45,8
M42-2,5	2,2	2291	963,0	1139	0,0	57,3
M42-3	2,2	2291	963,0	1139	0,0	68,7
M42-3,5	2,2	2291	963,0	1139	0,0	80,2
M42-4	2,2	2291	963,0	1139	0,0	91,6
M42-4,5	2,3	2291	963,0	1139	0,0	103,1
M42-5	2,3	2291	963,0	1139	0,0	114,6

Ek-A (Devam)Tüm serilere ait karışım içerikleri

K42-0,5	2,2	2291	963,0	1139	0,8	11,5
K42-1	2,2	2291	963,0	1139	1,2	22,9
K42-1,5	2,2	2291	963,0	1139	1,7	34,4
K42-2	2,2	2291	963,0	1139	2,2	45,8
K42-2,5	2,2	2291	963,0	1139	3,0	57,3
K42-3	2,2	2291	963,0	1139	3,0	68,7
K42-3,5	2,2	2291	963,0	1139	4,3	80,2
K42-4	2,2	2291	963,0	1139	5,9	91,6
K42-4,5	2,3	2291	963,0	1139	6,0	103,1
K42-5	2,3	2291	963,0	1139	6,9	114,6



Ek-B Tüm serilere ait ortalama eğilme ve basınç dayanımları.

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

Ek-B (Devam) Tüm serilere ait ortalama eğilme ve basınç dayanımları

K42-0,5	2,48	59,01
K42-1	3,09	57,49
K42-1,5	3,96	53,59
K42-2	4,42	53,22
K42-2,5	4,85	52,94
K42-3	5,30	50,97
K42-3,5	6,32	43,50
K42-4	6,63	38,36
K42-4,5	4,90	38,57
K42-5	6,14	38,61



KİŞİSEL YAYIN ve ESERLER

Gökbayrak, B.A. (2022). Çimento Esaslı Malzemelerde Yüksek Oranlarda Kısa Lif Kullanımı, *7. Uluslararası Başkent Kongresi, Çevrimiçi (Online)*, 29-31 Ekim 2022.



ÖZGEÇMİŞ

Berkin Atahan GÖKBAYRAK, ilk ve orta öğrenimini İstanbul’da tamamladı. Lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde tamamladı. Ardından 2020’de aynı üniversitede yüksek lisans eğitimine başladı. Halen özel sektörde inşaat mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

