

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇELİK VE YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN MAKRO LİF
TAKVİYELİ BETONLARIN KIRILMA DAVRANIŞLARI**

SÜMER SERTKAYA

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇELİK VE YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN MAKRO LİF
TAKVİYELİ BETONLARIN KIRILMA DAVRANIŞLARI**

SÜMER SERTKAYA

Prof.Dr.Burcu AKÇAY ALDANMAZ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç.Dr.Fatih ÖZALP
Jüri Üyesi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi

.....

Dr.Öğr. Üyesi Hakan ERDOĞAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih:03.10.2024

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/altyapı 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.

Sümer SERTKAYA

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.) kullanımını 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 kurulugerekçelikararıiletezimin/projeminerişimeaçılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Sümer SERTKAYA

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma, betonarme yapıların güvenliği ve dayanıklılığının artırılması amacıyla, farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip betonlarda çelik ve yüksek yoğunluklu polietilen makro liflerin kullanımının mekanik ve kırılma performansına olan etkilerini incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar, lifli betonların önemli avantajlar sağladığını ve geleneksel betonlara kıyasla üstün özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın yürütülmesi esnasında yönlendirmeleri ve rehberliğiyle, her zaman desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ' a şükranlarımı sunuyorum. Tez çalışmama yapmış oldukları katkılardan dolayı Nuh Çimento, SİKA, BASF ve İSTON' a teşekkür ederim. Ayrıca sevgili eşim Mediha SERTKAYA, değerli kızlarım Ela SERTKAYA ve Ece SERTKAYA 'ya gösterdikleri sevgi ve sabır için, tüm aileme ve arkadaşlarıma destekleri için teşekkür ederim.

Ekim-2024

Sümer SERTKAYA

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1.Yapılan Literatür Çalışmaları	4
3. MALZEME VE YÖNTEM	11
3.1. Çimento.....	11
3.2. Akışkanlaştırıcı Katkı.....	11
3.3. Çelik Lif	12
3.4. Polimer Lif	12
3.5. Agregası.....	13
3.6. Metakaolin.....	13
3.7 Karışım Oranları.....	14
3.8. Çatlak Ağız Açılma Kontrollü Test Cihazı.....	15
3.9. Şehim Ölçer(LVDT).....	16
3.10.Çatlak Ağız Açılma Ölçer (CMOD).. ..	16
3.11.Deney Düzenekleri	16
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	19
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	26
KAYNAKLAR	29
EKLER.....	32
KİŞİSELYAYIN VE ESERLER.....	35
ÖZ GEÇMİŞ	36

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kanca uçlu çelik lif.....	12
Şekil 3.2. Polietilen makrolif.....	13
Şekil 3.3. Çatlak ağzı açılma kontrollü test cihazı (kapalı çevrimli)	16
Şekil 4.1. Beton basınç dayanım değerleri	19
Şekil 4.2. Beton basınç dayanım testi görseli.....	20
Şekil 4.3. Beton basınç dayanım testi uygulanan numune	20
Şekil 4.4. Beton yarmada çekme dayanım değerleri grafiği	21
Şekil 4.5. Beton yarmada çekme dayanım testi görseli.....	22
Şekil 4.6. Beton yarmada çekme dayanım testi uygulanan numune.....	22
Şekil 4.7. Her bir beton numunesinin üç noktalı eğilme altındaki yük -0.50 mm'ye kadar çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri	23
Şekil 4.8. Her bir beton numunesinin üç noktalı eğilme altındaki yük- çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri	25



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri	11
Tablo 3.2. Sika viscocrete SF 18 teknik özellikleri	11
Tablo 3.3. Glenium51 teknik özellikleri.....	12
Tablo 3.4. Çelik lif teknik özellikleri	12
Tablo 3.5. Polietilen makrolif teknik özellikleri.....	13
Tablo 3.6. Kullanılan liflerin boyut ve dayanım özellikleri	13
Tablo 3.7. Üretilen betonların karışım oranları(1m ³).....	15
Tablo 4.1. Üretilen beton karışımlarının mekanik özellikleri ile kırılma parametreleri	19
Tablo 4.2. Üretilen betonların toplam serbest rötre ölçüm sonuçları.....	25



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_{lig}	:Etkin kesit alanı,(m ²)
B	:Numune kesit genişliği,(mm)
D	:Numune kesit yüksekliği, (mm)
f_{ct}	:Yarmada çekme dayanımı,(MPa)
f_{net}	:Net eğilme dayanımı,(MPa)
g	:Yer çekimi ivmesi,(m/sn ²)
G_F	:Kırılma enerjisi, (J/m ²)
L	:Mesnetlerin birbirlerine olan uzaklıkları,(mm)
L_N	:Numune kesit uzunluğu,(mm)
m	:Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı,(kg)
P	:Kırılma yükü,(N)
V_f	:Tel içeriği,(kg/m ³)
W_0	:Yük-sehim eğrisinin altındaki alan,(Nm)
δ_0	:Kirişin göçmeden önceki son sehim değeri,(m)

Kısaltmalar

ASTM	:American Society for Testing and Materials (Amerikan Deney ve Materyaller Birliği)
EN	:European Norm (Avrupa standartları)
LVDT	:Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal değişken türevsel dönüştürücü)
PET	:Polyethylene Terephthalate (Polietilentereftalat)
REF	:Referans
RILEM	:Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages (Uluslararası Laboratuvarlar ve Yapı Malzemeleri, Sistem ve Yapı Uzmanları Birliği)
s/ç	:BetonSu/ÇimentoOranı
TS	:TürkStandartlar

ÇELİK VE YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN MAKROLİF TAKVİYELİ BETONLARIN KIRILMA DAVRANIŞLARI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, çeşitli su/bağlayıcı oranlarındaki betonlarda, çelik ve yüksek yoğunluklu polietilen makro liflerin, mekanik ve kırılma özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Su/çimento oranı 0,5 olan referans betona, $3,0 \text{ kg/m}^3$ yüksek yoğunluklu polietilen makrolif eklendiğinde, betonun eğilme dayanımı %12 ve kırılma enerjisi %18 oranında artmıştır. Aynı referans betona çelik makro lif eklenmesi ile kırılma enerjisinde 40 kat artış elde edilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan betona, hacimce %1 çelik ve %1 polietilen makro lif karışımı katılması, yüksek performanslı betonun kırılma enerjisini 24 kat ve eğilme dayanımını %92 oranında artırmıştır. Bununla birlikte, su/bağlayıcı oranı 0,28 olan betona, %2 polietilen makro lif ilavesi, özgül kırılma enerjisini 14 kat ve yarmada çekme dayanımını %10 artırmıştır. Tüm lifli betonların kuruma rötresi, referans betona göre düşük bulunmuş olup, yüksek yoğunluklu makro lifler, erken yaşlarda çelik liflere kıyasla daha etkili rötire kontrolü sağlamıştır. Sonuç olarak, farklı su/bağlayıcı oranlarındaki betonlarda, yüksek yoğunluklu polietilen makro liflerin ve çelik liflerin, kırılma ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği ve kuruma rötresini azalttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik Lif, Kırılma Davranışı, Lif Takviyeli Beton, Mekanik Özellikler, Yüksek Yoğunluklu Polietilen Makro Lif.

FRACTURE BEHAVIORS OF STEEL AND HIGH DENSITY POLYETHYLENE MACRO FIBER REINFORCED CONCRETE

ABSTRACT

In this thesis study, the effects of steel and high density polyethylene macrofibers on the mechanical and fracture properties of concretes with various water/binder ratios have been investigated. When 3.0 kg/m^3 of high density polyethylene macrofiber was added to the reference concrete with a water/cement ratio of 0.5, the flexural strength of the concrete increased by 12% and the fracture energy increased by 18%. Adding steel macrofibers to the same reference concrete resulted in a 40-times increase in fracture energy. Adding a mixture of 1% steel and 1% polyethylene macrofibers by volume to concrete with a water/binder ratio of 0.35 increased the fracture energy of high performance concrete by 24 times and the flexural strength by 92%. Additionally, adding 2% polyethylene macrofibers to concrete with a water/binder ratio of 0.28 increased the fracture energy by 14 times and the splitting tensile strength by 10%. The drying shrinkage of all fiber-reinforced concretes was found to be lower compared to the reference concrete, and high density macrofibers provided more effective shrinkage control at early ages compared to steel fibers. As a result, it was determined that high density polyethylene macrofibers and steel fibers significantly improved the fracture and mechanical properties of concretes with different water/binder ratios and reduced drying shrinkage.

Keywords: Steel Fiber, Fracture Behavior, Fiber Reinforced Concrete, Mechanical Properties, High Density Polyethylene Macrofiber.

1. GİRİŞ

Günümüzde betonun farklı alanlarda kullanılmasına yönelik talep, beton teknolojisinin hızla gelişmesinin önünü açmıştır. Lif katkılı betonların üretilmesi, bu gelişmelerden birisidir.

Betonun çeşitli özelliklerini daha iyi bir konuma getirmek için farklı yöntemlerle betonun üretimi aşamasında karışıma ilave edilen farklı miktarlarda ve boy/çap oranına sahip polimerik, mineral, metalik veya doğal yapıdaki malzemeler lif (fiber) olarak ifade edilir. Lifler plastik, çelik, cam gibi farklı malzemelerden değişik tip ve boyutlarda imal edilmektedirler. ACI (Amerikan Beton Enstitüsü) komitesi 544, lif boyunun eşdeğer lif çapına bölümü sonucu ortaya çıkan “boy/çap” (aspect ratio) oranının lifin tanımlanmasındaki en iyi yöntemlerden biri olduğunu belirtmiştir (Balaguru ve Shah, 1992). Söz konusu oran, “narinlik oranı” olarak ifade edilmektedir. Ayrıca, lifi tanımlayan önemli diğer parametreler, eşdeğer lif çapı, lifin geometrik yapısı ve lifin çekme dayanımıdır. Eşdeğer lif çapı, lif kesitinin çapı olarak tanımlanır (Balaguru ve Shah,1992).

Lifle takviye edilmiş betonlar, köprüler, fabrikalar, yaya kaldırımları, hidrolik yapılar, tüneller, kanal kaplamaları, patlamaya mukavim yapılar, güvenli odalar, kalın olmayan cidarlı kaplamalar, borular vb. gibi farklı yapıları içeren uygulamalarda kullanılmaktadır (Topçu ve Boğa, 2005). Lif takviyeli betonlarda, tüm lif çeşitleri için gerekli yöntemlerin en önemlisi, beton karışımında, liflerin dağılımının homojen olmasıdır. Söz konusu dağılımın, beton karışımı son halini aldıktan sonra dahi bozulmaması da önem arz etmektedir. Liflerin homojen dağılması, beton karışımı içerisinde meydana gelmesi muhtemel çatlakları engellemekte ve çatlakların beton karışımı içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanımlı duruma getirmektedir (Kim ve diğ., 2008; Song ve Hwang, 2004; Ünal ve diğ., 2006). Liflerin kullanımının sağladığı yararlarından biri, betonda meydana gelen çatlak oluşumunun başında, çatlak sonlarında oluşan gerilmeleri karşılamaları ve sağlam bölgelere naklederek görevlerini yapmalarıdır. Ayrıca içerisine liflerin ilave edilmesi ile betonun performansında artış tespit edildiği, tokluk, kavitezyon-erozyon, yorulma, çarpma ve ilk çatlak dayanımı gibi özellikleri açısından pozitif davranış sergilemediği bilinmektedir. Bununla birlikte lifler, betonun bir çok özelliğini iyileştirmesi yanında, basınç mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olmadığı da literatürde ifade edilmiştir

(Ezeldin ve Balaguru, 1992; Ünal ve diğ., 2006). Basınç gerilmeleri liflerin görevlerinden farklı olarak beton kalitesiyle, eğilme dayanımı ve tokluk ise liflerin performansı ile doğru orantılıdır. Betonun deprem yükleri altında daha sünek hale gelmesi, betonun tokluğu ile doğru orantılıdır (Biol, 2016).

Lif takviyeli betonlar, rastgele ve homojen dağılmış, farklı malzemelerden oluşan süreksiz lifleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu tür kompozit materyaller, lif içermeyen betonlarda kullanılan bileşenler (ince/kaba agrega oranı, çimento, kimyasal ve/veya mineral katkıları) ile birlikte karışıma eklenen lifler nedeniyle, normal betonlardaki yarı gevrek davranışın değişmesine neden olurlar. Beton, zayıf çekme mukavemetine sahip bir malzeme olduğundan hem taze hem de sertleşmiş durumda birçok çatlak barındırır. Zamanla ve yüzey gerilmelerinin etkisi ile, çatlakların boyut ve şekilleri değişerek betona içerisinde ilerler, içerisinde boşluklar oluşturur. Bu da betonun ve içindeki donatının dayanıklılığında sorunlara yol açar. Süreksiz liflerin betona ilave edilmesi, çekme mukavemetini ve çekme şekil değiştirme kapasitesini artırarak, bu çatlakların oluşumunu önlemenin bir yoludur. Yeterli karıştırma ve doğru bileşen oranları ile, lifler betonda homojen bir şekilde dağılır. Taze haldeki dağılımı iyi olan lifler, plastik rötre çatlaklarının oluşumunu engeller (Shaikh ve Akbar, 2020). Ayrıca lifler, sertleşmiş betonda oluşan mikro çatlakların, makro çatlaklara evrilmesini önler. Lifler mevcut makro çatlakları köprüleyerek bir arada tutar ve betonun dağılmasını azaltır. Sonuç olarak, lif takviyeli betonlar, normal betonlara kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti, şekil değiştirme kapasitesi ve çatlak kontrolü sağlarlar.

Beton içerisine lif takviyesi amacıyla, polimer, çelik, cam, mineral ve doğal malzemeler kullanılabilir. Çelik liflerin yanı sıra, polimer liflerden polipropilen kullanımı artarken, naylon ve yüksek dayanımlı polietilen lifleri de tercih edilmektedir. Özellikle yüksek yoğunluklu polietilen liflerin, %1-1,5 oranında kullanımıyla, çoklu çatlak davranışı gösterebilen kompozitler meydana gelmektedir (Islam ve Gupta, 2016). Ayrıca, çelik liflerle birlikte hibrit (karma) olarak kullanılan bu lifler, betona üstün dayanım ve enerji sönmeme özellikleri kazandırmaktadır. Beton dökümü sırasındaki uygulama kolaylığı ve ekonomik yönden uygun olan polimer lifler, prefabrik yapılarda, betonarme temellerde ve püskürtme olarak uygulanan betonlarda giderek daha fazla kullanılmaktadır (Lee ve diğ., 2011). Polimer lifler özellikle betonda erken yaşlarda oluşan çatlakları engelleme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Makro polimer lifler, sadece plastik rötre çatlaklarının

kontrolünde değil, bununla birlikte kuruma rötresini sınırlamak için de tercih edilmektedir. Bu makro lifler, taze betonun bütünlüğünü artırarak plastik rötrec çatlaklarını kontrol etmektedir, ancak betonun total nem kaybı veya nem kaybı süratine herhangi bir etkisi bulunmamaktadır (Lawler ve diğ., 2005). Literatürdeki çalışmalar, spesifik olarak erken yaşlardaki rötrec kontrolünde, kısa makro liflere göre uzun makro liflerin daha etkin olduğunu göstermektedir (Lawler ve diğ., 2005). Sonuç olarak, beton içerisindeki lif takviyesi için çeşitli malzemeler kullanılabilmekte olup, polimer liflerin özellikle çatlak kontrolü ve rötrec önleme açısından önemli katkılar sağladığı anlaşılmaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, çelik ve yüksek yoğunluklu polietilen makro liflerin, değişen su/bağlayıcı oranlı betonlarda kullanımının, kırılma ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyerek betonarme yapıların güvenliği ve dayanıklılığının artırılmasına katkı sağlamaktır.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, lifli betonların önemli avantajlar sağladığını ve geleneksel betonlara kıyasla üstün özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle, makro lif takviyesinin betonun eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve rötrec performansını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu sayede, betonarme yapıların güvenliği ve kullanım ömrünün artırılmasına katkı sunulması hedeflenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Yapılan Literatür Çalışmaları

Çelik lif kullanımı, beton gibi kompozit malzemelerin eğilme mukavemetini arttırmada önemli katkı sağlamaktadır. Söz konusu liflerin uzunluğu, dağılımı ve yönelimi çatlak davranışını etkileyen faktörlerin içerisinde yer almaktadır. Lif aderans kuvvetleri ve lif uzunluğu arttıkça, çoklu çatlama yeteneği de artmaktadır. Bu sayede malzemenin tokluk özelliği iyileşmektedir. Ayrıca yüksek lif aderans kuvvetleri ve belirli bir kritik lif uzunluğu, kompozitin kalıcı durumdaki gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisini belirler (Li ve Leung, 1992).

Beton karışımında kullanılan çelik lifler, betonun çatlak davranışını, kırılma enerjisini, kritik çatlak uzunluğunu ve diğer kırılma parametrelerini olumlu yönde etkiler. Çeşitli beton bileşimlerine yönelik gerçekleştirilen kırılma testleri lif-matris etkileşimini dikkate alan teorik yaklaşımlar, sonlu elemanlar yöntemi ile kırılma davranışının modellenmesi konularında çözümsel yaklaşımlara destek olduğu gibi, betonun ve çelik lifli betonların kırılma davranışının anlaşılması ve performansının iyileştirilmesi konusunda önemli katkılar sağlamaktadır (Wittmann, 1983).

Çelik ve polimer liflerle hibrit olarak güçlendirilmiş betonlarda betonun kırılma enerjisi önemli ölçüde artmıştır. Çelik liflerin çatlak kontrolünde, polimer liflerin ise süneklikte daha etkili olduğu görülmüştür (Wittmann, 1983). Optimum lif kombinasyonu, %1çelik lif ve%0,5 naylon lif olarak belirlenerek gerçekleştirilen deneylerde, kırılma enerjisi tek başına çelik lifli betona göre %80 daha yüksek bulunmuştur. Liflerin homojen dağılımı, kırılma performansını önemli ölçüde artırmıştır. Segregasyon ve topaklanma gibi sorunların önlenmesi kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, çelik ve polimer liflerle yapılan hibrit güçlendirme, betonun kırılma tokluğunu önemli ölçüde geliştirmiştir. Elde edilen bulgular, optimum lif kombinasyonu ve karışım tasarımı için önemli ipuçları sunmaktadır (Banthia ve Sappakittipakorn,2007).

Lawler ve diğ., (2005) yaptıkları çalışmada, mikro ve makro lifler kullanılarak elde edilen hibrit lifli betonların mekanik ve kırılma davranışlarını araştırmışlardır. Mikro (polipropilen) ve makro (çelik) lifler farklı oranlarda kullanılarak üretilen hibrit lifli betonların eğilme dayanımı, basınç dayanımı, tokluk ve darbe direnci gibi özellikleri

deneysel olarak incelenmiştir. Hibrit lifli betonların basınç dayanımı, tek tip mikro veya makro lifli betonlara kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Eğilme dayanımı açısından, mikro lifler ile güçlendirilmiş betonlar daha iyi performans gösterirken, makro lifler ise tokluk ve darbe direncini daha çok artırmıştır. Hibrit lifli betonlarda, mikro lifler çatlak başlangıcını, makro lifler ise çatlak ilerlemesini denetleyerek sinerjik bir etki göstermiştir. Sonuçlar, mikro ve makro liflerin uygun oranlarda harmanlanmasının betonun mekanik ve kırılma davranışını önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir.

Yoo ve diğ., (2016) ultra yüksek performanslı lifli betonlarda cam lif takviyeli polimer (GFRP) ve çelik donatıların eğilme davranışına etkileri araştırmışlardır. Farklı donatı tipleri (GFRP, çelik) ve lif içerikleri kullanılarak üretilen kiriş numunelerinin eğilme performansı değerlendirilmiştir. GFRP donatılı ultra yüksek performanslı lifli beton kirişler, çelik donatılı kirişlere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı ve süneklik göstermiştir. Çelik lifler, kırılma modunu gevrek olandan sünek bir duruma kaydırarak eğilme performansını önemli ölçüde artırmıştır. GFRP donatılı kirişlerde, donatı çekme dayanımı ve lifler arasındaki sinerjik etki, eğilme dayanımını ve sünekliği önemli ölçüde iyileştirmiştir. Yazarların elde ettikleri sonuçlar, ultra yüksek performanslı lifli betonlarda GFRP donatıların, çelik donatılara göre daha uygun bir seçenek olabileceğini göstermiştir.

Bir başka çalışmada poliolefin ve çelik liflerle güçlendirilmiş betonların eğilme dayanımı, basınç dayanımı, tokluk ve darbe direnci gibi özellikleri incelenmiştir. Poliolefin ve çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar, tek başına kullanılan lifli betonlara göre daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı göstermiştir. Ayrıca, hibrit lifli betonların tokluk ve darbe direnci, tek tip lifli betonlara kıyasla önemli ölçüde artmıştır. Poliolefin lifler, çatlak oluşumu ve çatlak kontrolünde, çelik lifler ise çatlak yayılımının engellenmesinde daha etkili olmuştur. Lif kombinasyonu, liflerin sinerjik etkisiyle betonun mekanik özelliklerini belirgin şekilde iyileştirmiştir. Yazarlar hem poliolefin hem de çelik liflerin uygun oranlarda kullanımının, lifli betonların dayanım ve tokluk performansını artırmada etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir (Alberti ve diğ.,2017).

Shaikh ve Akbar, (2020)'ın gerçekleştirdikleri çalışmanın amacı, çelik ve polipropilen liflerle güçlendirilmiş jeopolimer betonların darbe dayanımını araştırmaktır. Farklı lif

tipleri (çelik, polipropilen) ve içerikleri kullanılarak üretilen jeopolimer beton numunelerinin darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve enerji sönümlene kapasitesi deneysel olarak incelenmiştir. Çelik lifli jeopolimer betonlar, lif içermeyen referans numuneye kıyasla darbe dayanımında %150'ye varan artışlar göstermiştir. Polipropilen lifli jeopolimer betonların darbe dayanımında referans numuneye göre %70 daha yüksek bulunmuştur. Çelik lifler, kırılma tokluğu ve enerji sönümlene kapasitesini daha çok artırırken, polipropilen lifler ise süneklik performansını daha çok geliştirmiştir. Lif kombinasyonu, lifler arasındaki sinerjik etki sayesinde jeopolimer betonların darbe dayanımını daha da artırmıştır.

Islam ve Gupta, (2016), polipropilen lifli betonlarda plastik rötre ve geçirimsizliğin azaltılması üzerindeki etkileri araştırmayı amaçlamışlardır. Farklı oranlarda polipropilen lifler kullanılarak üretilen beton numunelerinin plastik rötre ve su geçirimsizliği, deneysel olarak incelenmiştir. Polipropilen lif ilavesi, betonların plastik rötresini önemli ölçüde azaltmıştır. En düşük plastik rötre, hacimce %0,3 lif içeren numunelerde gözlenmiştir. Lif ilavesi, betondaki kapiler boşluk ağının yapısını değiştirerek, su geçirimsizliğinde azalmaya neden olmuştur. En düşük su geçirimsizliği, hacimce %0,6 oranında polipropilen lif içeren numunelerde elde edilmiştir. Polipropilen liflerin, plastik rötre ve geçirimsizliği azaltmada etkili olduğu, özellikle erken yaşlarda daha belirgin bir fark yarattığı belirlenmiştir.

Kim ve diğ., (2008), farklı elyaf tipleri (çelik, karbon, cam, polipropilen) kullanılarak üretilen lifli betonlar ile yaptıkları çalışmada eğilme davranışını karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışma kapsamında, çeşitli lif özellikleri ve içerikleri kullanılan karışımların eğilme dayanımı, tokluk ve enerji yutma kapasitesi gibi özellikler değerlendirilmiştir. Çelik lifli betonlar, en yüksek eğilme dayanımı ve tokluk değerlerine sahip olmuştur. Karbon lifli betonlar, çelik liflilerle benzer eğilme dayanımı gösterirken, daha düşük tokluk değerleri sergilemiştir. Cam lifli betonlar, çelik ve karbon lifli betonlara kıyasla daha düşük eğilme dayanımı ve tokluk değerleri vermiştir. Polipropilen lifli betonlar, diğer lif türlerine göre en düşük eğilme dayanımı ve tokluk değerlerine sahip olmuştur. Lif tipleri arasındaki performans farkları, liflerin çekme dayanımı, çekme modülü ve beton-lif aderansı gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Sonuçlar, lifli betonların eğilme davranışı ve enerji yutma kapasitesinin lif özelliklerine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Silis dumanı katkılı reaktif pudra betonlarında çelik lif-beton aderansının incelendiği bir çalışmada, silis

dumanı ilavesi, reaktif pudra betonlarında çelik lif-beton aderansını önemli ölçüde artırmıştır (Chan ve Chu, 2004). Silis dumanı oranı arttıkça, çelik liflerin çekme bağ dayanımı da doğrusal olarak yükselmiştir. Silis dumanı, beton matrisinin mikro yapısını iyileştirerek, liflerin daha etkin bir şekilde aderansını sağlamıştır. Artan aderans sayesinde, çelik lifli reaktif pudra betonlarda daha yüksek çekme dayanımı ve tokluk değerleri elde edilmiştir (Chan ve Chu, 2004).

Beton numunelerindeki büzülme olayına rötire adı verilir. Bunun nedeni, çimento esaslı malzemede meydana gelen hacim azalmasıdır. Rötrenin oluşum sebepleri arasında, beton içerisindeki suyun buharlaşması veya hidrasyon ürünlerinin suyu tutması yer almaktadır. Betondaki serbest su ilk olarak kaybolur, daha sonra emilmiş su da beton bünyesinden ayrılmaya başlar. Bu su kaybı, betonda çekme gerilmeleri oluşturarak büzülmeye neden olur. Beton karışım tasarımı, kür koşulları, çevresel faktörler ve geometri rötreyi etkileyen unsurlar olarak gösterilmiştir (Neville,1981).

Serbest beton numuneleri kuruma sırasında rötire yaparken, kısıtlanmış beton elemanlarında çekme gerilmeleri oluşur. Betonun çekme dayanımının düşük olması, rötire nedeniyle oluşan çekme gerilmelerinin çatlak oluşumuna yol açmasına neden olur (Shah ve diğ.,1998). Çatlaklar, beton mekanizmasında kusurlar oluşturarak yük taşıma kapasitesini azaltır ve korozyon, sülfat etkisi, alkali-silis reaksiyonu gibi problemlere de yol açabilir. Tüm bu faktörler, beton elemanlarının hizmet ömrünü kısaltarak dayanıklılık sorunlarına yol açmaktadır (Almudaiheim ve Hansen,1987). Rötire olayının çeşitleri mevcuttur ve birçok literatür çalışmasında bu çeşitler incelenmiştir.

Plastik rötire, betonun sertleşme aşamasından önce meydana gelen nem kaybıdır. Eğer beton yüzeyindeki suyun buharlaşma hızı, beton içindeki suyun yüzeye ulaşma hızından daha yüksekse, beton yüzeyi kurumaya, yüzey gerilmeleri artmaya ve büzülme meydana gelmeye başlar. Altındaki beton, üstteki çekme gerilmelerine uyum sağlayamaz ve betonun düşük çekme gerilme kapasitesi nedeniyle çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar, plastik rötire çatlakları olarak adlandırılır ve genellikle 2-3 mm aralığında gözlemlenir. Çatlakların derinliği arttıkça genişlikleri azalmaya başlar, ancak 10 mm'yi geçmezler ve tüm numune boyunca devam ederler. Plastik rötire oluşum mekanizması, bu çatlakların tüm derinlikte devam etmesini tam olarak açıklayamamaktadır (Pelisser ve diğ., 2010). Bu ilerlemenin nedenleri, kuruma rötresi

veya sonraki yüklemeler ile ilişkilendirilebilir. Plastik rötre çatlaklarının oluşmasına neden olan beton yüzeyindeki suyun hızlı buharlaşması, rüzgar hızının yüksek olması, düşük bağıl nem ve sıcaklığın yüksekliği beton dökümü ile açığa çıkan yüksek hidrasyon sıcaklıkları gibi faktörlere bağlıdır. Bu etkenlerden herhangi birinin değerindeki yükselme, plastik rötrede kaynaklanan çatlakların meydana gelmesini hızlandırır. Sentetik özellikli liflerin karışımında kullanılması, hem erken hem de daha sonraki yaşlardaki çatlakları önleyebilen bir yöntemdir (Chavooshi ve Madhoushi, 2013).

Kuruma rötresi, betondaki kurumunun etkisiyle oluşan beton hacminde meydana gelen değişiktir. Yük altında bulunmayan örneklerde, sabit sıcaklık altında ölçülen zamana bağlı lineer deformasyon, kuruma rötresi olarak tanımlanmaktadır. Geri dönen olarak adlandırılan kuruma rötresi, kuruma ve ıslanma çevrimlerinin arasında meydana gelen rötrenin bir kısmına verilen isimdir. Buna karşılık, geri dönmeyen kuruma rötresi, birinci kuruma çevrimi esnasındaki total kuruma rötresinin parçası olup, daha sonraki ıslanma-kuruma çevrimleri sırasında tekrar oluşmaz (Mehta ve Monteiro, 2006). Geri dönmeyen kuruma rötresinin nedeni, kalsiyum silikat hidratlar ve farklı hidrate ürünlerin meydana gelmesidir. Bahse konu rötre, betonda çatlak meydana gelmesine yol açar. Kısıtlanmış elemanların oluşturduğu çekme gerilmeleri, çatlaklara tesir eder ve sünme, elastisite modülü ile betonun çekme gerilmesi doğrultusunda değişir (Suzuki ve diğ.,1993).

Beton karışımında bulunan çimento ve su, reaksiyona girer ve hidrasyon sonucunda su miktarı azalır, bunun sonucunda rötre ortaya çıkar. Otojen rötre, kılcal boşluklardaki suyun çimento ile reaksiyona girmesiyle meydana gelen hidrasyona bağlı olarak kaybedilmesi olarak tanımlanmaktadır (Holtve Janssen, 1998). Otojen rötre, hidrasyon reaksiyonunun doğasında var olduğundan tamamen engellenememektedir. Diğer rötre türlerine kıyasla miktarında görece daha az gerçekleşir. Otojen rötrenin meydana gelmesi, nem miktarının değişmemesi veya az olması ile ilişkilendirilir ve betonun iç yapısına önemli tesirleri vardır. Otojen rötreyi arttıran etmenler, yüksek miktarda kullanılan çimento ve yüksek sıcaklıktır.

Hidrasyon neticesinde oluşan ısı, minimal yapılarda hızlı bir şekilde dağılırken, büyük yapılarda dağılması daha uzun sürer. Bu fazladan ısının dağılması, malzeme özelliklerinin gelişimini hızlandırmasında etkili olduğu gibi, betonun sıcaklığının

yüksek kalmasına da sebep olur. Beton ya da çimento karışımı, kuruma sürecine başladığında, iç sıcaklığı bağlı, orantısal bir şekilde büzölmeye başlar. Beton içindeki sıcaklık farkları çatlakların oluşmasına neden olur. Mevsimlere bağlı ve hatta günlük sıcaklık farkları dahi, termal rötre oluşumuna neden olabilmektedir (Akçay, 2007).

Karbonatlaşma rötresi, betondaki hidrate olmuş çimentonun atmosfer içindeki karbondioksitle reaksiyona girmesi sonucunda yavaş yavaş meydana gelir. Bağlı nemin %50 civarına gelmesi ve beton üzerindeki kuruma-ıslanma çevrimine uğraması, karbonatlaşma rötresinin oldukça yüksek seviyelere ulaşmasına neden olabilir. Karbonatlaşma, genelde bir dayanıklılık (durabilite) sorunu olarak görölmekte ve etkileri yıllar sonrasında meydana gelmektedir (Weiss, 1999).

Lifli betonların rötreye etkisi incelendiğinde, çelik lifler ve polimer lifler karşılaştırıldığında, mekanik özelliklere göre çelik lifler daha üstün durumdadır. Buna karşın, polimer özellikli liflerin ise plastik rötre yönünden daha tesirli olduğu görölmektedir. Polimer özellikli lifler, betonun enerjiyi absorbe etme kapasitesini arttırsa da bu özellik çelik liflerle karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görölmektedir. Polimer liflerin betondaki en belirgin etkisi, özellikle rötre çatlaklarını önlemeleridir. Liflerin beton içindeki dağılımının homojen olması, betonun her tarafında aynı etkinin görölməsi ve tüm bölgelerdeki çatlakların engellenmesi açısından önemlidir. Lif dağılımının homojen olması, taze betonda plastik rötre üzerinde olumlu etki sağlarken, sertleşmiş betonda ise mikro çatlakların ilerleyerek makro boyutlara ulaşmasının önüne geçer. Ayrıca, var olan makro çatlaklar üzerinde köprüleme yaparak betonun dağılmasını önler. Bu bakış açısıyla, polimer lifler, beton karışımı sırasında yeterli dağılım yeteneğine sahiptir, priz öncesi ve sonrasında beton özelliklerine olumlu etkisi olduğu değerlendirilir (Acun, 2000).

Bu tez çalışması, literatürdeki aşağıdaki boşlukları doldurmayı amaçlamaktadır:

- Literatürde genellikle tek bir lif tipi veya farklı lif kombinasyonlarının etkisi araştırılmıştır. Ancak bu çalışma hem çelik hem de polietilen makro liflerin farklı su/bağlayıcı oranlı betonlardaki performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirmektedir.
- Çalışma, betonların eğilme dayanımı ve kırılma enerjisindeki artışları nicel olarak ortaya koymuştur. Bu, lifli betonların kırılma davranışının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

- Literatürde daha az çalışılan bir konu olan lifli betonların serbest rötre davranışı, bu çalışmada detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle yüksek yoğunluklu makro liflerin rötreyi azaltmadaki etkisi vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, farklı su/bağlayıcı oranlı betonlarda makro lif kullanımının hem mekanik hem de kırılma ve rötre özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde araştırarak, literatürdeki bir boşluğu doldurma potansiyeline sahiptir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Çimento

Bu çalışmada, Nuh Çimento Üretim Tesisinde, TS EN 197-1:2012 standartlarında imal edilen CEM - I - 42,5 R çimento malzemesi kullanılmıştır. İmalatçıdan edinilen bilgiler doğrultusunda çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1.'de sunulmuştur.

Tablo 3.1.Kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık	3140,0 kg/m ³								
Özgül Yüzey	3420,0 cm ² /g								
Priz (Başlangıç)	179 dakika								
Priz (Son)	200 dakika								
Hacim Sabitliği (Le Chatelier)	1,050 mm								
7 Günlük Basınç Mukavemeti	47,50 MPa								
28 Günlük Basınç Mukavemeti	58,10 MPa								
Minerolojik Bileşim (%)									
C3S	C2S	C3A	C4AF						
63,17	10,46	5,99	11,43						
Kimyasal Bileşim (%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Çözünmeyen Kalıntı	Kızdırma Kaybı	Serbest Kireç	Toplam Alkali
22,10	4,37	3,30	65,63	1,20	2,62	0,68	2,64	1,25	0,58

3.2. Akışkanlaştırıcı Katkı

Akışkanlaştırıcı olarak kullanılan katkı maddeleri, performansı yüksek Sika Viskocrete SF18 üçüncü nesil süper akışkanlaştırıcı ve Glenium 51 polikarboksilat içeren süper akışkanlaştırıcılardır. Söz konusu katkılara yönelik teknik özellikler Tablo 3.2. ve Tablo 3.3.'de sunulmuştur.

Tablo 3.2.SikaViscocrete SF 18 teknik özellikleri

Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Densite	1,10+0,02kg/l,20°C
pH	3-7
Donma Noktası	-10°C
Klorür Yüzdesi	Maksimum 0,1%, klorür içermez

Tablo 3.3.Glenium51 teknik özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Renk	Amber
Densite	1,082–1,142kg/litre
Klor Muhteviyatı % (EN480-10)	<0,1
Alkali Muhteviyatı % (EN480-12)	<3

3.3. Çelik Lif

Karışımlarda kullanılan çelik lif teknik özellikleri Tablo 3.4.'te sunulmuştur.

Tablo 3.4.Çelik lif teknik özellikleri

Uzunluk	Çap	Çekme Mukavemeti
60 mm	0,90 mm	1100 MPa



Şekil 3.1. Kanca uçlu çelik lif

3.4. PolimerLif

Karışımlarda kullanılan polietilen makro lif özellikleri Tablo 3.5.'te sunulmuştur.

Tablo 3.5.Polietilen makrolif teknik özellikleri

Yoğunluk	Uzunluk	Çap	Çekme Mukavemeti
0,91 g/cm ³	60 mm	0,90 mm	2000 MPa



Şekil 3.2.Polietilen makrolif

Tablo 3.6. Kullanılan liflerin boyut ve dayanım özellikleri

	Çelik lif	Yüksek yoğunluklu polietilen lif
Boy (L) (mm)	60	60
Çap (d) (mm)	0,9	0,9
Çekme dayanımı (N/mm ²)	1100	2000

3.5. Agrega

Karışımlarda, kuvarz kumu ile kireçtaşı orijinli kırma taşlar kullanılmıştır. Yıkanarak görece küçük danelerden arındırılmış kırma taş, doğal kum ve kırma kumun birim ağırlıkları, doymun yüzey kurusu halde sırasıyla 2720, 2400 ve 2610 kg/m³, emdikleri su değerleri ise %1,1, %2,1 ve %1,2 olarak tespit edilmiştir (ASTM C127 -C128., 1994).

3.6. Metakaolin

Kaolin olarak adlandırılan doğal kilin, yüksek sıcaklıklarda (600-800°C) yakılarak toz haline getirilmesi neticesinde meydana gelen ürün Metakaolin olarak adlandırılır. Gerçekleştirilen ısıtma işlemi, kaolinin yapısından organik maddeleri ve kristal suyunu ayrıştırarak amorf olmasını sağlar. Metakaolin, ısıtma işlemi sonucu ortaya çıkan bir yan ürün olmasından dolayı çevre dostu olarak kabul edilir. Ayrıca, sıcaklık dayanımı, mukavemet, reaktivite açısından yüksek olması ve porozitesinin düşük olmasından dolayı seramik, boya, beton, cam gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Mineralin çimento ile hidrasyonu esnasında meydana gelen kimyasal tepkimelerin derecesi puzolanik reaktivite olarak adlandırılır. Metakaolinin puzolanik özellikleri olmasından dolayı hidrasyonu sırasında göstermiş olduğu puzolanik reaktivite neticesinde betonun dayanımı artar.

Metakaolin, yüksek saflıkta alüminyum silikat minerallerinin kalsinasyonu ile üretilir. İdeal olarak, metakaolinin alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) içeriği yüksek olmalıdır. Bu deneysel çalışmada üretilen karışımlarda kullanılan metakaolin, beyaz renkte, nem oranı düşük ve en az %90 oranında $SiO_2 + Al_2O_3$ içermektedir. Kullanılan metakaolinin yoğunluğu $2,50 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir.

3.7. Karışım Oranları

Bu tez çalışmasında, 5 farklı beton karışımı hazırlanmış ve bu betonlarda, CEM 42,5R çimentosu kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,35 ve 0,28 olan beton numunelerinde, yüksek performansa ulaşmak için çimentonun ağırlıkça %16'sı metakaolin ile değiştirilmiştir. Taze betonların işlenebilirliğini, lif içermeyen referans beton ile benzer olabilmesi için, polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Beton karışım özellikleri Tablo 3.7'de verilen kanca uçlu çelik liflerin (Şekil 3.1) ile birlikte yüksek yoğunluklu ($1,1 \text{ g/cm}^3$) polietilen makro lifler (Şekil 3.2) kullanılmıştır.

Referans betona (Su/çimento oranı 0,50), 20 kg/m^3 (%0,26) çelik makro lif ve 3 kg/m^3 (%0,33) yüksek yoğunluklu polietilen makro lif ayrı ayrı eklenmiştir. Bu lif miktarları endüstride yaygın olarak kullanılan oranlardır. Yüksek performanslı betonlarda makro liflerin etkisini belirleyebilmek için, çimento ağırlığının %16'sı metakaolin içeren

betona (su/bağlayıcı oranı 0,35), hacimce %1 çelik ve %1 polietilen makro lif karışımı eklenmiştir. Son olarak, çimento ağırlığının %16'sı metakaolin içeren beton serisi (su/bağlayıcı oranı 0.28), %2 oranında polietilen makro lif ile takviye edilmiştir. Böylece yalnızca polietilen lifler kullanılarak benzer beton özelliklerinin su/bağlayıcı oranının azaltılmasıyla elde edilip edilemeyeceği incelenmiştir. Sonuç olarak, farklı su/bağlayıcı oranlı ve metakaolin katkılı betonlarda, yüksek yoğunluklu polietilen makro lif ve çelik liflerin çeşitli oranlarda kullanımı, mekanik ve kırılma özelliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir. İmal edilen beton numunelerin karışım oranları Tablo 3.7.'de sunulmuştur.

Tablo 3.7. Üretilen betonların karışım oranları (1m³)

Beton içeriği	REF 0,50	0,50 20kg/m ³ (%0,26) st	0,50 3kg/m ³ (%0,33) PE	0,35 1% st+1%PE	0,28 2%PE
Beton Kodu	N	NS	NP	YSP	CYP
Çimento (kg)	421	444	440	424	459
Su (kg)	210	222	220	176	153
Metakaolin (kg)	0	0	0	81	87
Doğal Kum (kg)	341	359	357	325	331
Kırma Kum (kg)	601	634	629	573	583
Kırma Taş (kg)	773	815	809	737	750
Çelik lif (kg)	0	20	0	73	0
Polietilen lif (kg)	0	0	3,07	8,49	17,28
Kimyasal Katkı (kg)	6,89	8,99	9,63	31,92	34,99
Hava (%)	14,01	37,40	30,15	32,04	29,65
Birim ağı. (kg/m ³)	2352	2459	2442	2322	2336

Beton imalatında, öncelikle çimento ve varsa metakaolin kuru olarak karıştırılmıştır. Sonrasında agregalar eklenerek, birlikte karıştırılmaya devam edilmiştir. Ardından, suyun ve süper akışkanlaştırıcının yarısı eklenmiş ve karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Süper akışkanlaştırıcının kalan kısmı ise, homojenliği sağlamak amacıyla, kademeli olarak ilave edilmiştir. Lifler, karışım içerisinde düzgün bir dağılım sağlayacak şekilde eklenmiş ve karıştırma işlemine devam edilmiştir. Tüm beton karışımlarında, yayılma deneyi sonuçlarının benzer olması (43±2 cm) için, süper akışkanlaştırıcı miktarı ayarlanmıştır.

3.8. Çatlak Ağız Açılma Kontrollü Test Cihazı (Kapalı Çevrimli)

Çatlak Ağız Açılma Kontrollü Test Cihazı (Kapalı Çevrimli), 100 kN kapasiteli olup,

farklı boyut ve özellikleri ihtiva eden beton kiriş, beton terrazo karo, beton veya doğal taş bordür, beton zemin döşemesi ve doğal kaplama taşı eğilme deneyleri, beton numunelerde yarmada çekme deneylerinde kullanılmaktadır. Deneyler sırasında kullanılan test cihazı görseli Şekil 3.3.' te sunulmuştur.



Şekil 3.3.Çatlak ağzı açılma kontrollü test cihazı (kapalı çevrimli)

3.9. Sehim Ölçer (LVDT)

100×100×500 mm boyutundaki prizmalarda yük altında oluşan sehim miktarını 0,01 mm hassasiyetle ölçmek için kullanılan cihazdır.

3.10. Çatlak Ağzı Açılma Ölçer (CMOD)

100×100×500 mm boyutundaki prizmalarda önceden oluşturulan çentik içerisine yerleştirilerek yük altında oluşan sehim neticesinde çatlak genişliğini ölçmek amacıyla kullanılmaktadır.

3.11. Deney Düzenekleri

Yapılan deney çalışması için farklı karışım oranlarında 100×100×500 mm boyutlarında toplam 20 adet prizma numune hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken

karıştırma aracı olarak betonyer kullanılmıştır. Karışım hazırlanırken kuru malzemeler karıştırıldıktan sonra su, homojen bir karışım elde edebilmek için kuru karışıma ilave edilmiştir. Deneyde kullanılan çelik ve polimer lifler, suyun ve akışkanlaştırıcının hepsi karışıma ilave edildikten sonra eklenmiştir. Hazırlanan her beton numuneye, kalıp içerisine yerleştirilmeden önce Birim Hacim Ağırlık Deneyi uygulanmıştır. Tüm deney grupları, kalıplardan, yerleştirilmelerinin üzerinden 24 saat geçtikten sonra çıkarılmıştır. Tüm numuneler, kirece doymuş ve sıcaklığı 20°C olan su tanklarında, standart olarak uygulanan kür işlemine tabii tutulmuştur.

Eğilme deneyinde kullanılan söz konusu numuneler, sonrasında 100×100×100 mm boyutlarında kesilerek, 25 adet numune üzerinde beton basınç dayanımı testi, 25 adet numune üzerinde ise beton yarmada çekme dayanımı testi uygulanmıştır.

Kırılma enerjisini belirlemek için uygulanan deneyler RILEM 50-FMC Teknik Komitesinin önerileri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. (RILEM Technical Committee50-FMC,1985). Standartlarda belirlenen 50 mm'lik çentiğin yerine, etkin alanda daha fazla iri agrega içermesinin sağlanması amacıyla, kiriş numuneleri, elmas testere yardımıyla kesilmesi neticesinde 40 mm derinliğinde çentik oluşturulmuş ve faydalı kesit alanı 60×100 mm olarak belirlenmiştir. Kiriş numunelerin eğilme deneyleri, kapasitesi 100 kN (max) olan çatlak ağzı açılma kontrollü test cihazı (kapalı çevrimli) ile gerçekleştirilmiştir. Kirişin orta noktasına yerleştirilen LVDT ve CMOD cihazları ile sırasıyla kiriş ortası sehim ve çatlak ağzı açılması ölçülmüş, örnekler için yük-çatlak açılması ve yük-sehim eğrileri çizilmiştir.

Kırılma enerjisinin değeri aşağıdaki denklem (3.1.) ile hesaplanmıştır.

$$G_f = \frac{W_0 + mg \delta_0}{A_{lig.}}, \text{ N/m} \quad (3.1.)$$

Denklemden yük-sehim eğrisinin altında kalan alan W_0 , yerçekimi ivmesi g , göçme esnasında kiriş ortasında meydana gelen sehim δ_0 , etkin kesit alanı ise A_{lig} olarak gösterilmektedir. m ise deneyde kullanılan numunenin mesnet noktaları arasındaki bölümünün ağırlığı (m_1) ile test aletine bağlı olmayan yükleme kısmının ağırlığına (m_2) bağlı hesap edilir.

Kiriş numunelerden net eğilme mukavemeti, silindir ($\text{Ø}100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$) numunelerden elastisite modülü ve basınç mukavemeti, kırılan kiriş parçalarından ise yarma çekme mukavemeti belirlenmiştir. Gerçekleştirilen mekanik deneyler, numunelerin puzolan içermesi nedeniyle 50 günün ardından gerçekleştirilmiştir.

Betonda Rötrenin Belirlenmesi:

Üretilen $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}$ boyutundaki prizmalarda lineer ölçümler ile kuruma rötresi de tespit edilmiştir. Kalıptan çıkarılan örneklere çelik pimler yapıştırılarak, $0,0010(\text{mm/m})$ hassasiyetinde (ASTM C41'e göre) boy değişimleri ölçülmüş ve her seri için 2 prizma ortalaması kullanılmıştır. Sonuç olarak hem mekanik hem de rötre özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

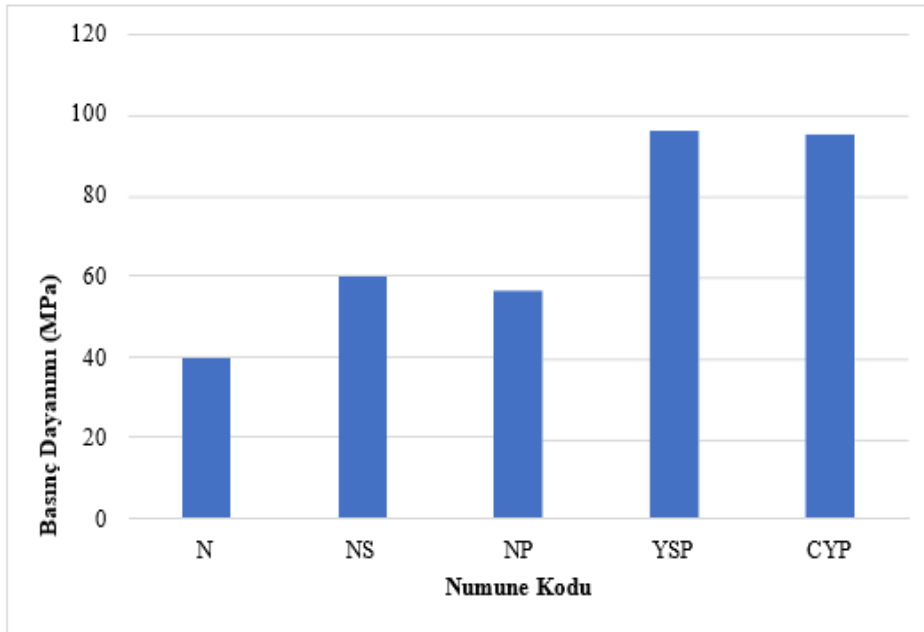
Testi gerçekleştirilen beton numunelerinin kırılma parametrelerinin ortalama değerleri ile mekanik özellikleri Tablo 4.1.'de sunulmuştur. Beton numunelerin tamamında lif kullanımının mekanik dayanımlarını artırdığı görülmektedir.

Tablo 4.1. Üretilen beton karışımlarının mekanik özellikleri ile kırılma parametreleri.

Beton	f_c , MPa	W_0 , Nmm	G_F , N/m	δ_0 , mm	f_b , MPa	f_{st} , MPa
N	44,9	214,2	35,7	0,37	5,0	7,6
NS	65	8311,2	1385,2	12,75	4,9	8,2
NP	56,6	253,2	42,2	2,63	5,6	7,7
YSP	96,1	9995,5	1665,9	4,51	11,3	11,7
CYP	95,2	5202,4	867,1	16,19	4,7	7,8

Beton Basınç Dayanım Testi:

100×100×100 mm boyutlarında hazırlanan numunelerle yapılan basınç dayanımı sonuçları Ek-A'da sunulmuştur. Şekil 4.1.'deki grafikte en yüksek basınç dayanımının çelik ve polimer makro lif takviyeli YSP betonuna ait olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Beton basınç dayanım değerleri



Şekil 4.2.Beton basınç dayanım testi görseli



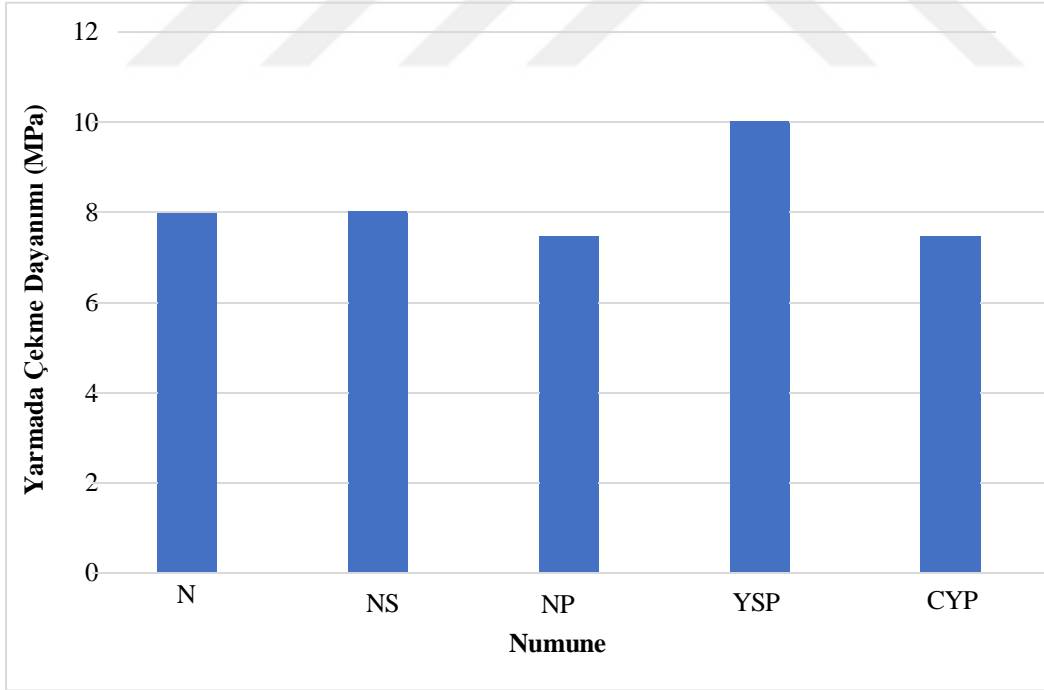
Şekil 4.3.Beton basınç dayanım testi uygulanan numune

Liflerin eklenmesi için, taze beton özelliklerinin benzer olması gerekmektedir. Bu nedenle, lif içeren karışımlarda yüksek oranda süper akışkanlaştırıcı kullanılmış, böylece boşluk miktarları düşük tutulmuştur. Sonuç olarak, üretilen betonların tamamı yüksek basınç mukavemetine ulaşmışlardır. Elde edilen sonuç, su/bağlayıcı oranı 0,5

olan referans(N) serisine çelik lif katıldığında (NS kodlu beton) daha net görülmektedir. Süperakışkanlaştırıcı kullanım miktarının artırılması, Tablo 3.5.'te görüldüğü gibi, beton birim ağırlığında da bir artışa yol açmıştır. Ayrıca, Tablo 4.1.'deki veriler, bu durumun basınç dayanımını da yükselttiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, beton işlenebilirliğinin, beton kalitesi üzerindeki tesirini bir kez daha kanıtlamaktadır.

Beton Yarmada Çekme Dayanımı Testi:

100×100×100 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılan beton yarmada çekme dayanımı testinin sonuçları Ek-B' de sunulmuştur. Şekil 4.4.'te sunulan grafikte en yüksek beton yarmada çekme dayanımı değerlerinin çelik ve polimer makro lif takviyeli YSP betonuna ait olduğu görülmektedir. Diğer numunelerin ise birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Sonuç olarak çelik ve polimer makro liflerin beraber kullanımının yarmada çekme dayanımını arttırdığı gibi sadece çelik lif ya da sadece polietilen makro lif kullanılan betonlarla kıyaslandığında daha iyi sonuç verdiği de görülmektedir.



Şekil 4.4.Beton yarmada çekme dayanım değerleri grafiği



Şekil 4.5. Beton yarmada çekme dayanım testi görseli



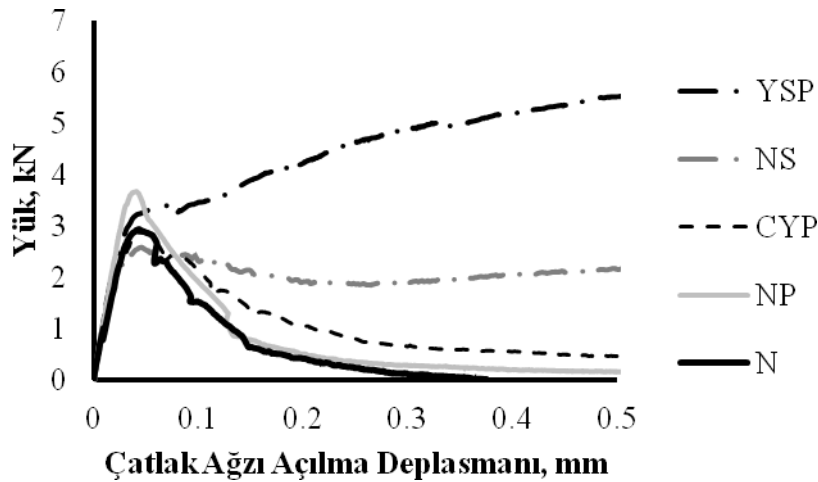
Şekil 4.6. Beton yarmada çekme dayanım testi uygulanan numune

Su/bağlayıcı oranı 0,5 olan betonda, çelik lif ilavesinin, polietilen lif ilavesine kıyasla

daha yüksek yarmada çekme dayanımı neticeleri verdiği Tablo 4.1.'de görülmüştür. Özetle, taze betonun işlenebilirliğinin iyileştirilmesi için gerekli olan süper akışkanlaştırıcı miktarındaki artış, betonun birim ağırlığı ve basınç dayanımını arttırmıştır. Ayrıca, çelik liflerin polietilen liflere nazaran daha yüksek yarmada çekme mukavemeti sağladığı anlaşılmaktadır.

Beton Eğilme Dayanımı Testi:

Tüm beton serileri için seçilen örnekler üzerinde gerçekleştirilen deneyler neticesinde, farklı türdeki ve miktardaki liflerin, yük-çatlak ağzı açılması eğrilerine değişen su/bağlayıcı oranlı betonların etkisi incelenmiştir. Söz konusu eğrilerin çatlak ağzı açılma değeri 0,50 mm'ye kadar olan kısmı Şekil 4.7.'de sunulmuştur. Su/çimento oranı 0,5olanreferans betonunda (N), çatlak ağzı açılmasının son değeri 0,37 mm olduğunda, polietilen lif muhteva eden betonda (NP), bu değer 2,63 mm olarak bulunmuştur. Yani, polietilen lif ilavesiyle çatlak ağzı açılması ve dolayısıyla sehim yapabilme kapasitesi 7 kat artmıştır. Buna karşın, aynı su/çimento oranındaki çelik lif katkılı (NS) betonda, çatlak ağzı açılması yaklaşık 35 kat daha yüksek olmuştur. Ayrıca, su/bağlayıcı oranı 0,5 olan betonlarda, kullanılan çelik lif, maksimum yükte önemli bir değişikliğe yol açmazken, polietilen lif eklenmesi ile eğilme dayanımı %12 artmıştır (Tablo 4.1.). Bununla birlikte, çelik lif kullanımı durumunda, maksimum yük sonrası eğrinin daha yavaş azalması, kırılma enerjisinin belirgin ölçüde arttığını göstermiştir. Özetle, liflerin türü ve miktarı, su/bağlayıcı oranına bağlı olarak, betonun sehim ve kırılma davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil 4.7. Her bir beton numunesinin üç noktalı eğilme altındaki yük - 0.50mm'ye kadar çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri.

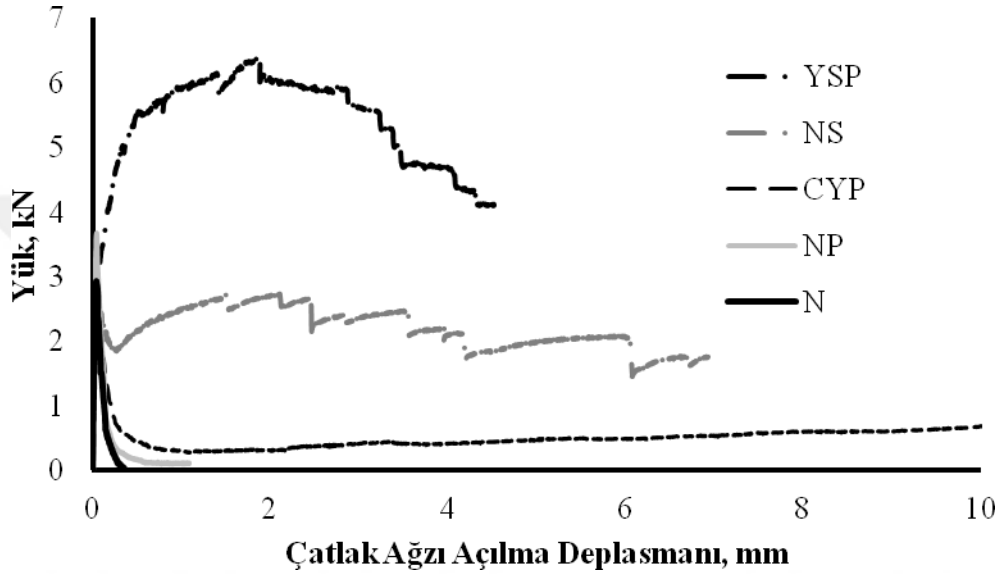
Üretilen beton örneklerinin yük-çatlak ağzı açılma eğrilerinin 10 mm'ye kadar olan kısmı Şekil 4.8'de verilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan YSP serisinde, çelik ve polietilen lifin birlikte kullanılması, diğer serilere kıyasla tepe yükünün çok daha yüksek gözlenmesine neden olmuştur. Öte yandan, %2 polietilen lif içeren ve su/bağlayıcı oranı 0,28 olan CYP serisinde ise, çatlak ağzı açılma deplasmanının belirgin olarak arttığı gözlemlenmiştir. Kısacası, farklı su/bağlayıcı oranlı betonlarda, karma lif kullanımı (YSP serisi) yüksek bir tepe yüküne, tek başına polietilen lif kullanımı ise (CYP serisi) önemli bir çatlak ağzı açılmasına neden olmuştur. Bu sonuçlar, su/bağlayıcı oranı ve lif türü-miktarı gibi parametrelerin, betonun yük-çatlak açılma davranışı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Daha önceki bir çalışmada YSP ve CYP serilerinin yalın betonlarının özellikleri incelenmiştir (Akçay ve diğ., 2016). Buna göre, yalın YSP betonunun özgül kırılma enerjisi 65,7 N/m, eğilme dayanımı 5,9 MPa olarak belirlenmiştir. Yalın CYP betonunun ise özgül kırılma enerjisi 58 N/m, eğilme dayanımı 6,6 MPa olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, eğilme deneyinde kırılan kiriş parçalarından ölçülen yarma çekme dayanımları, YSP ve CYP için sırasıyla 6,8 ve 7,1 MPa bulunmuştur. Bu çalışmada ise, YSP serisi için hibrit makro lif kullanımı, özgül kırılma enerjisini 24 kat, eğilme dayanımını %92 oranında artırmıştır. Bununla birlikte, su/bağlayıcı oranı 0,28 olan CYP serisinde, toplamda %2 lif hacmi kullanılmasına rağmen, tamamının polietilen makro lif olması, yalın betonuna kıyasla özgül kırılma enerjisini 14 kat yükseltmiş, yarmada çekme dayanımını da %10 iyileştirmiştir. Sonuç olarak, önceki çalışmalarda elde edilen yalın beton özellikleri ile karşılaştırıldığında, bu çalışmada kullanılan lif takviyeli betonların, mekanik ve kırılma davranışlarının önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür.

Rötre:

Her bir beton numunesinde, önceden de ifade edildiği üzere, serbest rötre ölçümleri yapılarak, elde edilen sonuçlar Tablo 4.2.'de sunulmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0,5 olan betonlarda, lif eklenmesi ile kuruma rötresi azalmış ve bu etki, polietilen makro lif kullanılan numunelerde daha belirgin olduğu görülmüştür. Toplam serbest rötre miktarı artması, su/bağlayıcı oranı azalmasıyla doğru orantılıdır. Beton karışımındaki su miktarının azalmasına mukabil, sertleşmiş çimento hamurundaki boşlukların küçülmesiyle, ortamdan ayrılan suyun rötre üzerindeki tesiri daha baskın hale

gelmiştir. Yüksek dayanımlı söz konusu betonlarda da lif kullanımı sayesinde kuruma rötresinin büyüklüğü azalmıştır. Özellikle, erken yaşlarda rötre kontrolünde, yüksek yoğunluklu makro liflerin, çelik liflere kıyasla daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Özet olarak, su/bağlayıcı oranı ve lif türü-miktarı, betonun serbest rötre davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Polietilen makro liflerin, erken dönem rötre kontrolünde daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.8. Her bir beton numunesinin üç noktalı eğilme altındaki yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri.

Tablo 4.2. Üretilen betonların toplam serbest rötre ölçüm sonuçları.

Beton içeriği	REF 0,50	0,50 20kg/m ³ st	0,50 3kg/m ³ PE	REF 0,35	0,35 1% st+1%PE	REF 0,28	0,28 2%PE
Beton Kodu	N	NS	NP		YSP		CYP
Beton yaşı	Toplam serbest rötre ($\times 10^{-6}$)						
3	0	0	0	0	0	5	0
7	147	121	78	176	122	183	101
28	390	377	231	437	240	451	232
90	541	522	381	603	399	634	341
180	610	593	474	683	451	701	399

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek yoğunluklu polietilen makro lif ve çelik lif kullanılarak sonuçlandırılmış deneysel çalışmalar doğrultusunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Su/bağlayıcı oranı 0,5 olan normal dayanımlı referans betonlara, farklı türlerde makro lif ilaveleri yapılmıştır. 3 kg/m^3 yüksek yoğunluklu polietilen makro lif eklenmesi, referans betona kıyasla, eğilme dayanımını %12 ve kırılma enerjisini %18 oranında artırmıştır. Aynı referans betona, 20 kg/m^3 çelik makro lif eklenmesi ise, kırılma enerjisinde yaklaşık 40 kat yükselmeye yol açmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,5 olan normal dayanımlı betonlarda, farklı türdeki makro liflerin kullanımı, mekanik ve kırılma davranışını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Özellikle çelik makro liflerin, kırılma enerjisi üzerindeki etkisi çok daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.
- NP ve NS betonlarının net eğilme dayanımları karşılaştırıldığında NP betonunun NS betonuna kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Karışımlarda lif ağırlığı olarak NS betonu daha yüksek lif miktarına sahip olsa da lif adeti olarak NP betonu daha yüksek lif miktarına sahiptir. Bu nedenle NP betonu daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir.
- Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan ve çimento ağırlığının %16'sı metakaolin ihtiva eden betonlara, hacimce %1 çelik ve %1 polietilen makro lif karışımı eklenmiştir. Bu karışım lif takviyeli yüksek performanslı betonların, lif ihtiva etmeyen yalın betonuna kıyasla özgül kırılma enerjisi 24 kat artmış, eğilme dayanımı ise %92 iyileşmiştir. Yani, su/bağlayıcı oranı 0,35 ve metakaolin katkılı yüksek performanslı betonlarda, çelik ve polietilen makro liflerin karma olarak kullanılması, hem kırılma enerjisinde çok büyük bir artış, hem de eğilme dayanımında ciddi bir iyileşme sağlamıştır. Bu sonuçlar, lif türü ve miktarının, beton davranışı üzerindeki belirleyici etkisini bir kez daha vurgulamaktadır.
- Su/bağlayıcı oranı 0,28 olan ve çimento ağırlığının %16'sı metakaolin ihtiva eden betona, %2 oranında polietilen makro lif ilave edilmiştir. Bu durumda, lif içermeyen yalın betonuna kıyasla özgül kırılma enerjisi 14 kat artmış, yarmada çekme mukavemetinde ise %10 iyileşme sağlanmıştır. Yani, düşük su/bağlayıcı oranı (0,28) ve metakaolin katkısı içeren yüksek dayanımlı betonda, %2 polietilen makro lif kullanımı hem kırılma enerjisi hem de yarmada çekme dayanımında önemli gelişmelere yol açmıştır. Bu

sonuçlar, özellikle düşük su/bağlayıcı oranlı ve yüksek dayanımlı betonlarda, polietilen makro liflerin kullanımının, beton kırılma ve çekme davranışını güçlendirmede etkili olduğunu göstermektedir.

- Gerçekleştirilen serbest rötre ölçümleri, lifli betonlarda kuruma rötresinin, referans betona kıyasla daha düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca, özellikle erken yaşlarda, rötre kontrol etmede yüksek yoğunluklu makro liflerin, elik liflere göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Beton karışımlarına lif ilavesi, genel olarak kuruma rötresini azaltmaktadır. Bununla birlikte, yüksek yoğunluklu makro liflerin, erken dönemdeki rötre kontrolünde daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, lif türünün ve beton yaşının, serbest rötre davranışı üzerindeki önemli etkisini ortaya koymaktadır.

Yukarıda özetlenen deneysel çalışma sonuçları ışığında, bu çalışmanın uygulamada ihtiyaç duyulan ve aydınlatılması gereken noktalar ile ilgili aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- Optimum lif içeriği ve kombinasyonunun belirlenmesi:

Farklısu/bağlayıcıoranlıbetonlarıienenuygunelikvepolietilenmakrolif içeriklerinin ve kombinasyonlarının belirlenmesi.

Mekanik özelliklerdeki iyileşme, işlenebilirlik, maliyet gibi kriterlerin dikkate alınarak optimum lif kullanımının tespit edilmesi.

- Uzun dönem performansın incelenmesi:

Lifli betonların uzun vadedeki kırılma davranışı, dayanım özellikleri ve rötre performansının değerlendirilmesi.

Çevresel etkilerin (donma-zlme, kimyasal etkenler vb.) lifli betonların uzun dönem performansına etkilerinin araştırılması.

- Üretim ve uygulama süreçlerinin optimize edilmesi:

Lifli beton karışımlarının üretimi, taşınması, yerleştirilmesi ve kr şartlarının optimizasyonu.

Yapı elemanlarına uygulanması sırasında karşılaşılabilecek zorlukların belirlenmesi ve

özüm önerilerinin geliştirilmesi.

- Boyut etkilerinin incelenmesi:

Laboratuvar ölçęindeki deney sonuçlarının, gerçek ölçekteki yapı elemanlarına uyarlanabilirliğinin araştırılması.

Boyut etkilerinin betonun mekanik ve kırılmada davranışına olan etkilerinin değerlendirilmesi.

- Ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik analizleri:

Lifli betonların ekonomik maliyetlerinin geleneksel betonlarla karşılaştırılması.

Çelik ve polietilen liflerin üretim, kullanım ve geri kazanım süreçlerinin çevresel etkileri.

Bu öneriler, laboratuvar çalışmalarının pratik uygulamalara aktarılması, lifli betonların optimum kullanımının sağlanması ve uzun vadeli güvenilir performansının garanti edilmesi için önemli görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Acun, S. (2000). Yüksek dayanımlı beton üretiminde dizayn parametresi olarak lifsel katkıların irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 101059.
- Akçay, B., Sengul, C., Ali Tasdemir, M. (2016). Fracture behavior and pore structure of concrete with metakaolin. *Advances in Concrete Construction*, 4(2), 71.
- Akçay, B. (2007). *Effects of light weight aggregates on autogenous deformation and fracture of high performance concrete*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye 2007, 223721.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C. (2017). Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres. *Composite Structures*, 171, 317-325.
- Almudaiheem, J.A., Hansen, W. (1987). Effect of specimen size and shape on drying shrinkage of concrete. *Materials Journal*, 84(2), 130-135.
- Balaguru, P.N., Shah, S.P. (1992). *Fiber-reinforced cement composites*. McGraw-Hill.
- Banthia, N., Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness in cement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366-1372.
- Birol, T. (2016). Ultra yüksek performanslı lifli beton ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye, 2016, 342
- Chan, Y.W., Chu, S.H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1167-1172.
- Chavooshi, A., Madhoushi, M. (2013). Mechanical and physical properties of aluminum powder / MDF dust / polypropylene composites. *Construction and Building Materials*, 44, 214-220.
- Ezeldin, A. S., Balaguru, P. N. (1992). Normal and high-strength fiber-reinforced concrete under compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(4), 415-429.
- Holt, E. E., Janssen, D. J. (1998). Influence of early age volume changes on long-term concrete shrinkage. *Transportation Research Record*, 1610(1), 28-32.
- Islam, G. S., Gupta, S. D. (2016). Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 345-354.

- Joo Kim, D., Naaman, A. E., & El-Tawil, S. (2008). Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 917-928.
- Kim, J. H. J., Park, C. G., Lee, S. W., Lee, S. W., Won, J. P. (2008). Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(3), 442-450.
- Lawler, J. S., Zampini, D., Shah, S. P. (2005). Micro fiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 595-604.
- Lee, S. C., Cho, J. Y., Vecchio, F. J. (2011). Diverse embedment model for steel fiber-reinforced concrete in tension: Model development. *ACI Materials Journal*, 108(5), 516.
- Li, V. C., Leung, C. K. (1992). Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of Engineering Mechanics*, 118(11), 2246-2264.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. (2006). Concrete: micro structure, properties, and materials. 4th ed., The McGraw-Hill Companies, U.S.A.
- Neville A., Properties of Concrete, 4th ed., John Wiley & Sons Inc, New Jersey, U.S.A., 1981.
- Pelisser, F., Neto, A. B. D. S. S., La Rovere, H. L., & de Andrade Pinto, R. C. (2010). Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2171-2176.
- RILEM Technical Committee 50-FMC (1985). Draft Recommendation: Determination Of The Fracture Energy Of Mortar and Concrete By Means Of Three-Point Bend Test On Notched Beams. *Materials and Structures*, Pp. 287-291.
- Shah, S. P., Weiss, W. J., Yang, W. (1998). Shrinkage Cracking-Can It Be Prevented. *Concrete International*, 20(4), 51-55.
- Shaikh, F. U., Akbar, A. (2020). Effect of Steel and Polypropylene Fibre Reinforcement on The Impact Resistance of Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 242, 118016.
- Song, P. S., Hwang, S. (2004). Mechanical Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.
- Suzuki, K., Ohno, Y., Nakagawa, T. (1993). Test Method of Cracking of Concrete Due to Drying Shrinkage. Proceedings of The Fifth International RILEM Symposium, Barcelona, Spain, (pp. 63-63).
- Topçu, İ. B., Boğa, A. R. (2005). Uçucu Kül ve Çelik Liflerin Beton ve Beton Borularda Kullanımı. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18 (2), 1-14.

- Unal, H., Mimaroglu, A. (2006). Friction and Wear Characteristics of PEEK and Its Composite Under Water Lubrication. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(16), 1659-1667.
- Weiss, W. J. (1999). *Prediction of Early-Age Shrinkage Cracking in Concrete Elements*. Northwestern University. PhD Thesis, Northwestern University, Illinois, U.S.A.
- Wittmann, F. H. (1983). Structure of Concrete with Respect to Crack Formation. *Fracture Mechanics of Concrete*, 43(5), 6.
- Yoo, D. Y., Banthia, N., Yoon, Y. S. (2016). Flexural Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams Reinforced with GFRP and Steel Rebars. *Engineering Structures*, 111, 246-262.





Ek-A Beton Basınç Dayanım Değerleri

Tablo A.1. Beton basınç dayanım değerleri

Numune Kodu	$X_m Y_m, Z_m$ (mm)	Numune Ağırlığı (gr)	Basınç Dayanımı (MPa)
N1	100	2379	57,3
N2	100	2210	29,8
N3	100	2303	32,5
N4	Numune uygun değil.		
NS1	100	2380	72,6
NS2	100	2346	56
NS3	100	2360	67,9
NS4	100	2458	63,4
NS5	100	2182	37,3
NP1	100	2350	62,1
NP2	100	2308	56,8
NP3	100	2218	46,8
NP4	100	2288	56,4
NP5	100	2394	60,8
YSP1	100	2399	95,6
YSP2	100	2350	91,5
YSP3	100	2372	101,1
CYP1	100	2328	92,4
CYP2	100	2375	105,3
CYP3	100	2375	87,3
CYP4	100	2427	95,8

Ek-B Beton Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri

Tablo B.1.Beton yarmada çekme dayanımı değerleri

Numune Kodu	$X_m Y_m, Z_m$ (mm)	Numune Ağırlığı (gr)	Kırılma Yüğü (kg)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
N1	100	2376	12160	7,60
N2	100	2245	12070	7,54
N3	100	2408	13170	8,23
N4	100	2308	12490	7,80
NS1	100	2270	13010	8,13
NS2	100	2356	12910	8,07
NS3	100	2362	12830	8,02
NS4	100	2445	13390	8,37
NS5	100	2207	13230	8,27
NP1	100	2251	12350	7,72
NP2	100	2320	11850	7,40
NP3	100	2318	12000	7,50
NP4	100	2286	9830	6,14
NP5	100	2320	13170	8,23
YSP1	100	2421	18120	11,32
YSP2	100	2318	10970	6,85
YSP3	100	2300	19290	12,05
CYP1	100	2341	13230	8,27
CYP2	100	2398	10630	6,64
CYP3	100	2351	12370	7,73
CYP4	100	2260	12000	7,50

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Akçay, B., Erdoğan, H., Özalp, F., **Sertkaya, S** (2018). Çelik ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen Makro Lif Takviyeli Betonların Kırılma Davranışları, *Hazır Beton Dergisi*, 18(3), 75-79



ÖZGEÇMİŞ

Sümer SERTKAYA İlk, orta ve lise öğrenimini Zonguldak' ta tamamladı. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2021 yılında Nişantaşı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezsiz yüksek lisansını tamamladı. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Tezli Yüksek Lisans çalışmalarını 2024 yılında tamamladı. 2008 yılından beri Türk Deniz Kuvvetleri'ndeki görevine devam etmektedir.

