

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI TİP VE ORANDA KULLANILAN LİFLERİN BETONDA RÖTREYE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Koray Mehmet ARSLAN

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Bilimleri Programı

TEMMUZ 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI TİP VE ORANDA KULLANILAN LİFLERİN BETONDA RÖTREYE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Koray Mehmet ARSLAN
(502172646)**

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa Erkan KARAGÜLER

TEMMUZ 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT FIBRE TYPES ON THE
SHRINKAGE OF CONCRETE**

Ph.D. THESIS

**Koray Mehmet ARSLAN
(502172646)**

Department of Architecture

Construction Sciences Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Mustafa Erkan KARAGÜLER

JULY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 502172646 numaralı Doktora Öğrencisi Koray Mehmet ARSLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “FARKLI TİP VE ORANDA KULLANILAN LİFLERİN BETONDA RÖTREYE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mustafa Erkan KARAGÜLER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Leyla TANAÇAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nabi YÜZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan YILDIRIM
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa ÖZGÜNLER
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 09 Temmuz 2024





Eşime,



ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmam boyunca değerli bilgileriyle bana danışmanlık yapan hocam Prof. Dr. Mustafa Erkan KARAGÜLER'e, tez izleme süreci boyunca yol gösteren Prof. Dr. Leyla TANAÇAN ve Prof. Dr. Nabi YÜZER'e teşekkür ederim.

Binbir zahmete katlanıp deneyler süresince yardımlarını esirgemeyen İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanları Murat MEYDAN, Oktay YALÇINKAYA, Hamdi ATEŞ, Mübin USLU'ya, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı çalışanları Öğr. Gör. Hakan SARUHAN, İnş. Yük. Müh. Fatih ŞAHİN ve Yük. Müh. Ergün BİNBİR'e teşekkür ederim.

Süreç boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Hakan Nuri ATAHAHAN, Prof. Dr. Özkan ŞENGÜL, Prof. Dr. Hasan YILDIRIM, Doç. Dr. Yuşa ŞAHİN ve Dr. Hasan Nuri TÜRKMENOĞLU'na, nano malzeme temininde destek olan saygıdeğer Dr. Özgür EKİNCİOĞLU'na, laboratuvarında her zaman yardıma koşan kıymetli çalışma arkadaşlarım Ar. Gör. Şervan BARAN, Ar. Gör. Sidar Nihat BIÇAKÇI, Ar. Gör. Muhammet TEKİNGÜNDÜZ, Ar. Gör. Cansu ÇOLAK, Ar. Gör. Mesut KÜÇÜK ve Ar. Gör. Serkan KARATOSUN'a çok teşekkür ederim.

Varlığıyla bana destek ve motivasyon sağlayan sevgili eşim İlknur'a ve öğrenim hayatım boyunca destek sağlayan kıymetli aileme minnetdarım.

Mayıs 2024

Koray Mehmet ARSLAN
(İnşaat Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
1.2 Çalışmanın Özgün Değeri	7
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	23
3.1 Malzemeler	23
3.1.1 Beton	23
3.1.2 Harç	26
3.2 Karışım Oranları	27
3.2.1 Deneyler için yapılan ön hazırlıklar ve ön deneyler	27
3.2.2 Beton numuneler için karışım oranları	31
3.2.3 Harç	33
3.3 Deney Yöntemleri	37
3.3.1 Serbest rötre	37
3.3.2 Kısıtlanmış rötre	38
3.3.2.1 Beton	38
3.3.2.2 Harç	42
3.3.3 Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi	44
3.3.4 Ultrases geçiş hızı	47
3.3.5 Basınç dayanımı	48
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	51
4.1 İşlenebilirlik	51
4.2 İç yapı	52
4.3 Serbest rötre	54
4.4 Kısıtlanmış rötre	57
4.5 Mekanik özellikler	62
5. SONUÇ	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	91



KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
CNT	: Carbon Nano Tube
CSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
DK	: Dere kumu
EN	: European Norm
KK	: Kırma kum
KT	: Kırma taş
LVDT	: Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör
MWCNT	: Multi Walled Carbon Nano Tube
PP	: Polipropilen
S/Ç	: Su/çimento oranı
SEM	: Scanning Electron Microscope
TS	: Türk Standardı



SEMBOLLER

GPa	: Gigapaskal
hy	: Hibrit lif
mac	: Makro polipropilen lif
mic	: Mikro polipropilen lif
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
σ	: Gerilme



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Çimento fiziksel özellikleri.	24
Çizelge 3.2 : Çimento kimyasal özellikleri.	24
Çizelge 3.3 : Beton numunelerde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.....	24
Çizelge 3.4 : Agregat elek analizi (kümülatif % geçen değerler).	25
Çizelge 3.5 : Kullanılan PP liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri.	25
Çizelge 3.6 : Standart CEN kumu elek analizi.	26
Çizelge 3.7 : Çok katmanlı karbon nano tüp (MWCNT) özellikleri.	27
Çizelge 3.8 : Beton numunelerdeki karışım oranları ve slump değerleri.	32
Çizelge 3.9 : Harç numunelerdeki karışım oranları.....	34



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Hossain ve Weiss (2004)'ın yaptıkları çalışmada elde ettikleri deney sonuçlarının gösterimi.....	9
Şekil 2.2 : Dong ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada kullandıkları kısıtlandırıcı ring deney aparatlarının geometrik gösterimi.	10
Şekil 2.3 : Ultrasonik enerji kullanılarak yapılan MWCNT karışımına ait SEM görüntüsü (Metaxa ve diğ. 2013).....	11
Şekil 2.4 : Strainage tekniği kullanılarak teşkil edilen kısıtlanmış rötre deney düzeneği (Yousefieh ve diğ, 2017).	12
Şekil 2.5 : Passuello ve diğ. (2009) yaptıkları deneysel çalışmada serbest rötre ve kısıtlanmış rötre kaynaklı çatlak açılmalarında buldukları sonuçlar. ...	13
Şekil 2.6 : Betonda çatlak gelişimine karşı direnç mekanizmaları, a) yalın beton b)lif katkılı çimento esaslı kompozit (Xie ve diğ, 2021a).	15
Şekil 2.7 : Eğilme deneyinde çentikten itibaren devam eden çatlağın hibrit lifler tarafından köprülenmesi (Yang ve diğ, 2020).	16
Şekil 2.8 : Dozaj ve lif geometrisinin basınç ve eğilme dayanımlarına etkisi, Zemei Wu ve diğ. (2019).	17
Şekil 2.9 : Graphene nanoplate (GNP) ve graphite plate (GP) katkılı harçlarda yapılan basınç ve eğilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar (Dong ve diğ, 2021).	18
Şekil 2.10 : Grafen karbon nano lif katkısının düşük su/çimento oranına sahip harçlarda a) elastisite modülüne etkisi, b) çatlak ağzı açılma esnekliğine etkisi (Shah ve Konsta-Gdoutos, 2017).	19
Şekil 2.11 : Çok katmanlı karbon nano tüplerin (MWCNT) a) basınç, b) eğilme dayanımlarına etkisi, (Cerro-Prada ve diğ, 2021).....	20
Şekil 2.12 : Çok katmanlı karbon nano tüplerin (MWCNT) a) basınç, b) eğilme dayanımlarına etkisi, (Sedaghatdoost ve diğ, 2018).	21
Şekil 3.1 : Kullanılan agregalara ait granülometri eğrileri.	25
Şekil 3.2 : Tek katmanlı ve çok katmanlı karbon nano lif görseli.	26
Şekil 3.3 : Rötre deneyleri için oda hazırlanması.	28
Şekil 3.4 : Kullanılan malzemelere ait görseller; agrega, mikro fiber, makro Fiber, çimento.....	29
Şekil 3.5 : Ön deneylere ait görseller.....	30
Şekil 3.6 : Serbest rötre numuneleri için pimli kalıp.	33
Şekil 3.7 : Dong ve diğ. (2021) tarafından tarif edilen nano lif karıştırma yöntemi.	35
Şekil 3.8 : MWCNT solüsyonunun hazırlanması.	36
Şekil 3.9 : Serbest rötre ölçümleri.	38
Şekil 3.10 : ASTM C1581 standardına göre numune ve kalıp ölçüleri.....	39
Şekil 3.11 : ASTM C1581 standardına uygun beton kalıbı ve portatif mikroskop. ..	39
Şekil 3.12 : Bazı deney numunelerinin üretimleri.	40
Şekil 3.13 : Mikroskop vasıtasıyla ölçülen çatlak genişlikleri.	40
Şekil 3.14 : Modifiye edilmiş yöntemle göre numune ve kalıp ölçüleri.....	41

Şekil 3.15 : Rüzgar hızının anemometre ile ölçülmesi.	41
Şekil 3.16 : Modifiye edilmiş yöntemle üretilmiş numuneler.	42
Şekil 3.17 : Harç numuneler için oluşturulmuş kısıtlanmış rötre numune kalıbı ölçüleri.	43
Şekil 3.18 : Harç numuneler için kısıtlanmış rötre numuneleri.	43
Şekil 3.19 : Harç numunede meydana gelen kısıtlanmış rötre çatlaklarının ölçümü.	44
Şekil 3.20 : Beton numunelerde üç noktalı eğilme deney düzeneğinin şematik gösterimi.	45
Şekil 3.21 : Beton numunelerde üç noktalı eğilme deney düzeneği.	46
Şekil 3.22 : Harç numunelerde üç noktalı eğilme deney düzeneğinin şematik gösterimi.	47
Şekil 3.23 : Harç numunelerde üç noktalı eğilme deney düzeneği.	47
Şekil 3.24 : Ultrases geçiş hızı (UPV) deneyleri.	48
Şekil 3.25 : 50 mm çaplı 100 mm yükseklikli harç numuneler.	49
Şekil 3.26 : Basınç deneyi.	49
Şekil 4.1 : Lif içeriği ve slump değeri ilişkisi.	52
Şekil 4.2 : Harç numunelere ait SEM görüntüleri: 0.025% MWCNT (A) 50000x, (A') 200000x, 0.0375% MWCNT (B) 50000x, (B') 100000x, 0.050% MWCNT (C) 50000x and (C') 100000x.	53
Şekil 4.3 : Mikro lif katkılı beton numuneler için serbest rötre ölçüm değerleri.	54
Şekil 4.4 : Makro lif katkılı beton numuneler için serbest rötre ölçüm değerleri.	55
Şekil 4.5 : Hibrit lif katkılı beton numuneler için serbest rötre ölçüm değerleri.	55
Şekil 4.6 : Harç numuneler için serbest rötre ölçüm değerleri.	56
Şekil 4.7 : ASTM C1581 standardına göre yapılan deneylerde ölçülen çatlak genişlikleri.	57
Şekil 4.8 : ASTM C1581 standardına göre ölçülen çatlak genişliklerinin kıyaslanması.	58
Şekil 4.9 : Modifiye yöntemle yapılan deneylerde ölçülen çatlak genişlikleri.	59
Şekil 4.10 : Modifiye yöntemle yapılan deneylerde ölçülen çatlak genişliklerinin kıyaslanması.	60
Şekil 4.11 : Harç numunelerde yapılan kısıtlanmış rötre deneylerinde çatlak genişlikleri.	61
Şekil 4.12 : Harç numunelerde yapılan kısıtlanmış rötre deneylerinde ölçülen çatlak genişliklerinin kıyaslanması.	62
Şekil 4.13 : PP lifli beton numunelere ait basınç dayanımı değerleri.	63
Şekil 4.14 : PP lifli beton numunelere ait elastisite modülü değerleri.	64
Şekil 4.15 : PP lifli beton numunelere ait eğilme dayanımı değerleri.	65
Şekil 4.16 : Mic 0.25 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	65
Şekil 4.17 : Mic 0.375 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	66
Şekil 4.18 : Mic 0.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	66
Şekil 4.19 : Mic 0.75 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	67
Şekil 4.20 : Mic 1.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	67
Şekil 4.21 : Mic 1.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	68
Şekil 4.22 : Mic 2.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	69
Şekil 4.23 : Mic 2.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	69
Şekil 4.24 : Mac 0.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	70
Şekil 4.25 : Mac 0.75 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	70
Şekil 4.26 : Mac 1.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	71
Şekil 4.27 : Mac 1.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	71
Şekil 4.28 : Mac 2.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.	72

Şekil 4.29 : Mac 3.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.....	72
Şekil 4.30 : Mac 4.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.....	73
Şekil 4.31 : Hy 0.5 mic + 0.5 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.....	74
Şekil 4.32 : Hy 1.0 mic + 1.0 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.....	74
Şekil 4.33 : Hy 0.75 mic + 1.5 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.....	75
Şekil 4.34 : Hy 2.0 mic + 2.0 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.....	76
Şekil 4.35 : Hy 1.5 mic + 3.0 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.....	76
Şekil 4.36 : PP lifli beton numunelere ait kırılma enerjisi değerleri.	77
Şekil 4.37 : PP lifli beton numunelere ait ultrases geçiş hızı değerleri.	78
Şekil 4.38 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait basınç dayanımı değerleri.....	79
Şekil 4.39 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait elastisite modülü değerleri.....	79
Şekil 4.40 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait eğilme dayanımı değerleri.....	80
Şekil 4.41 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait kırılma enerjisi değerleri.....	80
Şekil 4.42 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait ultrases geçiş hızı değerleri.....	81



FARKLI TİP VE ORANDA KULLANILAN LİFLERİN BETONDA RÖTREYE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Beton, günümüzde Dünya’da en çok tercih edilen yapı malzemesidir. Bileşenleri birçok bölgede doğadan kolaylıkla temin edilebilir. Konulduğu kalıbın şeklini alabilmesi betonun çoğu yapı malzemesine karşın üstün özelliğidir. Bu kadar yoğun kullanılmasına rağmen beton yapının servis ömrünü ve taşıyabileceği servis yüklerini doğrudan etkileyebilecek çatlaklar oluşabilmektedir. Yarı gevrek bir malzeme olan betonda çatlaklar çeşitli nedenle oluşabilir. Betonun çekme dayanımı zayıftır, şekil değiştirme kapasitesi sınırlıdır. Dolayısıyla enerji sönmülendirme yeteneği zayıf ve çatlaklara karşı dayanıksızdır. Tez çalışması kapsamında betonun ve harcın rötre kaynaklı çatlakları ve çatlak önleme yöntemlerinden lif katkıları araştırılmıştır. Kompozit bir yapı malzemesi olan betonda lif kullanımı ile ilgili çalışmalar çoğunlukla mekanik özellikler, özellikle de eğilme dayanımının gelişimi üzerinedir. Lif kullanımının çimento esaslı kompozitlerde rötre yi ne derece etkilediği üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Var olan çalışmalar ise tek tip lif kullanımı veya tek tip rötre tipi üzerine yoğunlaşmıştır.

Çimento esaslı kompozitlerde çatlak gelişimi 3 mertebede oluşmaktadır. Çatlak başlangıcı nano boyutta gerçekleşmekte sonrasında gelişerek mikro boyuta ilerlemekte ve nihayetinde de makro ölçekte gözle görülür yapısal hasar durumuna gelmektedir. Bu çatlak gelişimleri plastik rötre veya kuruma rötresi nedeniyle olabilmektedir. Bu tez çalışmasının odak noktası, plastik rötre ve kısıtlanmış rötre kaynaklı çatlakların önlenmesi, azaltılması veya geciktirilmesinin liflerle ne derece mümkün olduğunu deneysel olarak ortaya koymaktır. Lif katkılarıyla birlikte betonun temel parametrelerinin de ne ölçüde değiştiği ayrıca belirlemektir. Bu kapsamda, hangi deney yöntemlerinin kullanılabileceği, hangi çalışmalara eklemeler yapılabileceği literatür taramaları ve ön deneylerle belirlenmeye çalışılmıştır.

Ön çalışmalarda, plastik rötre etkilerinin kısıtlanmış rötreye birlikte etki ettirilebilecek deney düzeneği, liflerin maksimum ve minimum ne oranda karıştırılabileceği, dolayısıyla lif katkı limitleri belirlenmeye çalışılmıştır. Üç ölçekte meydana gelen çatlaklara karşı üç ölçekte lif kullanımı tasarlanmıştır. Bunlardan nano mertebede çatlaklar için çok katmanlı karbon nano tüp (MWCNT) katkısı yalın çimento harcını lifli kompozit haline getirmiştir. Nano lif katkılı deneyler için iri agregalı beton numuneler yerine ince agrega kullanılan harç bazında numuneler üretilmiştir. Nano ölçekte yapılan lifli katkı müdahalesi direkt çimento hamurunu etkileyecek dolayısıyla bütün kompozitin karakterini değiştirebilecektir. Günümüzde nano teknoloji hızla gelişmekle birlikte halen yapı sektörü ve yapı malzemeleri açısından görece pahalıdır. Küçük hacimli numunelerde daha az katkı malzemesiyle çalışmak bu boyutta lif katkısını daha gerçekçi kılmaktadır.

Birkaç gram ağırlığındaki nano lifleri incelediğimizde birbirlerine dolanmış, topaklanmış yüzbinlerce lifi görebiliriz. Bir süredir yapılan çalışmalarda araştırmacılar

nano liflerin çimento esaslı kompozitlere nasıl karıştırılabileceği üzerine değerlendirmeler yapmışlardır. En yaygın kabul gören yöntem ultrasonik homojenizatörlerle yapılan karıştırma işlemidir. Bu yöntemle göre küçük bir kapta su ile karışmış olan nano liflerin içine ultrasonik ses dalgaları yayabilen ismine prop denilen bir uç daldırılır. Çok hızlı titreşen ve çok seri ultrasonik dalgalar liflere etkiltilerek liflerin birbirlerinden mekanik olarak ayrıştırılması sağlanır. Çökelen lifler çok fazla beklenmeden harç karışımına eklendiğinde genellikle topaklanma sorunu ortadan kalkmaktadır. Bu yöntemin bazı sakıncaları ve eksiklikleri vardır, bunlar; hacimsel olarak maksimum 1 litre gibi çok küçük üretimlere imkân vermesi ve ayrıştırma işleminin yoğun mekaniksel işlemlerle yapılması, dolayısıyla liflerde kopma, çözülme gibi sorunlara yol açabilme ihtimalidir.

Karbon nano liflerin yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi çok üstün mekanik özelliklere sahip oldukları bilinmektedir. Tez çalışmasında kullanılan nano lifler çok düşük oranlarda seçilmiştir ve bu lifler ya standart bir harç karıştırıcı ile ya da basit bir sıcaklık ayarlı titreştirici kullanılarak harç içerisinde dağılım sağlanmıştır. Ön deneylerle bulunan sonuçlara göre seçilen oranlar çimento ağırlığının %0,025'i, %0,0375'i ve %0,050'si şeklindedir. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan inceleme görüntülerine göre tez çalışmasında yapılan nano katkılı üretimlerde topaklanma sorunu gözlenmemiştir. Harç numunelerde ayrıca beton numunelerde de kullanılan mikro polipropilen lif katkılarının etkileri de araştırılmıştır. Mikro PP lifler harç numunelerde çimento ağırlığının %0,25'i, %0,50'si ve %1,0'i oranlarında seçilmiştir.

Kısıtlanmış rötre deneyleri için genellikle takip edilen yöntem ASTM C1581 standardıdır. Söz konusu standarda göre ortada çelikten bir halka vardır ve etrafına taze haldeyken yerleştirilen beton, su kaybı nedeniyle hacimsel olarak büzölmeye çalışacak ancak deney düzeneğinin ortasında bulunan rijit çelik nedeniyle büzölmesi kısıtlanacak ve nihayetinde iç gerilmeleri çekme dayanımı aşınca çatlayacaktır. Tez çalışmasında kullanılan harç numunelerinin agrega dane boyutları ASTM C1581 standardında tarif edilenin yaklaşık 1/4'ü mertebesinde. Dolayısıyla harç numunelerde yapılacak kısıtlanmış rötre deneyleri için söz konusu standartta tarif edilen ölçülerin 1/4'ü ölçeğinde bir çelik kalıp imal edilmiştir. Ebatlardaki ölçeklendirme hariç geri kalan tüm prosedür standardın tarif ettiği şekilde uygulanmıştır.

ASTM C1581 standardı direkt kuruma rötresi kaynaklı kısıtlanmış rötre çatlaklarını araştırmaya imkân veren bir standarttır. Söz konusu standarda göre üretilen numunelerin kalınlığı 35 mm'dir ve betonun üzeri buharlaşmayı engelleme maksatlı parafinle kaplanmaktadır. Pratik kullanıma baktığımızda kuruma rötresi ve plastik rötre birlikte etki etmektedir. Beton taze haldeyken de rötre etkilerine maruz kalmaktadır. Tez çalışmasında kuruma rötresi kaynaklı kısıtlanmış rötre çatlakları yanında plastik rötre etkilerini de inceleyebileceğimiz ASTM C1581 yönteminin modifiye edilmiş hali olan yeni bir deney düzeneği de tertip edilmiştir. Modifiye yöntemle göre üretilen betonlar 135 mm gibi daha geniş bir alana yayılmakta ancak yükseklikleri daha az olmaktadır. Bu geniş alana rüzgâr etki ettirilmekte ve yüzeydeki buharlaşma hızlandırılmaktadır.

Hem standart yöntem hem de modifiye yöntem için birbirine eş numuneler aynı anda üretilmiştir. Yani aynı harman karışımının bir kısmı standart yöntem için ayrılmış kalan kısmı ise modifiye deney yöntemi ve mekanik özellik deneyleri için kullanılmıştır. Beton numuneler için hiç lif katkısı içermeyen referans numunelerin yanında

metreküpteki ağırlığına göre mikro PP lifler %0,25, %0,375, %0,50, %0,75, %1,0, %1,5, %2,0, %2,5 oranında, makro PP lifler %0,50, %0,75, %1,0, %1,5, %2,0, %3,0, %4,0 ve mikro ve makro PP liflerin birlikte hibrit şekilde kullanıldığı hibrit lifler %0,5 mic + %0,5 mac, %1,0 mic + %1,0 mac, %0,75 mic + %1,5 mac, %2,0 mic + %2,0 mac, %1,5 mic + %3,0 mac şeklindedir.

Kısıtlanmış rötre deneylerinin yanında tüm karışımlara ait serbest rötre ölçümleri de yapılmıştır. Herhangi bir kısıtlama olmayan serbest rötre numuneleri ölçüleri 40 x 40 x 160 mm ölçülerinde uçlarında metal pimler takılmış prizmatik geometrilidir. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla beton numunelerde ultrases geçiş hızı, elastisite modülü ve basınç dayanımı deneyleri için 100 mm çaplı 200 mm yükseklikli silindir, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi deneyleri için 70 x 70 x 280 mm ebatlı prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Harç bazında mekanik özellik deneyleri için ise UPV, elastisite modülü ve basınç dayanımı için 50 mm çaplı 100 mm yükseklikli silindir numuneler, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi deneyleri için ise 40 x 40 x 160 mm ebatlı prizmatik numuneler hazırlanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, mikro ve makro olarak her iki ölçekte de etkinlik yeteneği sayesinde hibrit kullanılan liflerin hem mekanik özellikler hem de rötre çatlaklarını önleme konusunda anlamlı üstünlüğü vardır. Lif kullanımı çimento esaslı kompozitlerde birçok anlamda iyileştirme sağlasa da özellikle yoğun PP kullanımı işlenebilirliği önemli ölçüde azaltmakta, basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinde ise bir miktar azalmaya sebebiyet vermektedir.



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT FIBRE TYPES ON THE SHRINKAGE OF CONCRETE

SUMMARY

Concrete is the most used building material in the construction industry. Its components can be easily obtained from nature in many regions. The superior feature of concrete compared to most other building materials is that it can take the shape of the mold in which it is placed. Despite being used so intensively, cracks may occur that can directly affect the service life of the concrete structure. Cracks in concrete, which is a semi-brittle material, can occur for a number of reasons. The tensile strength of concrete is weak and its strain capacity is limited. Therefore, its energy absorption ability is weak and it is vulnerable to cracks. Within the scope of the thesis, shrinkage cracking of concrete and mortar and fiber additives as crack prevention methods were investigated. Studies on the use of fibers in concrete, which is a composite building material, are mostly focused on the development of mechanical properties, especially flexural strength. Whereas, studies on the effects of fibers on the shrinkage of cement-based composites are limited and existing studies are focused on the use of a single type of fiber or a single type of shrinkage.

Crack development in cement-based composites occurs at three levels. Crack initiation occurs at the nanoscale, then develops further at the microscale and finally becomes structural damage at the macroscale. These crack developments can be due to plastic shrinkage or drying shrinkage. The focus of this thesis is to experimentally demonstrate to prevent, reduce or delay cracks caused by plastic shrinkage and restrained shrinkage with the application of fibers. Well-dispersed fibre reinforcement causes a bridging effect by controlling crack width at the microstructure level and restrains crack propagation, therefore reduces the brittleness of the composite. In addition, it is also necessary to determine the basic parameters of the concrete are changed by fiber additions. In this context, literature evaluations and preliminary tests were used to determine which experimental methods can be used.

In preliminary studies, an experimental setup was designed to effect plastic shrinkage effects along with restrained shrinkage. Trials have been made to determine the maximum and minimum ratios of fiber contributions. The addition of multilayered carbon nanotubes (MWCNT) for nanoscale cracks transformed the cement mortar to a nanocomposite. For the experiments of nanofibers, mortar samples with fine aggregates were prepared instead of coarse aggregates. The use of nanoscale fiber additives has a direct effect on the cement paste and may therefore change the character of the entire composite material. Although nanotechnology is developing rapidly today, it is still relatively expensive compared to the other building materials.

When a few grams of nanofibers observed with a microscope, it can be seen that hundreds of thousands of fibers that are tangled and clumped to each other. In the past, researchers have investigated how nanofibers can be mixed into cement-based composites. The most widely utilized method is using an ultrasonic homogenizer. In

this method, a probe that can emit ultrasonic waves is immersed in the dissolution of nanofibers and water in a small container. Very rapid vibrating and serial ultrasonic waves are applied to the fibers, thus mechanically separating the fibers from each other. This method has some disadvantages and shortcomings, these are; it allows a very small volumetric production, such as a maximum of 1 liter, and the dispersion process is carried out with an intensive mechanical operation, which may lead to problems such as breaking or dissolving the fibers.

It is well known that carbon nanofibers have excellent mechanical properties, such as high tensile strength and high modulus of elasticity. The nanofibers used in this study were selected in very small quantities and dispersed in the mortar using either a standard mortar mixer or a simple temperature-controlled vibrator. According to the results of the preliminary tests, the selected ratios are 0.025%, 0.0375% and 0.050% of the cement weight. According to the examination images taken with the scanning electron microscope, no flocculation problem was observed in the mortar samples. The effects of micro-polypropylene fiber additives, which are used in mortar and concrete samples, were also investigated. Micro PP fibers were selected at 0.25%, 0.50% and 1.0% of the cement weight in mortar samples.

The method generally followed for restrained shrinkage tests is the ASTM C1581 standard. According to this standard, there is a steel ring in the center. As the fresh concrete placed around this ring dries, it will try to shrink volumetrically due to water loss, but its strain capacity is restricted due to the rigid steel ring, and eventually it will crack when its internal stresses exceed its tensile strength. The aggregate grain sizes of the mortar samples used in this study are approximately 1/4 of those described in the ASTM C1581 standard. Therefore, a steel mold with a scale of 1/4 of the dimensions described in the standard was made for the shrinkage tests on the mortar samples. With the exception of the scaling of the dimensions, the entire procedure was applied as described in the standard.

The ASTM C1581 standard describes the investigation of restrained shrinkage cracks caused by direct drying shrinkage. The thickness of the samples produced according to the standard is 35 mm and the top of the concrete is covered with paraffin to prevent evaporation. In practical application, it is very difficult to distinguish between drying shrinkage and plastic shrinkage. Concrete is subject to shrinkage effects even when it is fresh. In this study, a new experimental setup, which is a modified version of the ASTM C1581 method, was developed to examine the effects of plastic shrinkage as well as restrained shrinkage cracks caused by drying shrinkage. Concretes produced according to the modified method were spread over a higher thickness of 135 mm and lower height. The wind acts on this large area and evaporation on the surface is accelerated.

Identical samples were produced simultaneously for both the standard method and the modified method. In other words, part of the same mixture was reserved for the standard method, while the remaining part was used for the modified test method and the mechanical tests. For concrete samples, in addition to reference samples containing no fiber additives, micro PP fibers were used as 0.25%, 0.375%, 0.50%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% ratio by cement weight. Macro PP fibers 0.50%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 3.0%, 4.0% and hybrid of micro and macro PP fibers together used as 0.5% mic + 0.5% mac, 1.0% mic + 1.0% mac, 0.75% mic + 1.5% mac, 2.0% mic + 2.0% mac and 1.5% mic + 3.0% mac.

In addition to the restrained shrinkage tests, free shrinkage measurements of all mixtures were also performed. The dimensions of free shrinkage samples are 40 x 40 x 160 mm and have a prismatic geometry with metal pins attached at the ends. In order to determine the mechanical properties, 100 mm diameter and 200 mm height cylinders were prepared for ultrasonic pulse velocity, modulus of elasticity and compressive strength tests in concrete samples. 70 x 70 x 280 mm prismatic samples were prepared for flexural strength and fracture energy tests. For mortar-based mechanical property tests, 50 mm diameter and 100 mm height cylindrical samples were prepared for UPV, modulus of elasticity and compressive strength. 40 x 40 x 160 mm sized prismatic samples were prepared for flexural strength and fracture energy tests.

According to the results obtained, hybrid fibers have a significant advantage in terms of both mechanical properties and prevention of shrinkage cracks because of their ability to be effective at both micro and macro scales. Although the use of fibers provide many improvements in cement-based composites, especially the intensive use of PP significantly reduces workability and causes a slight decrease in compressive strength and elasticity modulus values. When looking at the compressive strength, UPV and elasticity modulus results for mortar mixtures, it was observed that the values decreased slightly with the application of PP fibres, on the contrary the values increased slightly with MWCNTs application. 12% increase in compressive strength and 10% increase in modulus of elasticity were measured in the sample coded CNT 0.050, which represented the maximum achievement. The decrease can be explained by PP fibres exhibiting a lower density and elasticity modulus. Although MWCNTs have enormous density and mechanical properties, it had limited improvements on the compressive strength and elastic modulus values because of the chosen w/c ratio which is 0.5 in this study.



1. GİRİŞ

Beton günümüzde en çok tercih edilen yapı malzemesidir. Agregası, su ve çimentodan oluşan beton, bazı katkı malzemeleri de içerebilir. Çimento esaslı bir kompozit olan beton, ilk karışımında bünyesine aldığı fazla suyu zamanla terleyerek atar. Bu durum betonda hacim kaybına neden olur ve beton büzülür. Bünyeden su kaybı yaşanması özellikle betonda kısıtlanma hali varsa ciddi çatlaklara neden olabilmektedir. Kısıtlanmış rötre olarak tabir edilen bu durumda meydana gelen çatlaklar betonun ömrünü kısaltmakta, dürabilite sorunlarına yol açmaktadır.

İçeriğinde bulunan malzemelere ve karışımına baktığımızda betonu bir taneli kompozit olarak tanımlayabiliriz. Bileşenleri bir arada tutmaya yarayan bağlayıcı Kalsiyum Silikat Hidrat (C-S-H) fazı makro ölçekte amorf matrisi, agrega ise taneli kısmı temsil ederler. Ayrıca bünyede boşluk suyu da mevcuttur.

Çimento hidratasyonuna girmeyen ve betonda boşluklar yaratan fazla su hemen hemen tüm beton ve harçlarda mevcuttur. Her ne kadar bazı tedbirlerle su kaybının önüne geçebilmek bir miktar mümkün olsa da rüzgâr ve sıcaklık etkileriyle bu fazla suyun atılımı kaçınılmaz bir durumdur. Saha ve yer uygulamaları gibi betonun büzülebileceği yeterli hacim var ise gerekli derz boşlukları bırakarak, büzülmeye yol göstererek ve uygun masterlama uygulamalarıyla saha betonlarında çatlamların önüne geçebilmek mümkün olabilir. Öte yandan çoğu mühendislik uygulamasında beton yapısal eleman olarak kullanıldığından, eleman kenarlarından ve köşelerinden tutulmuş vaziyettedir. Dolayısıyla kısıtlanmış rötre etkilerine maruz kalmaktadır. Kısıtlanmış rötre beraberinde çatlakları, çatlaklar ise beraberinde betonda geçirimsizliği getirmektedir. Geçirimli beton yapıyı korozyona ve diğer olumsuz etkilere açık hale getirmektedir. Bilindiği gibi korozyon en önemli dürabilite sorunlarının başında gelmektedir. Çatlaklar ayrıca dayanım kayıplarına da neden olmaktadır. Çatlaklar en küçük ölçek olan nano boyutta başlar sonra mikro boyutta gözlemlenir ve en nihayetinde makro boyutta açıkça görülür hale gelir (Al-Rekabi, 2017).

Rötre çatlakları betonun taze olup olmamasına veya oluşma şartlarına göre farklı isimler alırlar. Fiziksel olarak suyun uzaklaşmasına bağlı olarak meydana gelen rötre çeşitleri plastik rötre ve kuruma rötresidir. Plastik rötre, beton üretilip yerleştirildikten sonraki birkaç saat içerisinde, beton henüz sertleşmemişken meydana gelir. Plastik rötre genellikle beton yüzeyinde görülen gelişigüzel dağılmış, uzunlukları ve genişlikleri farklı çatlaklara neden olur. Havanın sıcaklığı ve nem durumu, rüzgârın varlığı ve şiddeti plastik rötrenin artmasında veya azalmasında etkilidir. Beton yüzeyindeki fazla su, alttan gelen terlemeden daha fazla miktarda buharlaşırsa yüzey çatlakları oluşur.

Plastik rötrenin yanı sıra ilerleyen yaşlarda da devam eden yine bünyedeki su kaybı kaynaklı rötre tipine kuruma rötresi denir. Reaksiyona girmeyen fazla suyun bir kısmı çimento hidratlarıyla birlikte bir jel sistemi oluşturur. Atmosfer koşullarına bağlı olarak kuruma devam ettikçe beton içerisindeki jel boşluklarından ve kılcal boşluklarından su kaybetmeye devam eder. Çimento jelinden kaybedilen su, hacimde küçülmeye ve büzülmeye neden olur. Kılcal boşluklardan kaybedilen suyun neden olduğu basınç değişimleri nedeniyle de büzülme meydana gelir.

Bahsi geçen rötre çatlaklarını önlemenin bir yöntemi de betonu liflerle donatılamaktır. Lifler sayesinde betonda matrisinde zayıf olarak nitelendirilen süneklik özelliği betona kazandırılmaktadır. Smarzewski (2020) yayınladığı makalede lif katkılarının sünekliği ve enerji yutma kapasitesini arttırdığını bildirmiştir. Ayrıca Sun ve Xu (2009) PP liflerin, tokluğu, yarmada çekme dayanımı, durabiliteyi ve plastik rötreyi iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Lifli beton olarak isimlendirilen bu kompozit yapı malzemesi beton matrisi içerisinde çeşitli liflerin gelişigüzel dağılmasıyla meydana gelir. Çok çeşitli lifler mevcuttur. Doğal lifler, polimer lifler, çelik lifler, karbon, alkali dirençli cam lifler bunlara örnek olarak gösterilebilir.

Doğal lifler, bitki, hayvan veya taş gibi doğadan temin edilebilen liflerdir. Çok sayıda çeşitle örneklendirilebilirler. Eskiden beri kerpişte kullanılan saman doğal lif örneğidir. Günümüzde yüksek mukavemetli betonlarda bazalt taşından elde edilen ve dayanım özellikleri çok yüksek olan bazalt lif yaygınlaşmaya başlamıştır. Polimer lifler diğer adıyla plastik esaslı liflerin başlıcaları polipropileni naylon, perlon, polietilen ve aramid liflerdir. Polipropilenden (PP) üretilen lifler ekonomik olarak düşük fiyatlı olmaları ve betondaki alkali ortama karşı çok iyi direnç gösterebilmeleri nedeniyle polimer lifler içerisinde öne çıkmaktadır (Deb ve diğ, 2018). Çelik teller

uygulamada genellikle üç sınıfta varlık göstermektedir. Düz yüzeyli, çentikli – dalgalı ve uçları kıvrılmış şekilde beton içerisinde kullanılmaktadır. Cam lifleri liflerle donatılı kompozitlerin üretimlerinde en çok kullanılan donatı malzemelerindendir. Uygulamada çok kullanılan bu lif türü, betondaki alkali ortamdan etkilenmekte ve zamanla niteliğini yitirmektedir. Bu nedenle cam liflerinin özel bir hali olan “alkali ortama dirençli” cam lifi kullanılmalıdır. López-Buendía ve diğ. (2013), PP liflerin sağlık ve ekonomik nedenlerle asbest, cam veya çelik liflerden daha avantajlı olduğunu bildirmiştir. Lifli beton olarak isimlendirilen bu kompozit yapı malzemesi beton matrisi içerisinde çeşitli liflerin gelişigüzel dağılmasıyla meydana gelir. Çok çeşitli lifler mevcuttur, bunlar; polipropilen lifler, çelik lifler, bazalt esaslı lifler, karbon, alkali dirençli cam lifler bunlara örnek olarak gösterilebilir.

Betonarme yapı tekniği günümüzde yapı mühendisliğinin en çok tercih ettiği yöntemdir. Betonarme, taneli bir kompozit olan beton ve içerisinde çelik donatıların birleşimiyle oluşur. Tüm dünyada, özellikle ülkemizde en çok tercih edilen yapı tekniğidir. Ekonomik olması, kolay temin edilebilmesi ve bulunduğu kalıbın şeklini alabilmesi gibi tüm olumlu yanlarına rağmen betonda rötrenin meydana gelmesi kaçınılmaz bir durumdur. Aynı yapıda farklı zamanlarda üretilen betonların rötreleri farklı gelişeceği için hacimsel değişimleri de farklı olacaktır ve bu durum iç gerilmelerin oluşmasına neden olacaktır. Bu da betonarme yapının dayanımını etkileyecektir.

Basınç dayanımı yönünde oldukça iyi performans sergileyen ve yük altında yarı gevrek bir davranış sergileyen beton çekme gerilmeleri yönünde maalesef ki zayıftır ve gevrek kırılmaktadır. Bünyesindeki fazla suyu zamanla dışarı atması ve hacimsel olarak büzülme imkânı olmadığında, yani kısıtlandığında betonda rötne çatlaklarının olması kaçınılmazdır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Beton, ekonomik olarak temin edilebilmesi, kolay şekil verilebilmesi ve çevre şartlarına dayanıklı olması gibi sebeplerle günümüzde en çok tercih edilen yapı malzemesidir. Günümüzde beklentilere ve ihtiyaçlara göre üretilebilen çok çeşitli beton tipleri mevcuttur. Ayrıca beton ile tanımlamalar da sürekli güncellenmektedir. Örneğin bir süre önce C50 mukavemetindeki beton yok yüksek basınç sınıfında değerlendirilirken günümüzde bu beton sınıfı ortalama olarak kalmıştır.

Betonarme yapılarda en az dayanımlar kadar önemli olan husus dayanıklılık yani kalıcılıktır. Günümüzde inşa edilen yapıların servis ömürlerinin hem sürdürülebilirlik hem de ekonomik nedenlerle eski yapılara göre çok daha uzun olması beklentisi yüksektir. Betonarme yapılarda kalıcılığı etkileyen en büyük etkenlerin başında korozyon gelmektedir. Normalde beton örtü donatıyı kapladığı sürece ve pH seviyesini koruduğu sürece donatıda korozyon beklenmez. Fakat çatlamlar meydana geldiğinde beton geçirimli olacaktır ve çelik donatı dış etkilere açık hale gelecektir. Dolayısıyla betonarme yapının ömrü öngörülenden çok daha kısa olacaktır. Bu durum büyük ekonomik kayıplara ve çevresel zararlara neden olabilecektir. Bizlere düşen, yapıda kullandığımız betonu olabildiğince geçirimsiz üretmek ve olası çatlakların önüne geçmektir. Bu çalışmada da lif kullanarak beton çatlaklarını önleme üzerinde durulmuştur.

Beton, günümüzün en çok tercih edilen yapı malzemesidir. Ülkemizde yapıların yaklaşık yüzde 97'si betonarme sistem ile inşa edilmediğidir. Saha betonları, kaldırımlar gibi elemanlarda ise ekonomik yönden betonun neredeyse alternatifi yoktur. Yaygın olarak kullanılan bu yapı malzemesinin rötre nedeniyle çatlaması söz konusu yapıların ömrünü azaltmakta, kullanıcısı olan insanların konforunu azaltmakta, ciddi çatlaklarda hayatını riske atmakta ve toplumsal ekonomiye zarar vermektedir. Beton, içerisinde kullanılan çimentonun üretim tekniği itibarıyla çevresel zararları hayli yüksek olan bir malzemedir. Çok yüksek seviyede karbondioksit salınımlarına neden olmakta ve çağımızın sorunu küresel ısınmayı arttırmaktadır. Dolayısıyla bir kere kullanılan betonun çok uzun yıllar servis ömrü vermesi beklenmelidir. Rötre çatlakları ise betonun dürabilitesini ciddi şekilde bozmakta, yapının servis ömrünü kısaltmaktadır. Sürdürülebilirlik açısından da rötre çatlaklarının önüne geçilmesi elzem durumdur.

Betonun iç yapısına mikro ve makro ölçekte baktığımızda agrega ve çimento hamuru fazını görürüz, gözle görülür çatlaklar da bu ölçekte meydana gelir. Mikro ve makro ölçekte yapılan katkılar gözle görülen iyileşmeler sağlayabilir. Öte yandan nano ölçekte baktığımızda bağlayıcı olan C-S-H fazı içerisinde nano boyutta moleküller mevcuttur ve bu boyutta betona yapılacak müdahale ilk etapta gözle görünür olmasa bile betonun karakteristik özelliklerini ciddi şekilde değiştirebilir.

Nano malzeme tekniğinin son yıllarda gelişmesi ile birlikte çeşitli nano boyutta yardımcı bileşenler betonda kullanılmaya başlamıştır. Nano boyutta bir bileşen

betonda direkt olarak çimento fazının temel özelliklerini değiştirebilir, iyileştirebilir. Bu konuda beton çok büyük potansiyele sahiptir. Makro ve mikro ölçekte beton içerisinde kullanılan liflerin yanında çimento fazını direkt etkileyecek olan nano liflerin de betonda kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir. Nano liflerin betonda rötre etkisinin araştırılması ise bu tezin kapsamı içerisinde.

Beton çatlakları ve çatlakları önleme yöntemleri konusunda birçok çalışma mevcuttur. Betonda rötre çatlaklarını gidermek için ise çimento dozajını azaltmak, kıvam suyunu azaltmak, kür malzemeleri ile yapıyı ve betonu korumak, yapısal elemandaki çelik donatı miktarını arttırmak ve rötre azaltıcı katkı kullanmak olarak özetlenebilir. Çimento dozajını azaltmak dayanım problemini beraberinde getirebilir, ayrıca uygulamada zaten çimento beton içerisinde alt sınırlarda kullanılmaktadır. Kıvam suyunu azaltmak ise işlenebilirlik problemini beraberinde getirecektir. Kür malzemeleri ile yapıyı korumak çoğu kez pratik bir yöntem olmaktan uzaktır. Kullanılan çelik donatı miktarını arttırmak ise ekonomik olarak uygun olmayacaktır. Rötre azaltıcı katkıların rötre çatlaklarına etkisi sınırlıdır ve uzun vadede dürabilite açısından ne çeşit sakıncalar doğuracağı halen soru işareti olarak durmaktadır.

Lif katkılı betonların kullanımı son yıllarda yapı endüstrisinde yaygınlaşmaktadır. Söz konusu katkıların beton çatlaklarını önlemede ne derecede faydası olduğu bu çalışmanın amacı olacaktır.

Beton, bünyesindeki suyu zamanla kaybetmesiyle hacimsel olarak küçülmeye çalışacak ve kenarlarından tutulu olduğu için kısıtlanacak, bu durum betonda iç gerilmelerin oluşmasına neden olacak ve çekme gerilmelerine karşı dayanıksız olan beton, bu gerilmeler nedeniyle çatlayacaktır. Hipotez olarak betonda oluşan çekme gerilmelerini beton içine katacağımız polipropilen sentetik liflerin karşılayacağı ve rötre çatlaklarının önüne geçilecek olmasıdır.

Kullanacağımız sentetik liflerin tipleri, ebatları ve ne oranda karıştırılırsa çatlak gelişiminin ne mertebe olacağı bir model olarak ortaya koyularak tezin özgünlüğü ortaya çıkacaktır. Ayrıca literatür taramasında konu ile ilgili yayınlar incelendiğinde ya bir tek kuruma rötresi ya plastik rötre ya da serbest rötre üzerine ayrı ayrı çalışıldığı ancak kombine durumda yani beton hem kısıtlandığında hem de geniş yüzey alanıyla kurumaya maruz kaldığında oluşacak plastik + kuruma rötresi çatlaklarının incelenmesi durumu literatürde boşluk olarak durmaktadır. Çalışmamızın en önemli

aşamalarından bir tanesi hem kısıtlanmış rötre hem de plastik rötrenin aynı anda aynı numunude gözlenmesidir.

Öte yandan literatürde rötre çatlakları konusunda makro lif denemelerinin azlığı göze çarpmaktadır, mekanik özellikleri iyileştirdiği bilinen makro liflerin rötre çatlaklarına etkisi bu çalışma sayesinde ortaya koyulacaktır. Hibrit diye tabir edilen, mikro ve makro liflerin birlikte kullanımı ise bu çalışmanın diğer bir özgün değeri olacaktır.

Yapılan çalışmalara baktığımızda rötre çatlaklarının ölçümleri genellikle makro ölçekte ve gözle görülür seviye olan çatlaklar üzerine olmuştur. Araştırmacılar genellikle çatlak oluşumunu gözleriyle gördükten sonra üzerine model oluşturmuşlardır. Ancak bilindiği üzere beton ilk günden itibaren rötre nedeniyle büzölmeye başlar ve betonda gözle görölmeyen mikro çatlaklar oluşur. Araştırmamızda gözle görölmeyecek kadar küçük olan mikro çatlakların da oluşumları portatif mikroskoplarla gözlenmiştir. Çelik kalıplar üzerine özel olarak hazırlanan, etrafında 360 derece dönebilen, yukarı aşağı hareket edebilen çatlak mikroskobu marifetiyle yapılacaktır.

Son yıllarda nano malzeme teknolojisinin gelişmesi ile birlikte nano teknoloji ürünü liflerin betonda kullanımı, betonun temel mekanik özelliklerine ve rötre çatlaklarına etkisi de bu çalışmada yer almıştır.

Özellikle yoğun rüzgâra maruz kalan saha betonlarında hasır çelik türü donatılar yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu durum ekonomik olarak zararlı, inşa sürecini uzatan ve korozyon riski nedeniyle kısa servis ömürlüdür. Sentetik lifli betonlar sayesinde ise aynı taşıma gücünü çelik donatı kullanmadan, daha ucuz bir şekilde sağlamak mümkün olacaktır.

Çalışmamızın sonuçları betondan beklenen temel özelliklerin gelişmesine, beklenen servis ömrünün daha uzun olmasına ve yapı sektörünün daha sürdürülebilir olmasına katkı sağlayacaktır.

Nano teknoloji ürünü liflerin betonda kullanımı ile ilgili ve ayrıca hem kuruma hem kısıtlanmış ve hibrit lif kullanımı ile ilgili literatürdeki bilgi kısıtlıdır ve çalışmamız literatürdeki bu eksikliklerin giderilmesine katkı sağlayacaktır.

1.2 Çalışmanın Özgün Değeri

Lif katkılı betonlarla ilgili çalışmalara baktığımızda ağırlıkla mekanik özellikler konusunda detaylı incelemelere rastlamaktayız. Çimento esaslı kompozitlerde meydana gelen çatlaklar ve önleme yöntemleriyle ilgili genellikle tek tip lif katkılı araştırmalar yoğunluk göstermektedir. Bilinen üç ölçekteki çatlak gelişimine karşılık üç ölçekteki lif boyutlarıyla araştırma yapmak bu çalışmanın özgünlüğünün bir ayağını oluşturmakla birlikte hibrit kullanımın getirileri ayrıca çok küçük hacimlerde üretimlere sıkışmış gözüken nano lifli üretimleri büyük hacimlere taşımak da bu çalışmanın odak noktalarından biri olmuştur. Öte yandan genel olarak çalışmalar ya mekanik özelliklere ya da çatlak önleme üzerinde durmuştur. Esasında aynı kullanım alanlarına sahip çimento esaslı kompozitlerde her iki büyük alandaki araştırmayı aynı çalışmada yapmak tezin bir diğer önemli ayağı olmuştur.

Kısıtlanmış rötre çatlaklarının gelişimi incelenirken standart ASTM C1581 yöntemine ek olarak plastik rötre etkilerini de kapsayacak şekilde modifiye bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu deney düzeneğinde yine ortada çelikten mamül ring halka kısıtlanmayı önleme görevi görecektir aynı zamanda daha geniş taban alanına yayılmış olan ve rüzgâra maruz kalan beton numunelerde her iki rötre etkisini de birleşik olarak gözlemlene imkânı olacaktır.

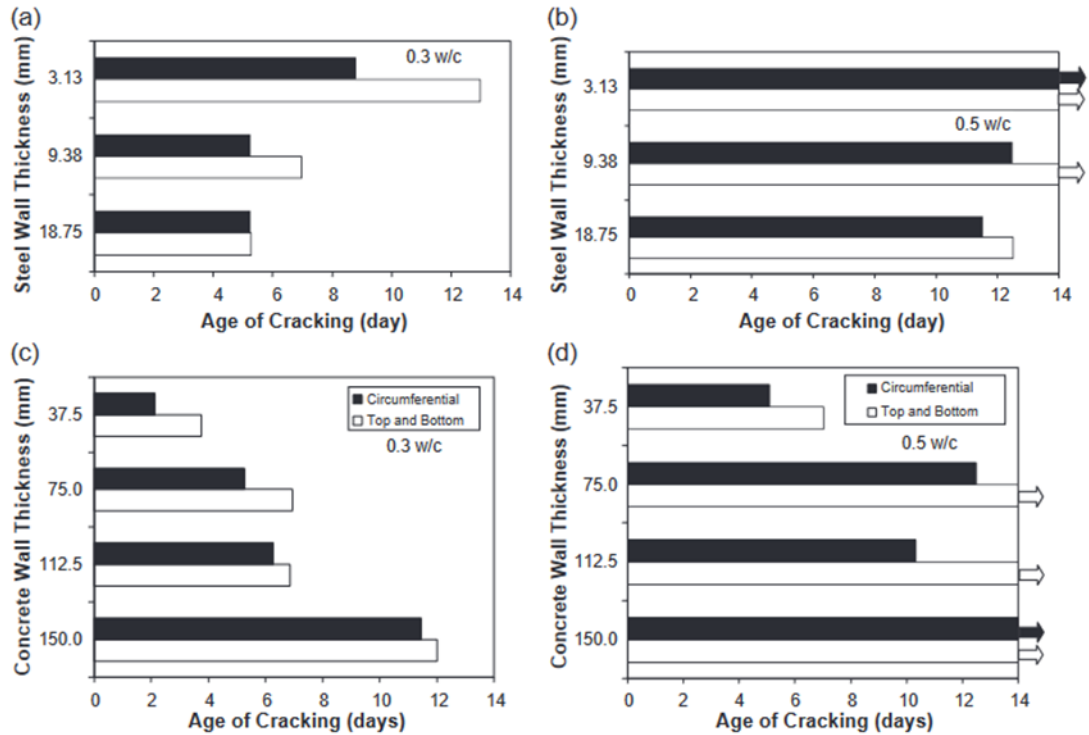
Yukarıda bahsedilen özelliklerle bu çalışma diğerlerinden ayrılarak özgün bir değer taşıyacağını ve literatüre katkı sağlayacağını öngörülmektedir. Çatlak gelişiminin önlenmesiyle birlikte betonda dürabilitenin sağlanabileceği, beton daha uzun servis ömrüne sahip olabileceği dolayısıyla çalışmanın yaygın etkisinin yüksek olabileceği düşünülmektedir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışma kapsamında yerel ve uluslararası alanda yayınlanmış makaleler, yüksek lisans ve doktora tezleri, ders notları, kitaplar ve standartlar olabildiğince araştırılmış ve incelenmiştir. Elde edilen bilgiler özet halinde aşağıda sunulmuştur.

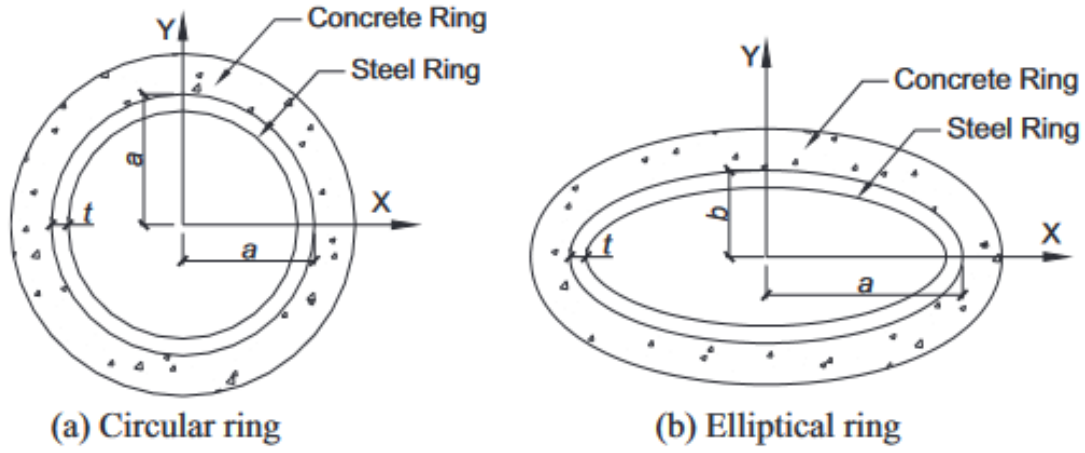
Hossain ve Weiss (2004) yaptıkları çalışmada iki farklı su/çimento oranına sahip çimento bağlayıcı harçların üç farklı çelik kalınlığı bulunan kalıplarla kısıtlanmış rötre ve çatlak incelemesi yapmışlar ve su/çimento oranının ayrıca çelik kalıptaki çelik kalınlığının harçta çatlak gelişimine etki ettiğini straingageler yardımıyla belirlemişlerdir. Çalışma sonuçlarına bakıldığında kısıtlanmış rötre deneylerinde kullanılacak çelik halka kalıbın özellikleri çatlak gelişimine doğrudan etki etmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Hossain ve Weiss (2004)'ın yaptıkları çalışmada elde ettikleri deney sonuçlarının gösterimi.

Dong ve diğ. (2016) yayımladıkları makalelerinde dairesel ve eliptik şekilli çelik halkalar kullanılarak çatlak gelişimi gözlenmiş, ayrıca beton kalınlıkları kalıp et

kalınlığı değiştirilerek çatlak gelişimi matematiksel olarak modellenmiştir. Deney sisteminde straininglerden faydanılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Dong ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada kullandıkları kısıtlandırıcı ring deney aparatlarının geometrik gösterimi.

Shah ve diğ. (1992) yayımladıkları makalelerinde rötre azaltıcı katkı kullanımının betonda serbest rötreyi ciddi şekilde azalttığı ayrıca kısıtlanmış rötre çatlaklarına ise kayda değer şekilde iyileştirme sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca rötre azaltıcı katkı kullanılmış betonlar çelik, polipropilen ve hasır çelik donatılı betonlarla da rötre yönünden kıyaslanmıştır. 42 gün sonunda çatlak genişliği yönünden en iyi sonucun çelik hasır donatılı betonlarda sağlandığı sonucunu elde etmişlerdir.

Uyan ve Karagüler (1995) sundukları bildirilerinde; değişik çimento dozajına sahip harçların farklı kimyasal bileşene sahip süper akışkanlaştırıcılar ile kullanıldığında kuruma rötresi açısından kıyaslama yapılmış ve melamin esaslı süperakışkanlaştırıcıların kuruma rötresine karşı iyi davranış sergilediği ancak naftalin ve lignin esaslı kimyasal katkıları kullanıldığında betonda kuruma rötresinin arttığı sonucuna varmışlardır.

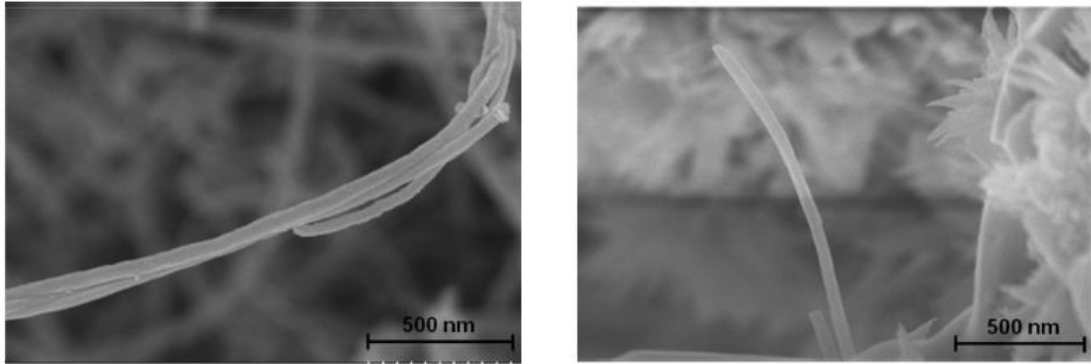
Shah ve diğ. (1994) çalışmalarında; çelik, polipropilen ve selüloz liflerle çelik hasır donatılı betonların kısıtlanmış rötre ve serbest rötre yönünden gelişimi deneysel olarak incelenmiştir. Çok az oranda kullanımlarda bile lif katkıların kısıtlanmış rötre çatlaklarını ciddi şekilde azalttığı sonucuna varmışlardır.

Karagüler ve Shah (1990) çalışmalarında; ring yöntemi ile kısıtlanmış rötre deneyleri yapıldığında gerçek durumun sitümüle edilebileceğini, ucu kancalı çelik lif, düz çelik lif ve hasır çelik kullanımının toplam çatlak gelişimini önlemede ciddi şekilde faydalı

olduğunu, kullanım oranına bağlı olarak rötre azaltıcı katkıların da çatlak gelişime etkili olduğunu, SRA katkıların yüzeyde buharlaşan suyu tutmada etkili olabileceğini ancak SRA katkısındaki bu olumlu durumun geliştirilmesi gereken bir teori olduğunu vurgulamışlardır.

Grzybowski ve diğ. (1989) tarafından yapılan çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanarak betonda çatlak gelişimini deneysel yöntemlerle elde ettikleri verilerle kıyaslamışlar ve modellemelerinin deneysel sonuçlarla örtüştüğü sonucuna varmışlardır.

Metaxa ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada; betonda lif olarak genellikle mikro ve nano liflerin yaygın olarak kullanıldığını, oysaki geleneksel donatıların nano boyuttaki beton yapısına etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında karbon nano tüp ve karbon nano fiber kullanarak bu liflerin düzgün dağılıp dağılmama durumuna göre betonda otojen rötre yi ne kadar önlediğini araştırmışlardır. Sonuç olarak nano fiberlerin çimento matrisin sadece mekanik özelliklerini değil aynı zamanda erken yaş şekil değiştirme kapasitesini de iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Önemle vurguladıkları husus ise, çok küçük boyutta yapıya sahip nano liflerin beton dağılımının zor olabileceği ve bu problemi aşmak için ultrasonik karıştırıcılar kullanmak gerektiğidir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Ultrasonik enerji kullanılarak yapılan MWCNT karışımına ait SEM görüntüsü (Metaxa ve diğ. 2013).

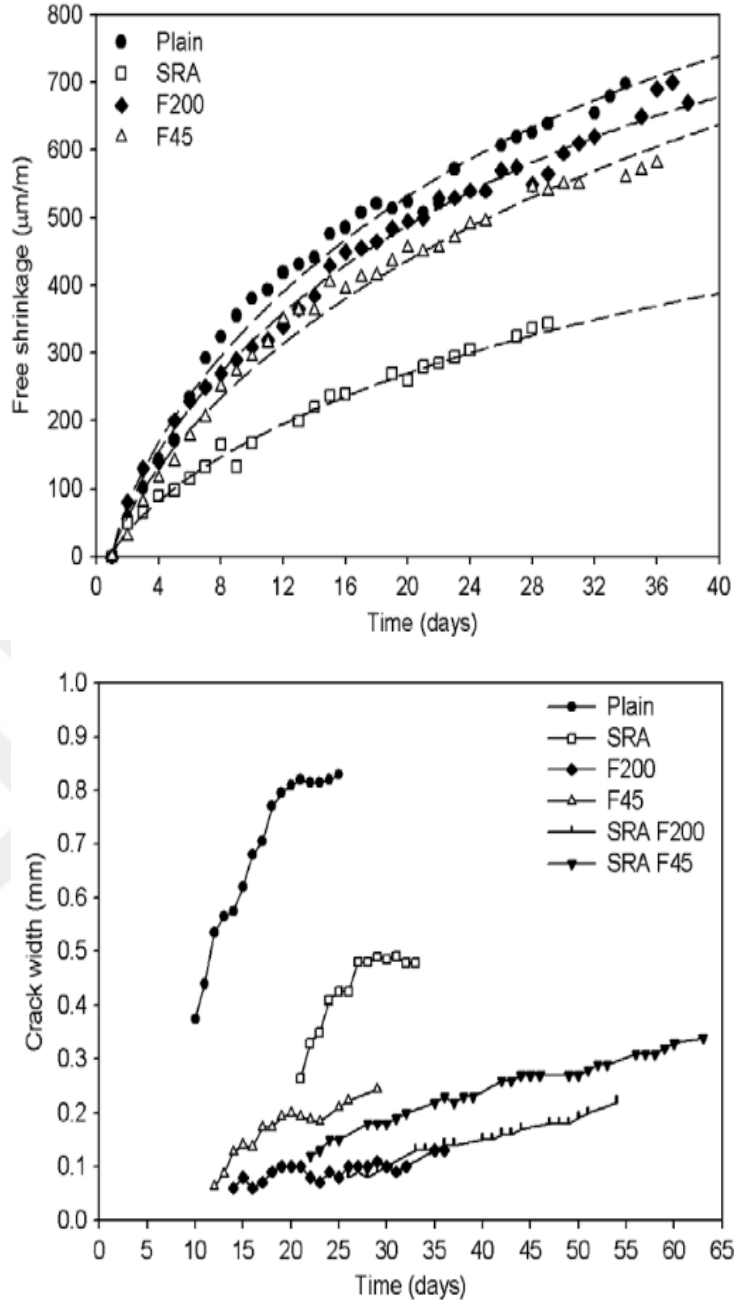
Yousefieh ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada poliolefin ve çelik olmak üzere üç farklı lif donatı kullanarak betonda kısıtlanmış rötre çatlaklarını ring yöntemi ile çalışmışlardır (Şekil 2.4). Sonuç olarak; lif donatıların betonun basınç mukavemetinde kayda değer bir gelişme sağlamadığı, kuruma rötresinde oluşan gerilmenin liflerin elastisite modüllerine bağlı olduğu, liflerin fiziksel özelliklerinin çatlak gelişimini önleme noktasında direkt etkili olduğu, kanca şekilli olmalarından dolayı çelik liflerin

en iyi performans sergilediği, polipropilen liflerin de çatlak önleme konusunda ciddi fayda sağladığı sonuçlarına ulaşmışlardır.



Şekil 2.4 : Gerinim ölçme tekniği kullanılarak teşkil edilen kısıtlanmış rötre deney düzeneği (Yousefieh ve diğ, 2017).

Passuello ve diğ. (2009) yaptıkları çalışmalarında eşit dozajlı çimento ve benzer mix dizayna sahip ancak değişik oranlarda mikro, makro lifler ve bunlarla birlikte veya bunlardan hariç kullanılan SRA katkılarının ring yöntemiyle yapılan kısıtlanmış rötre çatlaklarına etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında sonuç olarak rötre azaltıcı katkıların ilk çatlak oluşumunu ötelediği ve %40 oranda çatlak miktarını azalttığı buna mukabil lif katkıların çatlağın oluşum zamanına ciddi etki edemediği ama çatlak gelişimini %70 ila %90 oranında azalttığını, rötre azaltıcı katkıların liflerle birlikte kullanımında ise en iyi sonucun elde edildiğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında iki farklı teorik yöntemle hesaplayarak öngördükleri çatlak oluşum zamanını deneysel olarak da tespit ettiklerini vurgulamışlardır.



Şekil 2.5 : Passuello ve diğ. (2009) yaptıkları deneysel çalışmada serbest rötre ve kısıtlanmış rötre kaynaklı çatlak açılmalarında buldukları sonuçlar.

Konsta-Gdoutos ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmalarında; iki farklı tipteki çok katmanlı karbon nano tüplerin çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini ne ölçüde geliştirdiğini araştırmışlardır. Sonuç olarak nano ölçekte matris fazında kayda değer gelişmeler sadece mekanik özellikler bakımından değil otojen rötre bakımından da sağlandığı sonucuna varmışlardır.

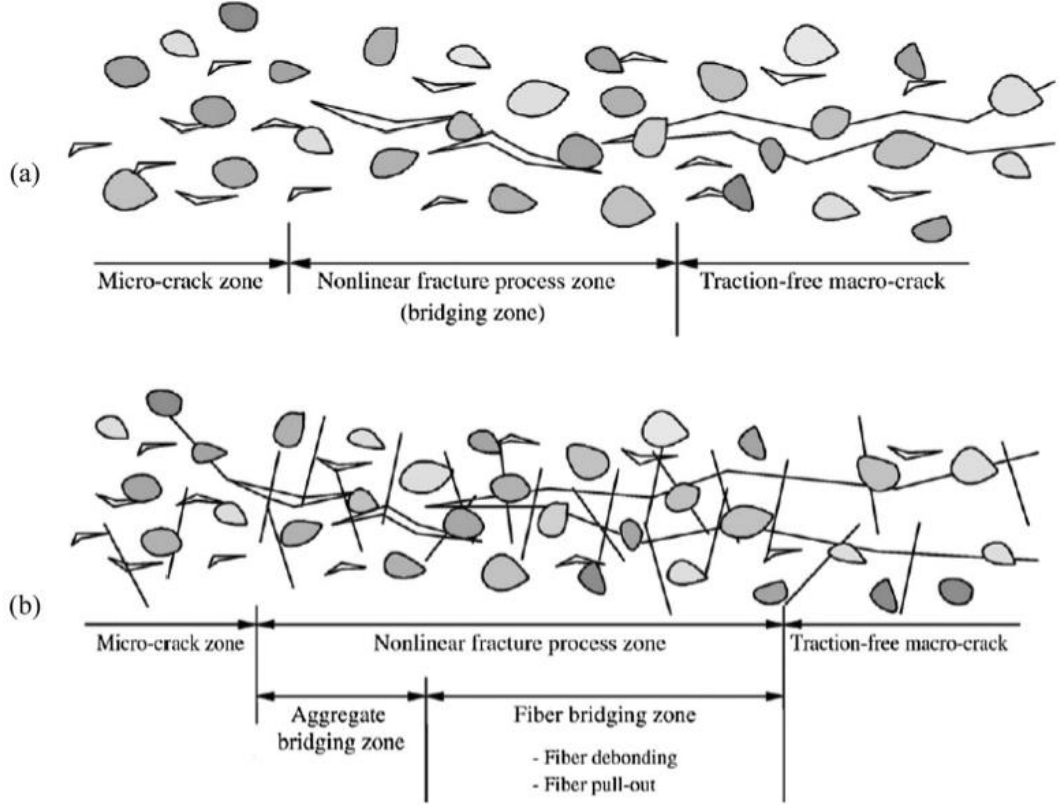
Xu ve diğ. (2015) yayımladıkları makalelerinde özetle; çimento esaslı kompozitlerde çatlak oluşmasının nedeninin gevrek davranış olduğunu, geleneksel olarak kullanılan

elik veya sentetik liflerin çatlak oluşumuna direnç sağladığını ancak bu faydanın çatlak makro düzeyde iken yerine getirilebildiğini, mikro düzeyde geleneksel liflerin etkinliğinin kısıtlı olduğunu bu nedenle karbon nano tüplerin boyut itibariyle çok küçük olmalarından dolayı imento esaslı malzemelere mikro düzeyde etki edebildiklerini ve mekanik özelliklerini ciddi oranda geliştirdiğini saptamışlardır. Söz konusu çalışmalarında karbon nano tüplerin dağılım problemini zlemek için öncelikle sürfaktan içinde beklettikleri ardından santrifüj yaptıklarını belirtmişlerdir. Çimento miktarına göre %0 ila %0,2 aralığında çeşitli oranlarda denedikleri çok katmanlı karbon nano tüp katkılarının deney sonuçlarında, basınç dayanımının %22 arttığı, imento hamurunun eğilme mukavemetinin iyileştiği, harçtaki boşluk miktarının ise azaldığını tespit etmişlerdir.

Kawashima ve Shah (2011) yaptıkları çalışmalarında özetle; son yıllarda yüksek performanslı betonların daha yaygın kullanıldığını ancak otojen rötrenin bu tip betonlarda sorun olduğunu ve çözüm olarak ise iten krlemenin sıklıkla kullanıldığını beyan etmişlerdir. Selüloz lifi tercih etmelerinin nedeni ise yapı itibariyle selülozun suyu bir miktar bünyesinde tutabildiği, dolayısıyla sentetik veya elik liflere göre otojen rötre çatlakları bakımında daha avantajlı olabileceği yönündedir. alışmalarının sonuçlarına göre, selüloz liflerin otojen rötreye karşı krleme yönünden etkili olduğu ancak çok yüksek miktarlarda kullanmak gerektiği, yüksek miktarda kullanımın ise betonun işlenebilirliği üzerinde olumsuz etkisi olduğu, selüloz liflerin kuruma rötresi üzerinde etkisinin kısıtlı olduğu ancak çatlak civarlarındaki gerilmeleri taşıyabildiğidir.

Xie ve diğ. (2021a) alışmalarında özetle, kırılma mekaniğinin çeşitli teorik modellerini ve lif donatılı imento esaslı kompozitler için kırılma parametrelerinin farklı test yöntemlerini tanıtımlarıdır. Liflerin atlak köprüleme ve matris fazla aderans sağlayabilme yeteneği sayesinde kırılma mekanizmasının yalın betondan farklı olduğunu vurgulamışlardır (şekil 2.6). Kırılma gerçekleştikten sonra enerji yutma kapasitesinin ise liflerin uzunluğuna, geometrisine ve kayma dayanımı verimine göre değişkenlik gösterebileceği belirtilmiştir. Hibrit liflerin tekil liflerin faydalarını yükseltebileceği, bir sinerjik etki oluşturacağını bildirmişlerdir. Çeşitli deney yöntemleriyle özellikle eğilme mukavemeti yönünden elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada özellikle vurguladıkları noktalardan birisi ise betonda

fiber donatı kullanımının çatlakları önleme veya oluşan çatlakları köprüleme yeteneğinin epey yüksek olduğudur.

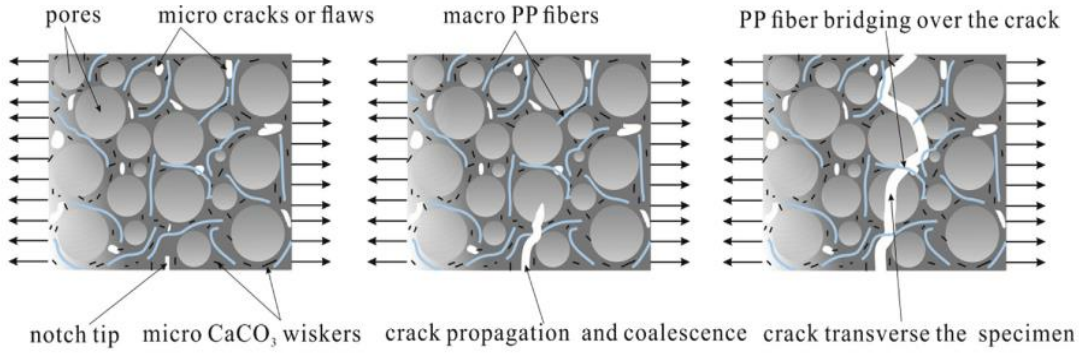


Şekil 2.6 : Betonda çatlak gelişimine karşı direnç mekanizmaları, a) yalın beton b) lif katkıli çimento esaslı kompozit (Xie ve diğ., 2021a).

Adesina (2021) makalesinde, bazalt fiber donatıların betonda işlenebilirliği epey azalttığı, bunun önüne geçebilmek için ise, fiber donatı dojazının azaltılması ve akışkanlaştırıcı katkıların kullanılmasını tavsiye etmektedir. Öte yandan fiber donatıların görece kısa uzunlukta tercih edilmesi de işlenebilirlik özelliği bakımından uzun fiberlere göre daha avantajlı olacağını belirtmesidir. Rötire yönünden yaptığı çalışmada ise plastik rötire için en uygun oranın 25 mm uzunlukta fiberler için %0,3, kısıtlanmış rötire için ise en uygun oranın %0,05 olduğunu kanaatine varmıştır.

Zhang ve diğ. (2020) çalışmalarında verdikleri bilgiye göre polipropilen fiberler dünyada beton içerisinde polyesterden sonra en çok kullanılan ikinci fiber donatıdır. Alkali ortamlara dayanıklı olması, düşük maliyetli olması, kimyasal kararlılığının yüksek olması karşılaştırılan diğer fiber çeşitlerinden özellikle PVA'ya karşı tercih edilmesinin sebepleri arasında gösterilmektedir.

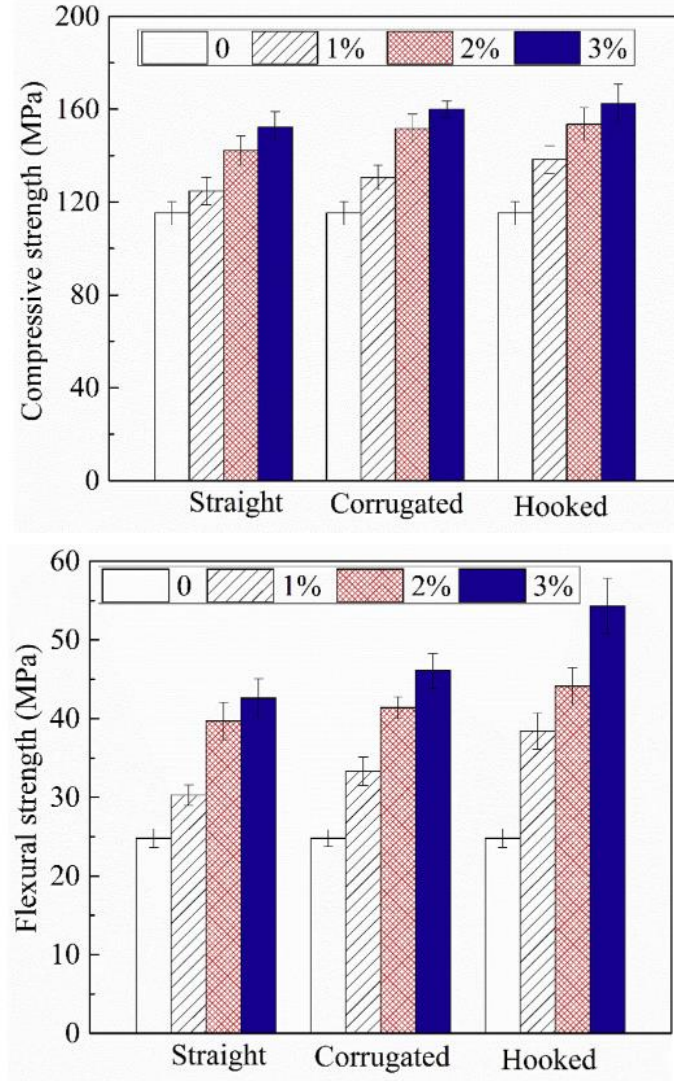
Yang ve diğ. (2020) çalışmalarında polipropilen, kalsit esaslı fiberler ve bunların çeşitli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen hibrit fiberli hafif betonların eğilme ve kırılma mekaniği özellikleri araştırılmıştır. Değerlendirmeleri özetle, kalsit kullanımının tek başına az etkili olduğu ancak polipropilen liflerle desteklendiğinde mekanik özellikler ve kırılma mekaniği özellikleri yönünden hafif betonlarda ciddi iyileşme sağladığını belirtmişlerdir (Şekil 2.7). Kalsit dolgulu polipropilen lifli malzemeler son yıllarda çeşitli endüstrilerde kendilerine kullanım alanı bulmuşlardır.



Şekil 2.7 : Eğilme deneyinde çentikten itibaren devam eden çatlağın hibrit lifler tarafından köprülenmesi (Yang ve diğ, 2020).

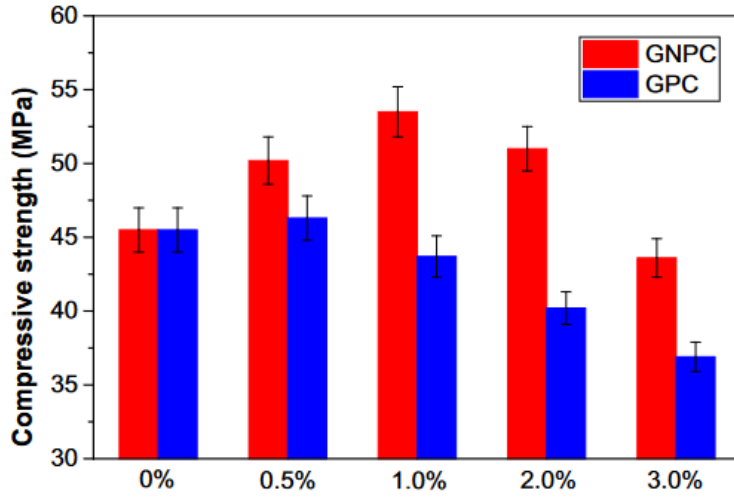
Bertelsen ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, plastik rötre kontrol altında tutmak için eğer micro fiber kullanılıyorsa hacminin %0,1'in, eğer makro fiber kullanılıyorsa hacminin %0,5'in üzerinde olması gerektiğini vurgulamışlardır. Genel olarak fiber hacmi arttıkça pozitif etkinin arttığını belirtmişlerdir. Öte yandan yüzey çatlaklarının mertebesi ve fiber uzunluklarının arasında düzgün bir korelasyon sağlanamadığını da ayrıca bildirmişlerdir.

Wu ve diğ. (2019) yayınladıkları makalelerinde, ultra yüksek mukavemetli betonlarda çeşitli şekillerdeki çelik fiberler kullanmışlar ve lif dozajı arttıkça basınç ve eğilme mukavemetlerin arttığı, rötre azaldığı sonucuna varmışlardır (Şekil 2.8). Optimum dozaj olarak ise %2'yi tavsiye etmişlerdir.

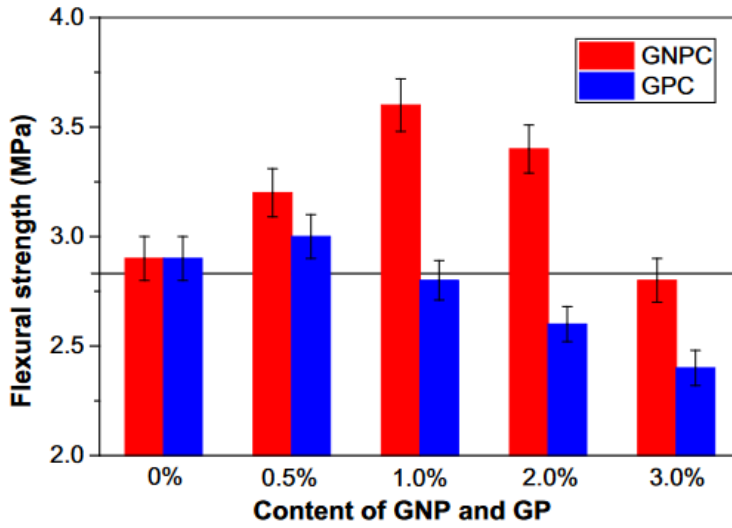


Şekil 2.8 : Dozaj ve lif geometrisinin basınç ve eğilme dayanımlarına etkisi, Zemei Wu ve diğ. (2019).

Dong ve diğ. (2021) çalışmalarında özetle, nano levha boyut mertebesindeki grafen ve grafit filler malzeme katkılı çimento esaslı kompozitlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir (Şekil 2.9). Nano materyal miktarı arttıkça çimento hidratasyonunun ivmelendiği belirtmişlerdir. 4 farklı üretim yaptıklarını ve dozaj olarak %0,5, %1,0, %2,0, ve %3,0 seçtiklerini, GNP katkılı çimento esaslı kompozitlerin maksimum dayanım özelliklerine %1 GNP katkısı olduğunda ulaşıldığını bildirmişlerdir. Dozaj oranları, bağlayıcı miktarının ağırlığına oranla ağırlıkça çalışılmıştır.



(a) Compressive strength



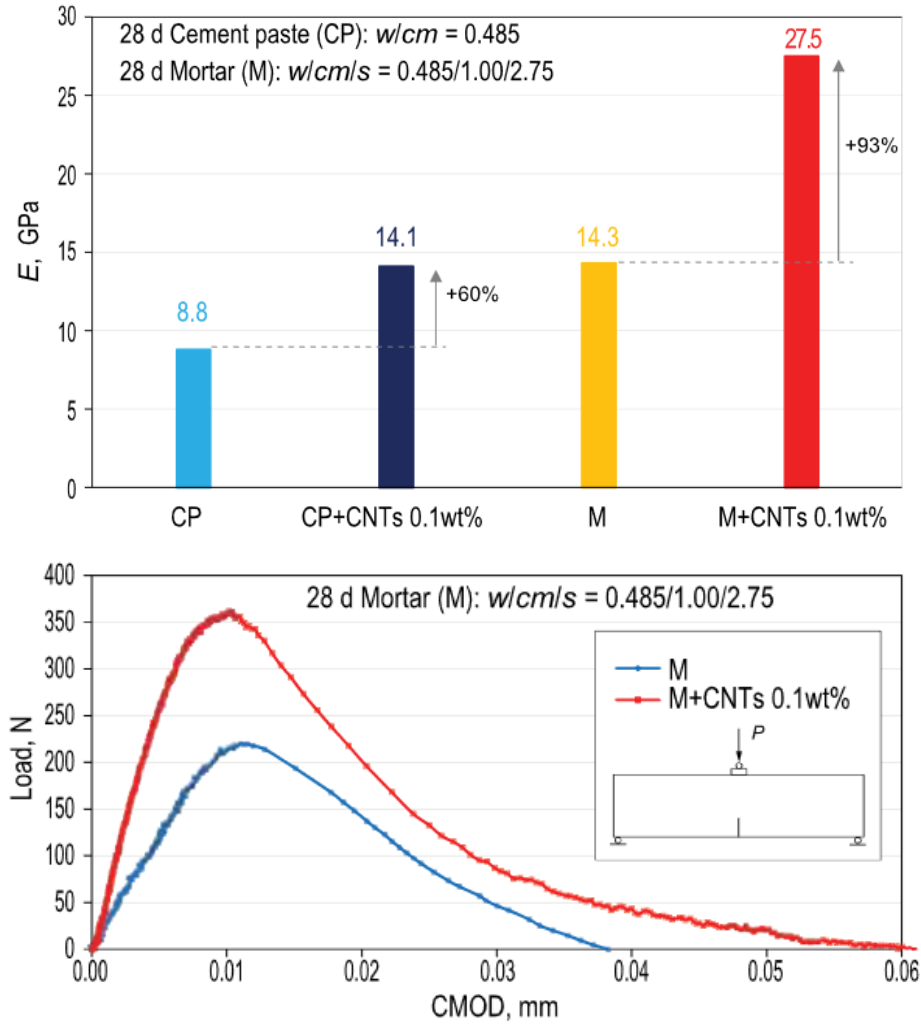
(b) Flexural strength

Şekil 2.9 : Graphene nanoplate (GNP) ve graphite plate (GP) katkılı harçlarda yapılan basınç ve eğilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar (Dong ve diğ, 2021).

Shao ve diğ. (2021) çalışmalarında özetle, kauçuk lastik artıklarından 2 farklı ölçüde kauçuk kullanarak harç bazındaki çimento esaslı kompozitlerde kısıtlanmış rötre çatlaklarını incelemişlerdir. Her iki ölçü boyundaki kauçuk katkıların çatlak gelişimini önlemede etkili olduğu ve optimum oranın kendi kullandıkları değerler içerisinde %20 olduğunu bildirmişlerdir. Öte yandan çimento esaslı harçlarda kauçuk kullanımının basınç mukavemetini önemli ölçüde azalttığı da bilinmelidir.

Shah ve Konsta-Gdoutos (2017) yılında yayınlanan çalışmalarında özetle, betonda elastisite modülünün nasıl yükseltilebileceği sorgulanmış, çözüm olarak ise karbon nano tüp katkısı ileri sürülmüştür. Çok düşük bir oran olarak sayılabilecek 0,20

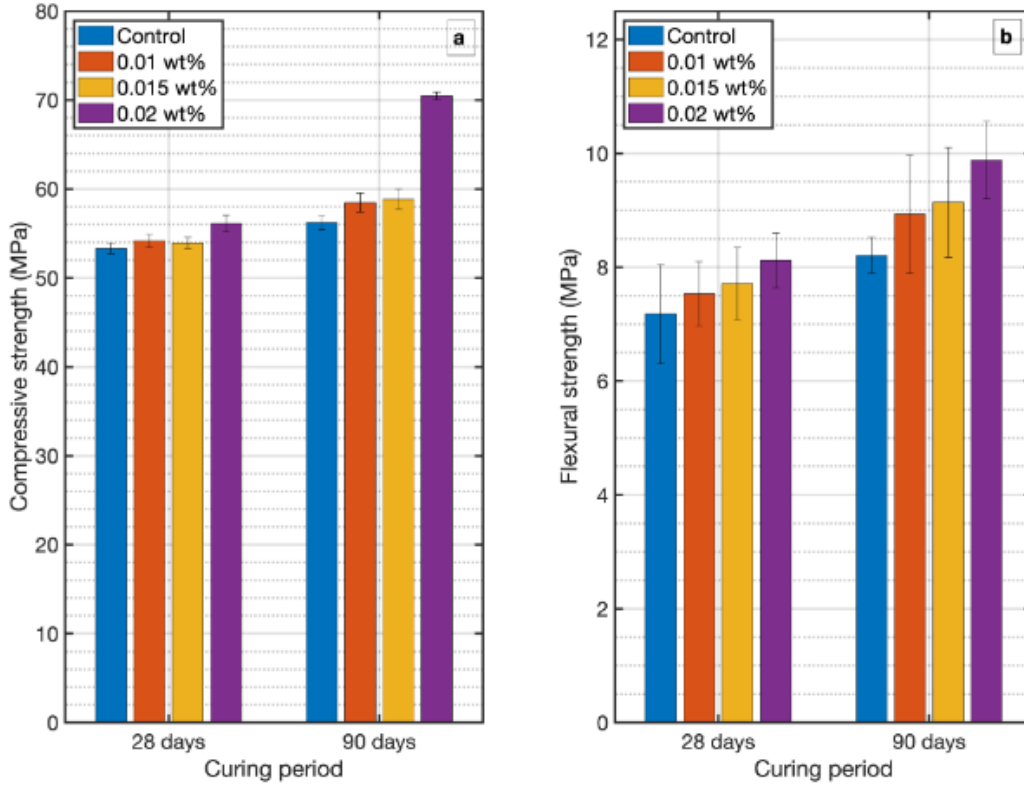
mertebelerindeki su/çimento oranı ile yapılan üretimlerde yüksek sayılabilecek bir oranda (%0,1) grafen karbon nano tüp ekleyerek basınç elastisite modülünde (MOE) % 93'e varan artışlar ölçüldüğü, eğilmede esneklik modülünde % 56'e varan artışlar olduğu, mukavemetlerde de artışlar olduğu, bu artışlara neden olarak ise karbon nano tüplerin çimento hamuru matrisi ile agrega arasında nano ölçek düzeyinde bir bağ oluşturduğunu, kompozit yapı içerisindeki zayıf kısmın güçlendiğini öne sürmüştür (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Grafen karbon nano lif katkısının düşük su/çimento oranına sahip harçlarda a) elastisite modülüne etkisi, b) çatlak ağzı açılma deplasmanına etkisi (Shah ve Konsta-Gdoutos, 2017).

Prada ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmalarında özetle, maksimum agrega dane çapı 2mm olan CEN standart harcı üretimlerine çeşitli oranlarda çok katmanlı karbon nano tüpler eklemişler ve sonuçlarını araştırmışlardır. Çok düşük sayılabilecek oranlarda (%0,01 - %0,02) aralığında kullandıkları çok katmanlı karbon nano tüplerin 28 günlük basınç dayanımlarına etkisinin maksimum %5 civarında kaldığı, eğilme dayanımlarına

etkisinin ise maksimum %13 mertebesinde olduğunu bildirmişlerdir. 90 güne uzayan ileri yaşlarda ise çok katmanlı karbon nano tüp etkisinin arttığını ayrıca bildirmişlerdir (Şekil 2.11).

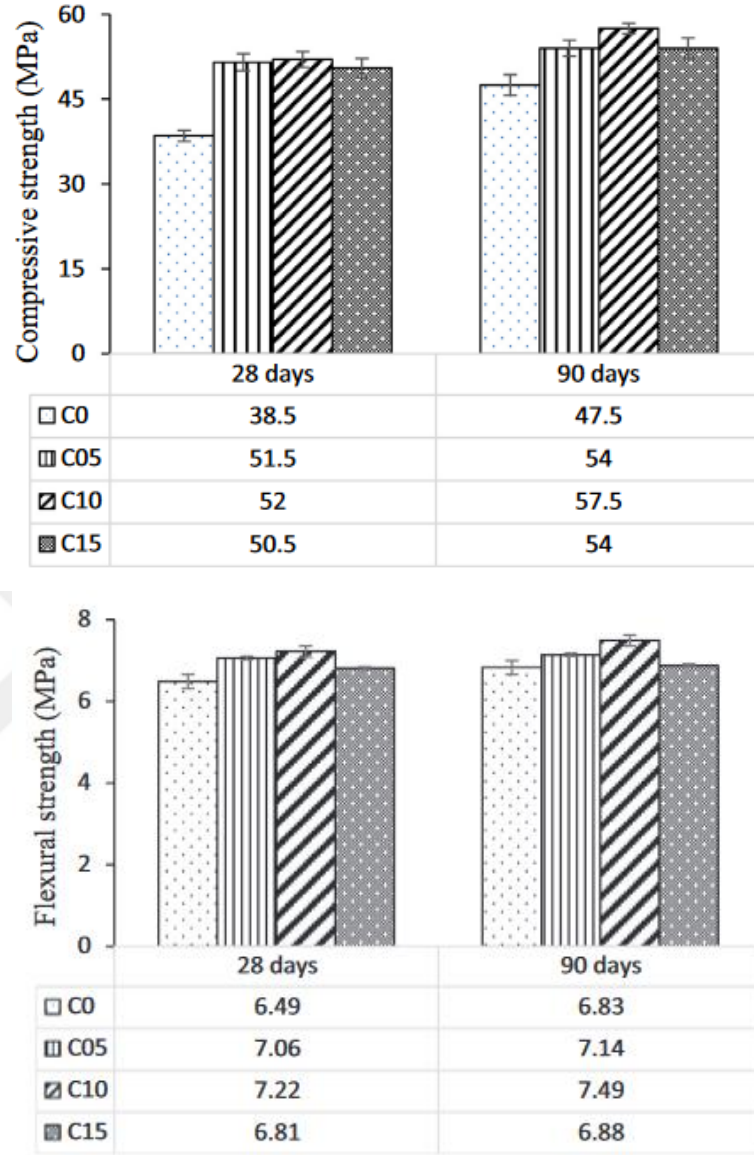


Şekil 2.11 : Çok katmanlı karbon nano tüplerin (MWCNT) a) basınç, b) eğilme dayanımlarına etkisi, (Cerro-Prada ve diğ, 2021).

Assi ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmalarında, çok katmanlı karbon nano tüplerin çimento esaslı kompozitlere nasıl eklendiğini tarifleyen literatürde yer alan çeşitli üretim tekniklerini irdelemişlerdir. Çalışmalarında özetle, karbon nano tüplerin topaklanma ve dağılım problemini çözmek için, yüksek oranda su kesici kimyasal katkıların yalnız kullanılabildiği, bu katkıların ultrasonik batırma tekniği ile birlikte kullanılabildiği, asitte bekletme ve vibrasyon gibi çeşitli tekniklerin de yer aldığını bildirmişlerdir. Kullanılan yöntem, kullanılan karbon nano tüpün özellikleri ve oranları mekanik özellikler bakımından elde edilen sonuçları epeyce etkilediğini belirtmişlerdir. Ultrasonik batırma tekniği ile üretmenin çok yaygın ve etkin olduğu ancak bu tekniğinin hacimsel olarak epey küçük ölçekte üretimlere izin verdiğini vurgulamışlardır.

Sedaghatdoost ve diğ. (2018) makalelerinde özetle, %0,05, %0,1 ve %0,15 oranında çok katmanlı karbon nano tüp içeren, su/çimento oranı yaklaşık 0,5 olan, CEN standart

harcına benzer içerikli harç üretmişlerdir. Basınç dayanımı açısından %30 civarında bir iyileşme sağlandığı, eğilme dayanımı açısından ise %5 ila %11 aralığında bir iyileşme sağlandığını bildirmişlerdir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 : Çok katmanlı karbon nano tüplerin (MWCNT) a) basınç, b) eğilme dayanımlarına etkisi, (Sedaghatdoost ve diğ, 2018).



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada çimento esaslı kompozitlerde çatlak gelişiminin önlenmesi amacıyla lif katkıları kullanılmıştır. Lif katkıları üç ebatla kullanılmış, mikro ve makro ölçekte polipropilen (PP) lifler, nano ölçekte ise çok katmanlı karbon nano tüp (MWCNT) kullanılmıştır. Mikro ve makro lifler için maksimum agrega dane çapı 10mm olan beton numuneler üretilmiş, nano lif için ise maksimum agrega dane çapı 2mm olan harç numuneler kullanılmıştır. Nano lifli numunelerde kısıtlanmış rötre deneylerini gerçekleştirebilmek için orijinal ASTM C1581 standardının 1/4 ölçeğinde hazırlanmış çelik kalıplar kullanılmıştır. Deney sürekliliğini sağlayabilmek ve arada bağlantıyı kurabilmek adına mikro lifler hem harç ölçeğinde hem de beton ölçeğinde kullanılmışlardır. Her iki tip ölçekte de serbest rötre ölçümleri uçlarına metal pimler takılmış dikdörtgenler prizması şeklindeki numunelerde yapılmıştır.

Mekanik özellik deneylerinde ise eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm deneysel çalışmalar aşağıda detaylarıyla tarif edilmiştir.

3.1 Malzemeler

3.1.1 Beton

Deneylerde kullanılan beton numuneler üretilirken, sıradan CEM I 42,5 portland çimentosu ve içilebilir özellikteki şehir şebeke suyu kullanıldı. Daha iyi bir işlenebilirlik sağlayabilmek adına kullanılan çimentonun %1'i oranında süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı polikarboksilat esaslıydı. Çimentonun bileşimi, bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir. Agrega olarak Çanakkale Biga yöresinden temin edilen dere kumu ve kırma kum ve kırmataş kullanılmıştır. Agregaların bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Söz konusu agregalara ait elek analizi ve granülometri eğrileri Çizelge 3.4 ve Şekil 3.1'te verilmiştir. Üretilen tüm beton numunelerde içerik oranları ve dolayısıyla agregaların oranları sabit tutulmuştur. Lif

olarak ticari piyasadan kolaylıkla temin edilebilen mikro ve makro boyutlardaki polipropilen esaslı lifler kullanılmıştır. Beton numunelerde ebatlardan ve pratik kullanımdaki zorluktan dolayı nano lifler kullanılmamışlardır. Nano lif boylarının çok küçük olması etkinliğinin harç bazlı kompozitlerde daha iyi göstereceği düşünülmüştür. Polipropilen liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Çimento fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
Priz başlangıcı (dakika)	135 - 180
Priz bitişi (dakika)	190 - 230
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,16 – 3,21
Genleşme (mm)	0 - 2
Özgül yüzey alanı (Blaine) (cm ² /g)	3500 - 4000
Yığın yoğunluğu (g/l)	980 - 1030
2 Günlük basınç dayanımı (MPa)	26,0 – 35,0
28 Günlük basınç dayanımı (MPa)	56,0 – 61,0

Çizelge 3.2 : Çimento kimyasal özellikleri.

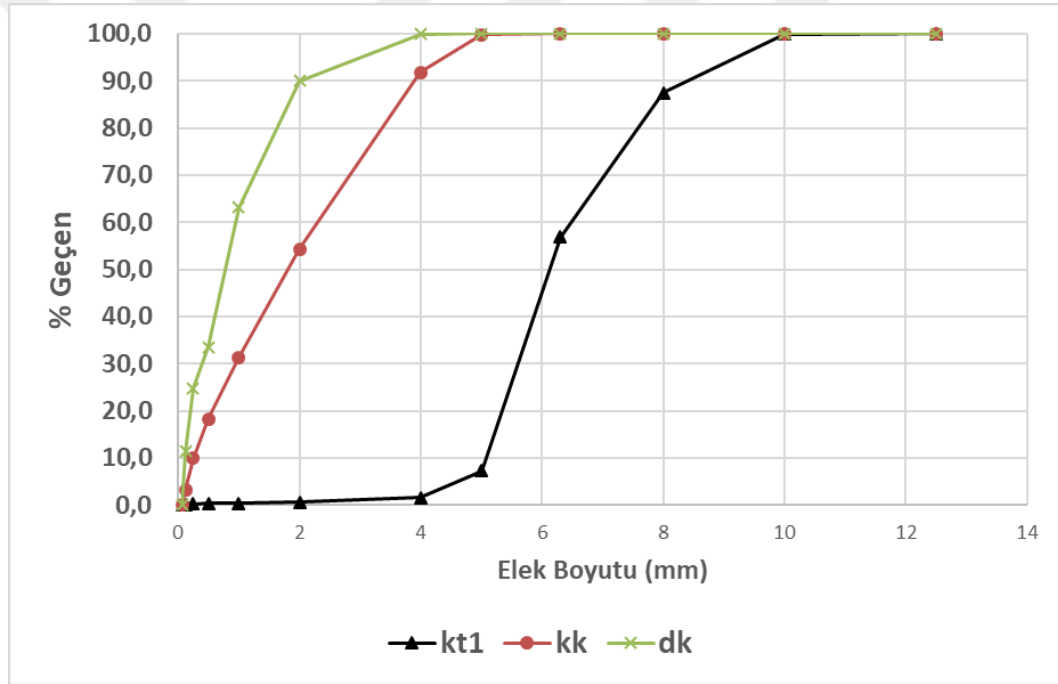
Özellik	Değer
SO ₃ (%)	2,40 – 3,20
MgO (%)	1,40 – 2,00
Kızdırma kaybı (%)	2,00 – 2,80
Çözünmeyen kalıntı (%)	0,20 – 0,80
Cl (%)	<0,05
Alkali eşdeğeri Na ₂ O + 0.658 K ₂ O (%)	0,40 – 0,80
Serbest kireç (%)	1,00 – 1,80

Çizelge 3.3 : Beton numunelerde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.

Özellik	Kırma taş (4-10 mm)	Kırma kum (0-4 mm)	Dere kumu (0-2 mm)
Özgül ağırlık, (g/cm ³)	2,71	2,69	2,60
Ağırlıkça su emme oranı (%)	0,60	1,21	1,39

Çizelge 3.4 : Agregat elek analizi (kümülatif % geçen değerler).

Elek Boyutu (mm)	Kırma taş (4-10 mm)	Kırma kum (0-4 mm)	Dere kumu (0-2 mm)
12,5	100	100	100
10	100	100	100
8	87,5	100	100
6,3	56,9	100	100
5	7,3	99,7	100
4	1,6	91,8	99,9
2	0,5	54,3	89,9
1	0,4	31,3	63,1
0,5	0,3	18,3	33,6
0,25	0,3	9,9	24,8
0,125	0,1	3,3	11,4
0,063	0,0	0,0	0,0



Şekil 3.1 : Kullanılan agregalara ait granülometri eğrileri.

Çizelge 3.5 : Kullanılan PP liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri.

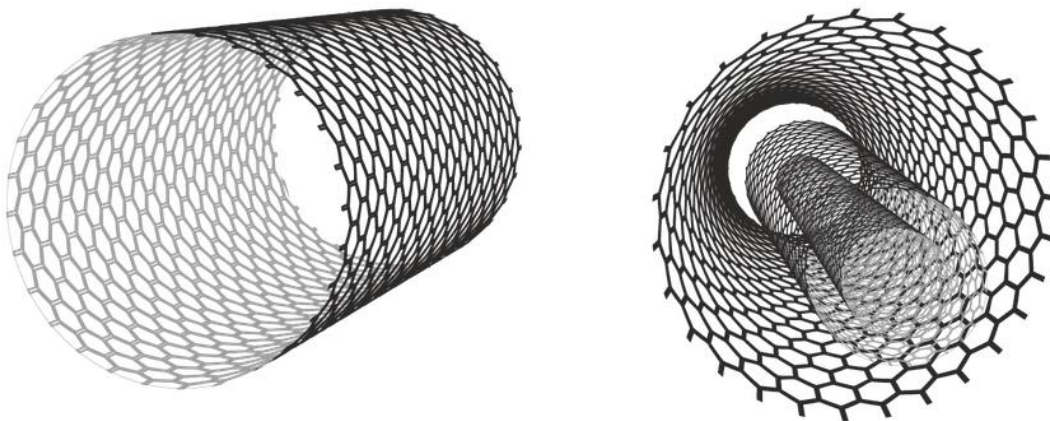
Özellik	Mikro PP	Makro PP
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	0,91	0,91
Elastisite modülü (GPa)	5,4	3,5
Çekme dayanımı (MPa)	613	650
Uzunluk (mm)	12-14	44-54
Eşdeğer çap (mm)	0,032	0,72

3.1.2 Harç

Çok katmanlı karbon nano tüplerin (MWCNT) kısıtlanmış rötre, serbest rötre ve mekanik özellikler bakımında etkisini inceleyebilmek için beton gibi iri agrega bileşenlerine sahip numuneler yerine daha küçük agrega bileşenlerine sahip harç numuneler üretilmiştir. Tedarik etmesi oldukça güç ve ekonomik olarak epeyce pahalı olan MWCNT numunelerin deneylerini harç bazında daha küçük hacimli numunelerle yapmak daha rasyonel olmaktadır. Pratikte kullanım ve literatürdeki diğer çalışmacıların örnekleri de harç bazında çalışmayı daha akılcı kılmaktadır. Harç karışımların üretimlerinde aynı betonda olduğu gibi CEM I 42,5 R çimento ve polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanıldı. Agrega olarak sürekli granülometriye sahip maksimum dane çapı 2 mm olan standart CEN kumu kullanılmıştır. İlgili kuma ait elek analizi Çizelge 3.6'da gösterilmiştir. Lif takviyesi olarak kullanılan MWCNT'lere ait bazı özellikler Çizelge 3.7'de gösterilmiştir. Nuaklong ve diğ. (2021), CNTlerin tek ve çok katmanlı şeklinde iki gruba ayrılabilceğini ve MWCNT'lerin beton karışımlar için daha uygun olduğunu belirtmiştir. Shi ve diğ. (2019) CNT liflerin harçlarda basınç ve eğilme dayanımlarını arttığını bildirmiştir.

Çizelge 3.6 : Standart CEN kumu elek analizi.

Elek göz açıklığı (mm)	2.00	1.60	1.00	0.50	0.16	0.08
Kümülatif kalan (%)	0	6	34	67	88	99



Şekil 3.2 : Tek katmanlı ve çok katmanlı karbon nano lif görseli.

Çizelge 3.7 : Çok katmanlı karbon nano tüp (MWCNT) özellikleri.

Renk	Karbon saflığı (%)	Uzunluk (µm)	Dış çap (nm)	Yüzel alanı (m ² /g)
Siyah	95	0.5-500	10-30	40-300

3.2 Karışım Oranları

Aynı su/çimento oranına sahip beton ve harç olarak 2 farklı karışım dizayn edilmiştir. Beton dizaynında özellikle birleşik rötre etkilerini hızlandırılmış şekilde gözlemlene imkânı sağlayabilecek aşırı su isteyen, agregada ince malzeme miktarı fazla olan karışım tasarlanmıştır.

3.2.1 Deneyler için yapılan ön hazırlıklar ve ön deneyler

Rötre deneylerinde ortamdaki bağıl nem ve sıcaklık miktarı çok önemli parametrelerdir. İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzeme Laboratuvarı'nda nem ve sıcaklık kontrollü bir ortamın eksikliği nedeniyle önce bu ortam hazırlanmıştır. Boşaltılan bir odanın etrafı tamamen yalıtıcı EPS malzeme ile kaplanmış, oda hacmini karşılayabilecek şekilde 1 adet klima ve 2 adet nem alıcı cihaz ve 1 ısıtıcı temin edilmiştir (Şekil 3.3). Sıcaklık ve nemi saatlik olarak ölçen ve yazılı aracılığı ile araştırmacıya sürekli olarak bilgi aktarabilen bir düzenek de kurulmuştur. Dolayısıyla olası sıcaklık ve nem sapmalarının önüne geçmek hedeflenmiştir.



Şekil 3.3 : Rötire deneyleri için oda hazırlanması.

Plastik rötire deney düzeneğinde bir standardizasyonun sağlanabilmesi adına numunelerin maruz bırakıldığı rüzgârın hızını ölçebilecek seyyar anomometre temin edildi. Serbest rötire ölçümleri için 40 x 40 x 160 mm ölçülerinde pimli üretime imkân verecek şekilde kalıplar imal edildi ve 1/1000 mm hassasiyetli kompratörlü ölçüm aleti temin edildi. Eğilme deneyleri için LVDT ve datalogger temin edildi.



Şekil 3.4 : Kullanılan malzemelere ait görseller; agrega, mikro fiber, makro Fiber, çimento.

İlk olarak Temmuz 2019’da su/çimento oranı 0,5 olan referans ve lifli olacak şekilde iki tip üretim yapıldı. Kısıtlanmış rötre için ASTM C1581 standardına uygun üretim yapıldı. Plastik rötre düzeneği için daha önceden üretilmiş ve 30 x 50 cm ebatlarındaki temsili yer betonlarının üzerine soğuk derz olacak şekilde yeni beton dökerek birleşik rötre etkilerinin ölçülebilmesi hedeflendi (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Ön deneylere ait görseller.

Yapılan ön deneyler göstermiştir ki; beton numunelerde kısıtlanmış rötre açısından ASTM C1581 standardı çalışma kapsamında uygundur fakat soğuk derzli plastik rötre düzeneği etkinlik gösterememiştir. Bu nedenle çalışmada eski beton yeni beton farkından kaynaklanan artık iç gerilme oluşturan kısıtlanmış rötreli yöntem tercih edilmemiştir. Onun yerine ASTM C1581 standardının yüksekliği daha az fakat yayılma alanı daha geniş olan çelik halka içerikli modifiye edilmiş halinin kullanılmasına karar verilmiştir.

3.2.2 Beton numuneler için karışım oranları

Beton numunelerde karıştırma işlemi 50 litrelik betoniyer mikserinde gerçekleştirildi. Önce agrega ve çimento karıştırıldı, daha sonra suyun yarısı ilave edildi. Daha sonra geri kalan su, süper akışkanlaştırıcı katkının yarısı ile karıştırıldı. Geriye kalan süper akışkanlaştırıcı katkı eklenmeden önce PP lifler yavaş yavaş eklendi. Devamında kıvama göre kalan akışkanlaştırıcı katkı karışıma eklenmiştir.

Mikro ve makro PP lifler hem tek tek hem de bir arada hibrit formda kullanılmıştır. Liflerin maksimum ve minimum oranları belirlenirken heme endüstrideki uygulamalar araştırılmış hem de deneme üretimleri yapılarak işlenebilirlik düzeylerine göre oranlara karar verilmiştir. Maksimum eklenebilecek lif miktarına karar verdikten sonra Çizelge 3.8’de gösterildiği gibi lif miktarları düzenli adımlarla azaltılarak nihai karışım oranları belirlenmiştir. İlgili tabloda ayrıca herhangi bir lif katkısı içermeyen referans karışımı da listelenmiştir. Beton numunelerde çatlak gelişim gözlem sürecini hızlandırmak amacıyla 0,5/1/4, su/çimento/agrega oranında su ihtiyacı yüksek olabilecek bir dizayn hazırlanmıştır.

Çizelge 3.8 : Beton numunelerdeki karışım oranları ve çökme değerleri.

Malzemeler (kg/m³)									
Numune kodu	Çimento	Su	Super akışkanlaştırıcı	Lif oranı	Lif tipi (PP lif)	Dere Kırma			Slump (cm)
						kumu (0-2 mm)	kum (0-4 mm)	taş (4-10 mm)	
Ref			4,4	-	-	295	550	840	21
Mic 0,25			4,4	0,25	Mikro	294	549	839	16
Mic 0,375			4,6	0,375	Mikro	294	548	836	14
Mic 0,50			4,6	0,50	Mikro	294	549	838	13
Mic 0,75			4,5	0,75	Mikro	293	548	839	12
Mic 1,0			4,4	1,00	Mikro	292	546	835	11
Mic 1,5			4,5	1,50	Mikro	293	545	836	10
Mic 2,0			4,6	2,00	Mikro	294	544	535	8
Mic 2,5			4,5	2,50	Mikro	292	543	833	6
Mac 0,50			4,5	0,50	Makro	294	549	838	15
Mac 0,75	440	220	4,6	0,75	Makro	293	547	836	14
Mac 1,00			4,6	1,00	Makro	293	548	838	13
Mac 1,50			4,5	1,50	Makro	294	546	839	11
Mac 2,0			4,5	2,00	Makro	292	545	834	10
Mac 3,0			4,5	3,00	Makro	290	541	832	6
Mac 4,0			4,6	4,00	Makro	291	542	830	3
Hy0,50+0,50			4,5	0,50+0,50	Mik.+Mak.	294	549	839	14
Hy1,00+1,00			4,3	1,00+1,00	Mik.+Mak.	295	550	840	11
Hy0,75+1,50			4,6	0,75+1,50	Mik.+Mak.	294	549	838	8
Hy2,00+2,00			4,5	2,00+2,00	Mik.+Mak.	293	550	841	6
Hy1,50+3,00			4,4	1,50+3,00	Mik.+Mak.	292	546	835	2

Serbest rötne değerlerini ölçebilmek için taze karışımlardan bir kısmı pimin beton içerisinde kalmasına imkân verecek şekilde tasarlanan 40 x 40 x 160 mm ebatlarındaki prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Serbest rötre numuneleri için pimli kalıp.

Eğilme mukavemeti ve kırılma enerjisi deneylerini gerçekleştirebilmek için 70 x 70 x 280 mm ebatlarında prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Ultrases geçiş hızı (UPV), basınç dayanımı ve elastisite modülü ölçümü deneyleri için 100 x 200 mm ebatlarında silindirik numuneler hazırlanmıştır. Çalışmanın ana deneylerinden olan kısıtlanmış rötre deney düzeneği için ise 2 farklı çelik kalıp düzeneği hazır edilmiştir. Beton dökümünden hemen sonra tüm numuneler sarsma tablasına alınmış ve kalıp içerisinde muntazam yerleşmesi sağlanmıştır. Taze betonun kalıplara iyice yerleştiğinden emin olunduktan sonra numuneler 20 °C sıcaklığındaki yoğun kür ortamunda 24 saat süreyle bekletilmiş ve ilk 24 saatin sonunda numune kalıpları 20±1 °C sıcaklığında ve %45±5 bağıl nemdeki kontrollü gözlem odasında çıkarılmışlardır.

3.2.3 Harç

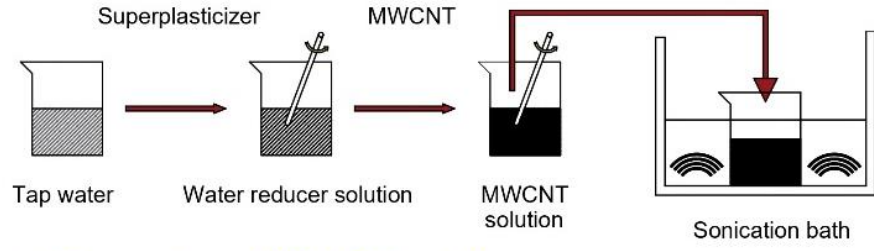
MWCNT'lerin etkilerini gözlemleyebilmek için betona göre daha küçük agrega taneleri içeren, numune hacmi olarak daha küçük ve literatürde yapılan başka çalışmalarla da kıyaslama imkânı olabilecek bir harç dizaynı yapılmıştır. Çimento esaslı kompozitlerde lif katkısı olarak kullanılan MWCNT'lerin homojen dağılımına ilişkin endişeler literatürdeki çalışmalarda sıklıkla vurgulanmıştır. Bu endişelerden dolayı eğer nano mertebede bir lif kullanılıyorsa ultrasonik karıştırıcıların homojen dağılımı sağlayabileceği düşünülmektedir. Homojen dağılım problemine doğru bir

yaklaşım gibi gözükse de bu teknikle üretilen numuneler, yalnızca laboratuvar ortamında üretime olanak sağlayacak kadar küçük hacimlerle sınırlıdır. Bu çalışmanın başından beri, nano lif katkılarının daha büyük montanlı üretimlerde yeterli miktarda katkıyla üretilebilir olması amaçlardan bir tanesiydi. Bu amaç doğrultusunda harç numuneleri 5 litre kapasiteli EN 196-1 standardına uygun bir otomatik karıştırıcıda hazırlanmıştır. İşlenebilirliği kolaylaştırmak için karışım oranları 0,5/1/3, su/çimento/agrega şeklinde seçilmiştir. Harç numunelerde kullanılan lifler, içerikteki çimento ağırlığına göre oranlanmıştır. Çizelge 3.9’da gösterildiği gibi, kullanılan MWCNT oranları çimento ağırlığına göre %0,025, %0,0375 ve %0,050’dir. Bu karışımlara ek olarak ağırlıkça %0,25, %0,50 ve %1,00 mikro PP içeren harç numuneler de hazırlanmıştır. Betonla aynı oranda mikro PP seçilmesi, beton ve harç dizaynlarının performansının karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Çizelge 3.9 ayrıca herhangi bir lif katkı maddesi içermeyen referans karışımını da içermektedir. He (2006), yaptığı çalışmada CNT katkılı harçların düzgün dağılımının sonikatör banyosuyla mümkün olabileceğini belirtmiştir.

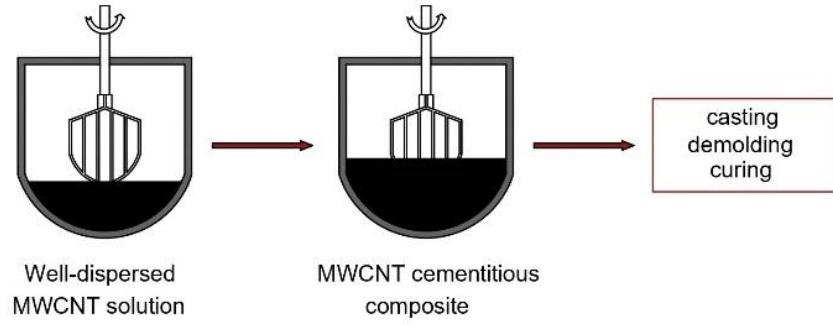
Çizelge 3.9 : Harç numunelerdeki karışım oranları.

Numune Kodu	Çimento (g)	Su (g)	Super Akışkanlaştırıcı (g)	Lif miktarı (ağ.%)	Lif tipi	Standart kum (g) (0-2 mm)
Ref			3.8	-	-	
CNT 0.025			3.9	0,025	MWCNT	
CNT0.0375			4.0	0,038	MWCNT	
CNT 0.050	450	225	4.1	0,050	MWCNT	1350
Mic 0.25			3.9	0,25	Mikro	
Mic 0.50			3.9	0,50	Mikro	
Mic 1.00			4.1	1,00	Mikro	

MWCNT’lerin harç içerisinde düzgün ve homojen dağılımını sağlayabilmek için Dong ve diğ. (2021) tarafından tariflenen yöntemle benzer bir üretim prosedürü Şekil 3.7’de gösterildiği gibi CNT 0.050 numuneleri için kullanılmıştır. İlk önce süper akışkanlaştırıcının bir kısmı suyla karıştırılarak su azaltıcı bir çözelti elde edilmiştir. Daha sonra MWCNT’ler bu çözeltiye eklenmiş ve karıştırılmıştır. Bir kap içerisinde 30 dakika süreyle sonikasyon banyosuna bırakılan solüsyon, topaklanma sorunu olmadan harç içerisinde homojen bir şekilde dağılmıştır.



(a) Preparation of MWCNT solution



(b) Mixing of MWCNT cementitious composite

Şekil 3.7 : Dong ve diğ. (2021) tarafından tarif edilen nano lif karıştırma yöntemi.



Şekil 3.8 : MWCNT solüsyonunun hazırlanması.

Üretilen taze harç, 40 x 40 x 160 mm ebatlarındaki prizmatik kalıplara pimlerle birleşek şekilde yerleştirilmiştir. Tam yerleştirmenin sağlanabilmesi için sarsma tablası kullanılmıştır. Bu numuneler serbest rötre ölçümleri, eğilme mukavemeti ve kırılma enerjisi değerlerini elde edeceğimiz şekilde hazırlanmışlardır. Ayrıca kısıtlanmış rötre kaynaklı çatlak gelişimini gözlemlene amaçlı çelik halkası bulunun ASTM C1581 standardının 1/4 ölçeğindeki deney kalıplarına da dökümler yapılmıştır. Bunlara ek olarak, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve elastisite modüllerini

ölçebileceğimiz 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde silindir numuneler de hazırlanmıştır. Tüm harç numuneleri betonda olduğu gibi aynı şekilde kürlenmişlerdir.

3.3 Deney Yöntemleri

Yukarıda üretim süreçleri ve malzemeleri tariflenmeye çalışılan deney numuneleri üzerinde serbest rötre, kısıtlanmış rötre, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve elastisite modülü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deneylere ait takip edilen yöntemlerin detayları aşağıda tariflenmiştir.

3.3.1 Serbest rötre

Serbest rötre deneyleri için 40 x 40 x 160 mm ebatlarındaki prizmatik numuneler kullanılmıştır. Her karışım için üç numune hazırlanmıştır. Kalıptan çıkarıldığında ilk uzunlukluklar kaydedilmiştir. Numuneleri ölçmeden önce başlangıç noktası bir kalibrasyon çubuğu ile “sıfır” değerine ayarlanmıştır. Daha sonra ölçme hatalarını önlemek maksadıyla her ölçüm şekil 3.9’de gösterildiği gibi ön yüzü ve ölçüm doğrultusu ok ile işaretlenmiştir. Serbest rötreyi ölçmek için 0,001 mm hassasiyetli bir kompratöre düzeneği kullanılmıştır. Betondaki su kaybına bağlı olarak uzunluktaki değişimler günlük olarak izlenmiş ve başlangıç noktasından itibaren birim şekil değiştirme yüzdeleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.9 : Serbest rötre ölçümleri.

3.3.2 Kısıtlanmış rötre

3.3.2.1 Beton

Bu çalışmanın ana odak noktalarından bir tanesi, kısıtlanmış rötrede kaynaklanan beton çatlağının araştırılmasıdır. Bu nedenle, çatlak genişliklerinin ölçülmesi ve lif katkılarının kısıtlanmış rötre çatlaklarına etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla iki farklı türde çelik halkalı kalıplar hazırlanmıştır.

Bunlardan bir tanesi Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de gösterildiği gibi ASTM C1581 standardına göre kurulmuştur. Bu standart teste göre beton numunesinin kalınlığı 35 mm, yüksekliği 150 mm’dir. Orta kısımda bulunan ve kısıtlanmayı sağlayan çelik halkanın et kalınlığı 13 mm, dış çapı ise 330 mm’dir. Söz konusu standarda uygun deney yapılırken; betonun kalıptan çıkarma işlemi sonrasında üst kısmın kurumasını önleme amacıyla üst yüzeyler sıvı parafinle kaplanmıştır.

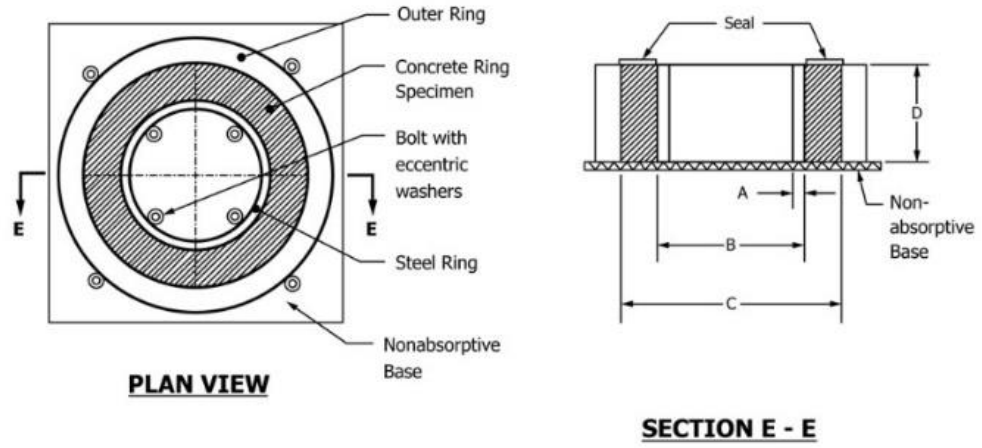


Figure Dimensions	SI Units	Inch-Pound Units
A	13 ± 1 mm	0.50 ± 0.05 in.
B	330 ± 3 mm	13.0 ± 0.12 in.
C	405 ± 3 mm	16.0 ± 0.12 in.
D	150 ± 6 mm	6.0 ± 0.25 in.

Şekil 3.10 : ASTM C1581 standardına göre numune ve kalıp ölçüleri.



Şekil 3.11 : ASTM C1581 standardına uygun beton kalıbı ve portatif mikroskop.

Şekil 3.12’de ASTM C1581 standardına göre hazırlanmış kalıplarda üretilen taze beton numunelerine ait fotoğraflar gösterilmektedir. Söz konusu numunelerin üst yüzeyleri betonda sertleşme sağlandıktan sonra sıvı parafinle kaplanmıştır.



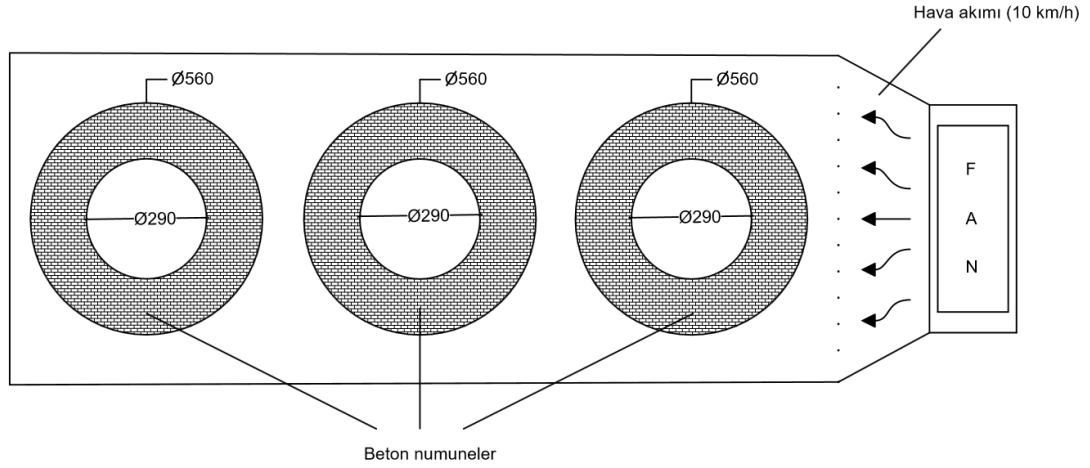
Şekil 3.12 : Bazı deney numunelerinin üretimleri.



Şekil 3.13 : Mikroskop vasıtasıyla ölçülen çatlak genişlikleri.

Beton, rüzgârın kuruma etkisi gibi kısıtlanmanın yanında başka zararlı ortamlara da maruz kaldığından, plastik ve kuruma rötrelerinin etkilerini birlikte incelenmesine olanak sağlayacak şekilde modifiye edilmiş ayrı bir deney düzeneği de tasarlanmıştır. Bu dönüştürülmüş kalıp sisteminde; beton numunesi Şekil 3.14’te gösterildiği gibi daha geniş bir tabana, daha düşük bir yüksekliğe ve numunelerin üst yüzeyinden suyun buharlaşmasını sağlayacak bir rüzgâr akımı olanağına sahiptir. Modifiye edilmiş

kısıtlanmış rötre deney düzeneğinde beton numunenin yüksekliği 30 mm, genişliği 125 mm'dir. Kullanılan  elik kalıbın ortasından halkanın dış çapı 315 mm ve et kalınlığı 12,5 mm'dir. Ek olarak, numune bir rüzgâr akış tüneli içerisinde saatte 10 km hıza sahip hava akışına maruz bırakılmıştır.



şekil 3.14 : Modifiye edilmiş yönteme göre numune ve kalıp ölçüleri.



şekil 3.15 : R zg r hızının anemometre ile ölçülmesi.



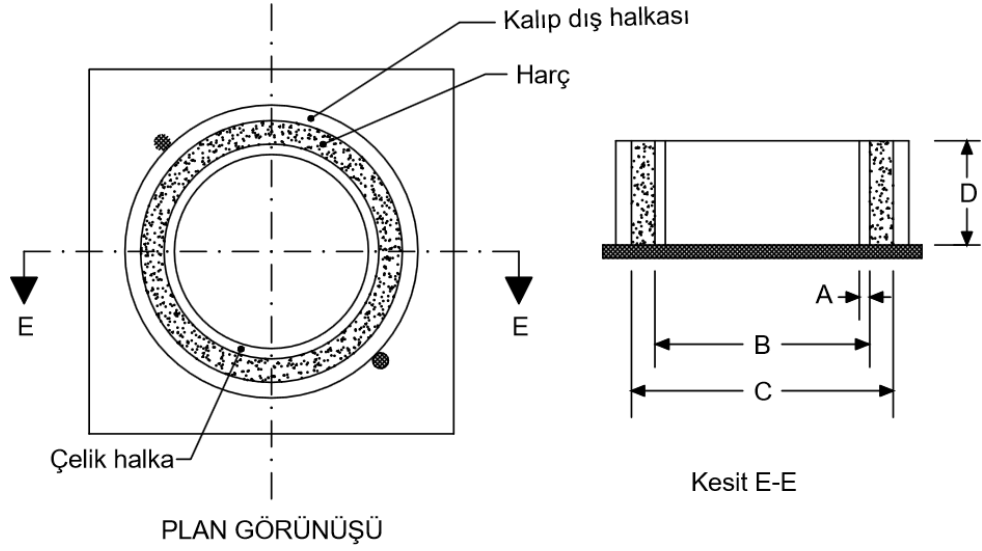
Şekil 3.16 : Modifiye edilmiş yönteme göre üretilmiş numuneler.

Tüm numuneler iki taşınabilir mikroskop kullanılarak günlük olarak çatlak gelişimleri gözlemlenmiştir. İlk çatlağın oluştuğu gün kaydedilmiş ve oluşan çatlağın ne kadar genişlediği 42 gün süreyle ölçülmüştür.

Grzybowski (1989, 1990) geçmişte benzer bir çalışma yapmış ancak betonun çatlamasını kolaylaştırmak ve çatlak yerini güdümlmek amacıyla çelik kalıplara kaynaklı nervürler yerleştirmiştir. Tez kapsamındaki bu çalışmada ise deney düzeneği günümüz kullanımına daha uygun ve daha basit şekilde düz tabanlı olarak tasarlanmıştır.

3.3.2.2 Harç

Günümüzde nano lifler ekonomik olarak epey pahalıdır, erişebilme imkanları ise sınırlıdır. Nano liflerin uygulamaya yönelik pratik kullanım alanları, etkileyebilecekleri hacmi düşününce iri agrega oranı yüksek beton malzemeden ziyade, nispeten agrega dane çapı küçük ve hacimsel olarak daha az büyüklükte üretimler yapmak daha rasyonel bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımla, MWCNT'lerin kısıtlanmış rötre çatlaklarına karşı etkinliğini gözlemleyebilmek için ASTM C1581 standardının 1/4 ölçeğinde yeni bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu deney düzeneği ve ölçüleri Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'te gösterilmiştir.



Gösterim	Ölçü (mm)
A	12
B	82
C	100
D	45

Şekil 3.17 : Harç numuneler için oluşturulmuş kısıtlanmış rötre numune kalıbı ölçüleri.



Şekil 3.18 : Harç numuneler için kısıtlanmış rötre numuneleri.

Harç numunelerin kalınlığı 9 mm, yüksekliği 45 mm'dir. Kullanılan çelik halkanın et kalınlığı 12mm, dış çapı ise 82,5 mm'dir. Betonda olduğu gibi numunelerin üst yüzeyi

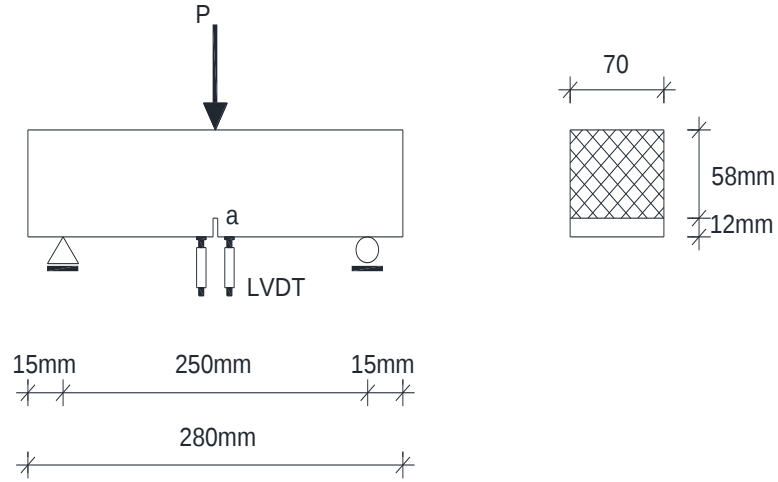
sıvı parafin ile kaplanmıştır ve oluşan çatlaklar ve gelişmeler günlük olarak gözlenlenmiş ve portatif analog ve dijital mikroskoplarla ile ölçülmüştür (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 : Harç numunede meydana gelen kısıtlanmış rötre çatlaklarının ölçümü.

3.3.3 Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi

Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi deneyleri için betonda ve harçta farklı geometriye sahip prizmatik numuneler kullanılmıştır. Her beton karışımı için 3 adet 70 x 70 x 280 mm ebatlarında prizmatik numune üretilmiştir. Üretimden sonraki 28 günün sonunda, numuneler kür odasından alınarak kalıp yüzeylerinden bir tanesine çentik açılmıştır. Çentik açılma işlemi sonrası nihai kesit boyutları 70 x 58 mm olmuştur. Beton numunelerin eğilme mukavemeti ve kırılma enerjisi deneyleri, Şekil 3.20’te gösterildiği gibi üç noktalı eğilme düzeneği kullanılarak belirlenmiştir. Şengül Özkan (2016) tarafından yapılan çalışmada kullanılan yöntemle benzer şekilde RILEM 50-FMC Teknik Komitesinin eğilme deney yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu yöntem, lif takviyeli prizmaların kırılma enerjisinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir.



Şekil 3.20 : Beton numunelerde üç noktalı eğilme deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Numunelerin kırılma enerjisi aşağıda verilen eşitlikle (formül 1) hesaplanmıştır.

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A_{iig}} \quad (1)$$

Burada;

G_F : kırılma enerjisi (N/m),

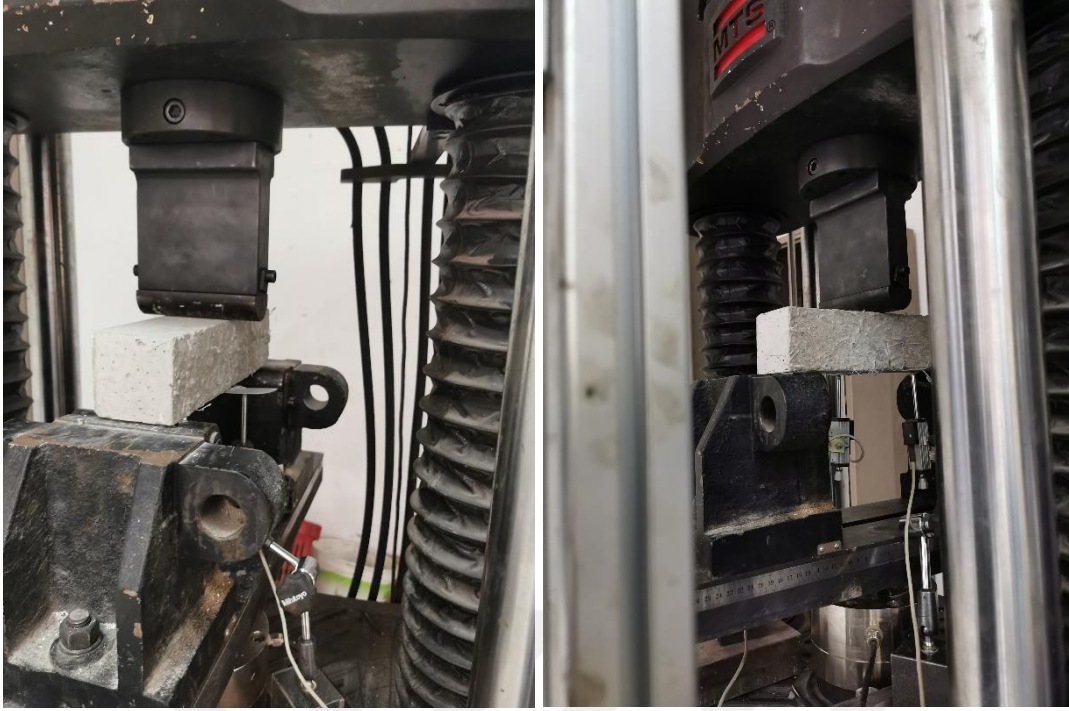
W_0 : yük deformasyon grafiği altında kalan alan (N/mm),

g : yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

δ_0 : kırılma anındaki şekil değiştirme

A_{iig} : Efektif kesit alanı

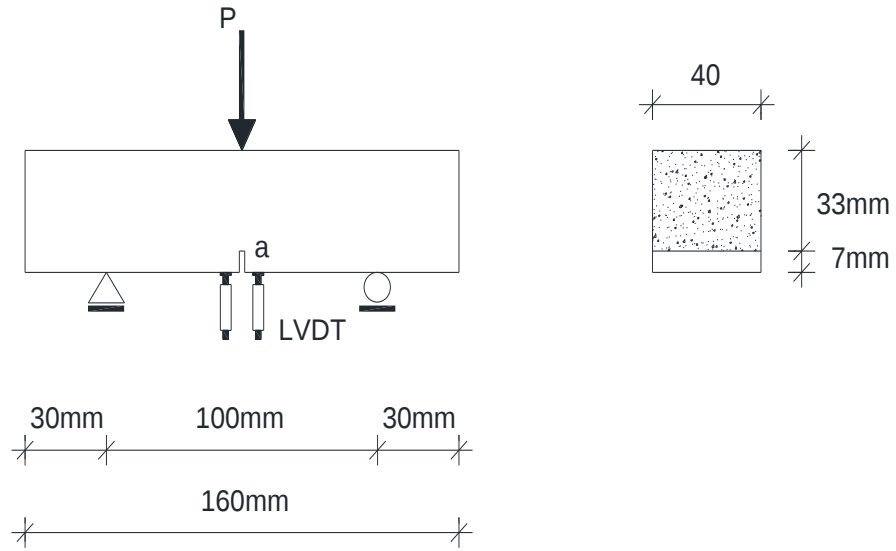
Şekil 3.21’de üstte çizim hali gösterilen numunelerin hazırlanmış haline ait fotoğraflar gösterilmektedir. Söz konusu deneyler İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzeme Laboratuvarı’nda bulunan 600 kN kapasiteli, kapalı çevrim deformasyon kontrollü basma çekme cihazında gerçekleştirilmiştir.



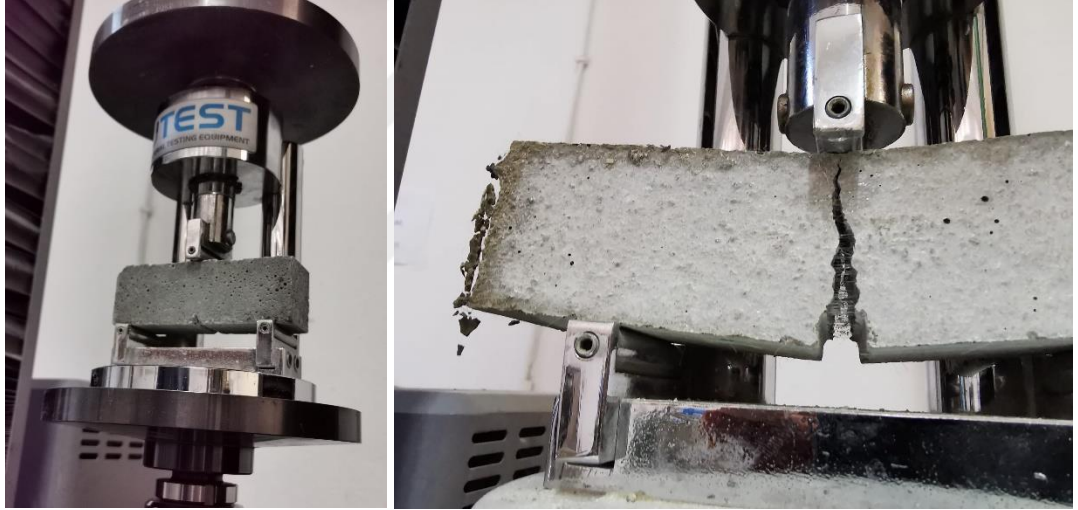
Şekil 3.21 : Beton numunelerde üç noktalı eğilme deney düzeneği.

Harç numuneleri için serbest rötre ölçümlerinde kullanılan 40 x 40 x 160 mm ebatlarındaki numuneler, eğilme mukavemeti ve kırılma enerjisi deneylerinde yeniden kullanılmışlardır. Bu numunelere çentik açılma işleminin ardından nihai kesit boyutları 40 x 33 mm olmuştur (Şekil 3.22). Harç numunelerde eğilme mukavemeti ve kırılma enerjisi deneyleri beton için kullanılan aynı test ve yöntem tabi tutulmuştur.

Şekil 3.23'te harç numunelere ait eğilme deneyine ait fotoğraflar gösterilmektedir. Söz konusu deneyler İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzeme Laboratuvarı'nda MTS marka 50 kN kapasiteli, 1 N hassasiyetli kapalı çevrim deformasyon kontrollü çekme basma cihazında yapılmıştır.



Şekil 3.22 : Harç numunelerde üç noktalı eğilme deney düzeneğinin şematik gösterimi.



Şekil 3.23 : Harç numunelerde üç noktalı eğilme deney düzeneği.

3.3.4 Ultrases geçiş hızı

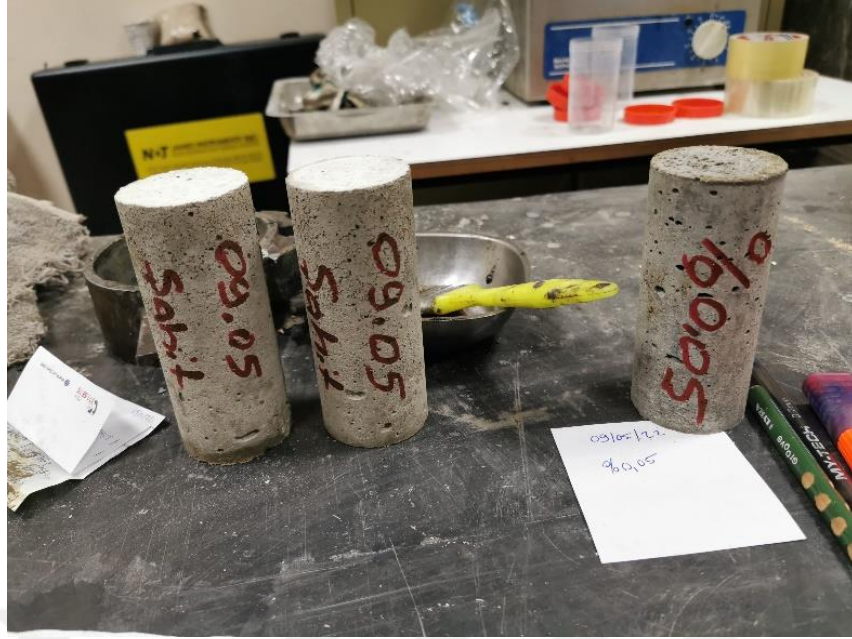
Ultrases geçiş hızı (UPV) deneyleri (Şekil 3.24), betonun homojenliğini ve çatlak veya boşluklarının varlığını belirlemek amacıyla EN 12504:4 standardına uygun olarak gerçekleştirildi. Deney numunelerinden beton için olanların çapı 100 mm, yüksekliği 200 mm, harç için olanların ise çapı 50 mm, yüksekliği 100 mm'dir. Ultrases geçiş hızı (UPV), cihazda kullanılan ve numune yüzeylerinin iki ucuna değdirilen propların arasındaki mesafenin, sesin varış süresine bölünmesiyle hesaplanır. Dolayısıyla bu mesafe beton numuneler için 200 mm, harç numuneler için 100 mm olarak alınmıştır.



Şekil 3.24 : Ultrases geçiş hızı (UPV) deneyleri.

3.3.5 Basınç dayanımı

Beton ve harç numunelerin basınç dayanımları EN 12390-3 standardına göre numuneler üretildikten 28 gün sonra belirlenmiştir. Numunelerin basınç dayanımlarını ölçmeden önce elastisite modülü için dayanım ve şekil değiştirme ölçümleri yapılmıştır. Beton numuneler 100 mm çap ve 200 mm yüksekliğinde, harç numuneler ise 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğindedir. Basınç deneyleri maksimum 3000 kN kapasiteli bir otomatik basınç test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (şekil 3.25, şekil 3. 26). Deney sırasında yükleme hızı 0,6 MPa/s idi. Beton ve harcın elastisite modülü EN 12390-13:2021 standardı yöntem B'ye göre ölçülmüş ve hesaplanmıştır.



Şekil 3.25 : 50 mm çaplı 100 mm yükseklikli harç numuneler.

Söz konusu basınç deneylerinde kullanılan Besmak marka cihaza entegre LVDT ataşmanları ve cihaza ait yazılım sayesinde Elastisite Modülü ölçümleri ve hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 3.26 : Basınç deneyi.

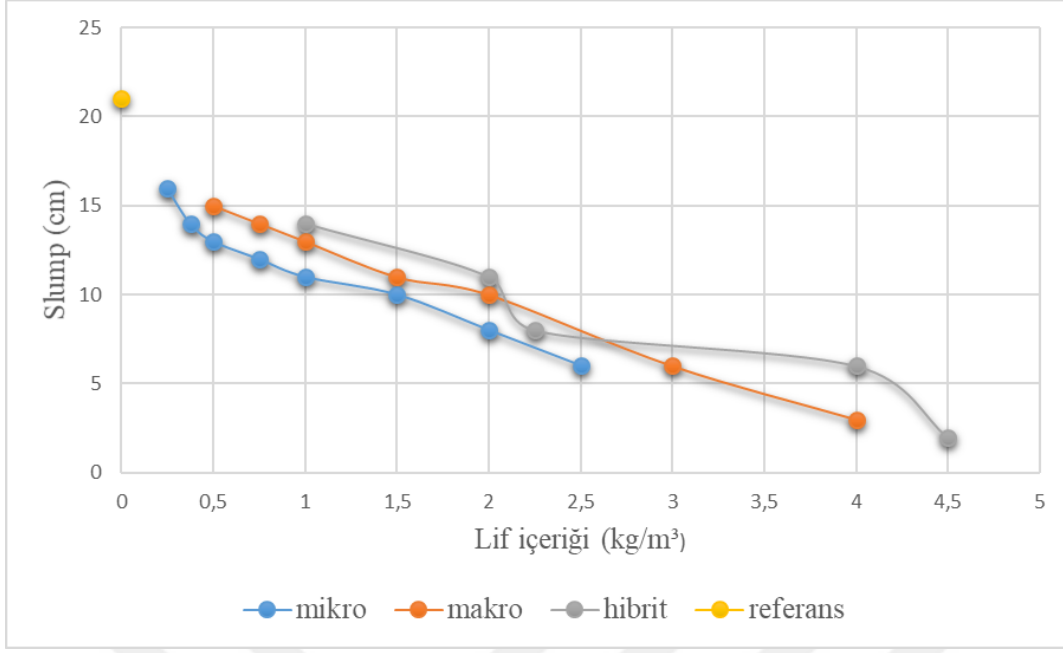


4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında yukarıda bahsedilen deneyler ve sonuçları aşağıda başlıklar halinde sıralanmıştır. Ayrıca literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarıyla da kıyaslamalar yapılmıştır.

4.1 İşlenebilirlik

Konu, çimento esaslı kompozitleri liflerle donatılmak olunca, işlenebilirlik parametresi epeyce öne çıkmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı katkının her karışımda aynı miktarda olduğu daha evvel vurgulanmıştır. Lif katkıları işlenebilirliğe etkisi beklendiği gibi, PP liflerin karıştırma sırasında oluşan hava boşlukları ve liflerin geometrik olarak karışımdaki diğer malzemelerden farklı olması nedeniyle, lif miktarındaki her artış taze betondaki slump değerlerini düşürmüştür. Kullanılan lif oranlarına karşılık gelen slump değerleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Çok yüksek oranda lif içeriği kullanılacaksa kullanılacak akışkanlaştırıcı katkının içeriği, miktarı ve hatta türü de değiştirilmek zorunda kalınabilir. Aksi taktirde beton karışımı işlenemez bir duruma gelebilir. Tez çalışması kapsamında maksimum ne oranda lif katkısı kullanabileceğimiz ön deneylerle belirlenmiştir.

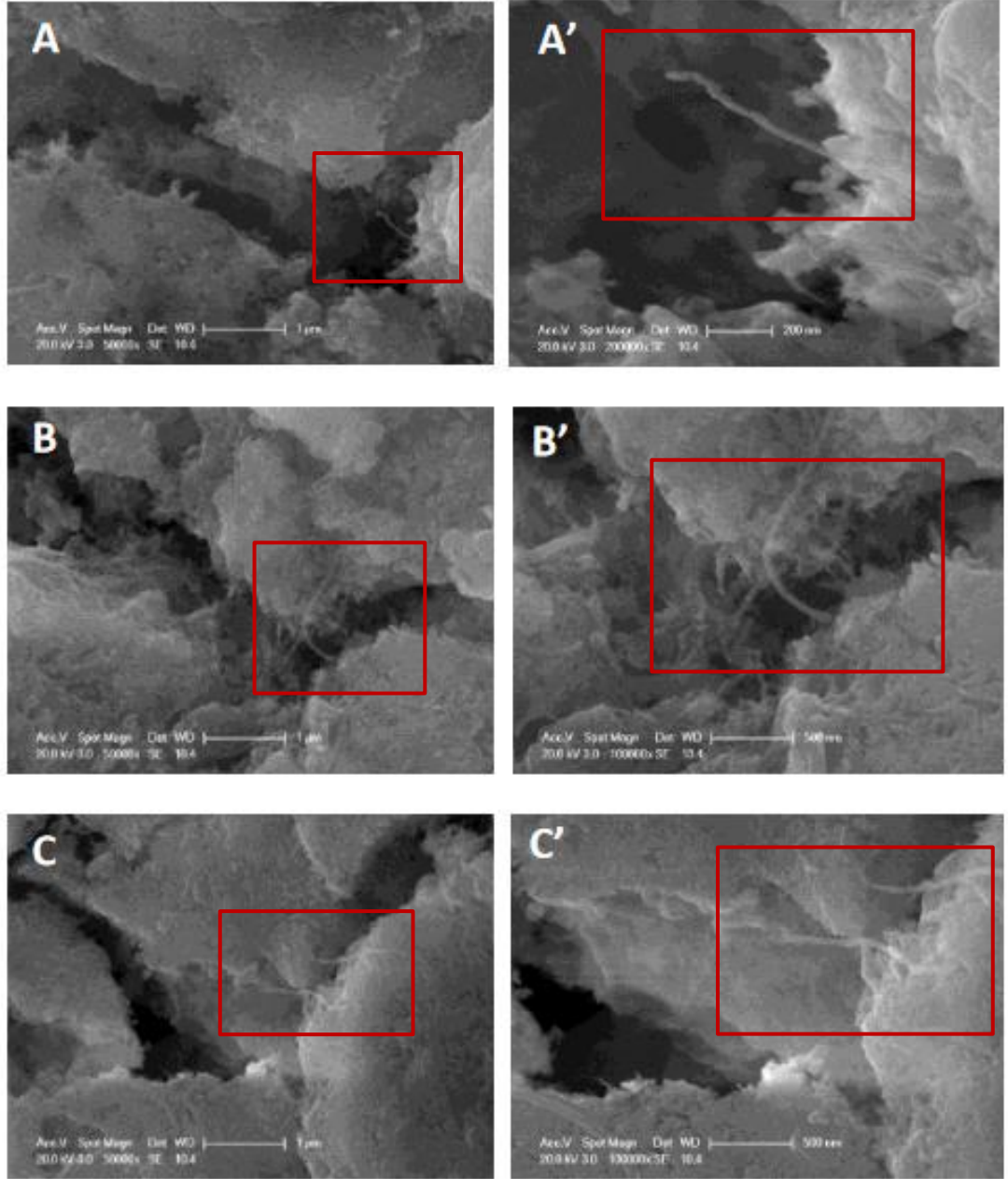


Şekil 4.1 : Lif içeriği ve slump değeri ilişkisi.

Harç numunelerde kullanılan MWCNT lifleri eklendiğinde, literatürde dağılım problemlerini önlemek için ultrasonik karıştırıcı kullanılması gerektiği defalarca belirtilmiştir (Metexa ve diğ, 2022; Alrekabi ve diğ, 2016). Cerro-Prada ve diğ. (2020) karbon nano tüp katkılı harç üretmek için laboratuvarında standart tamburlu bir karıştırıcı kullanmıştır. Tez kapsamındaki bu çalışmada da çimento oranı 0,025 (% çimento ağırlığı) olduğunda, basit bir otomatik karıştırıcı nano materyali homojen dağıtmak için yeterli olmuştur. Öte yandan %0,025'ten fazla miktardaki nano içerikler için ultrasonik titleştirici banyo kullanılmıştır.

4.2 İç yapı

Tez çalışması kapsamında, harç numunelerde kullanılan MWCNT'lerin harç içerisine topaklanma sorunu olmadan düzgün dağıldığını görebilmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile iç yapı incelemesi yapılmıştır. Yüzeyin SEM ile taranması için harç numuneler küçük parçalara bölünmüş ve altın / paladyum elementleri ile kaplanmıştır. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere SEM cihazından alınan görüntüler MWCNT'lerin harç matrisi içerisinde başarılı bir şekilde dağılmışlardır. Referans karışım, bu tez çalışmasını yapan ve geçmişte başka araştırmacılar tarafından defalarca tekrar edilen, standardizasyonu stabil olduğu kanıtlanmış bir karışım olduğu için bu çalışmada o karışımlar için SEM incelemesini tekrarlanmasına gerek kalmamıştır.

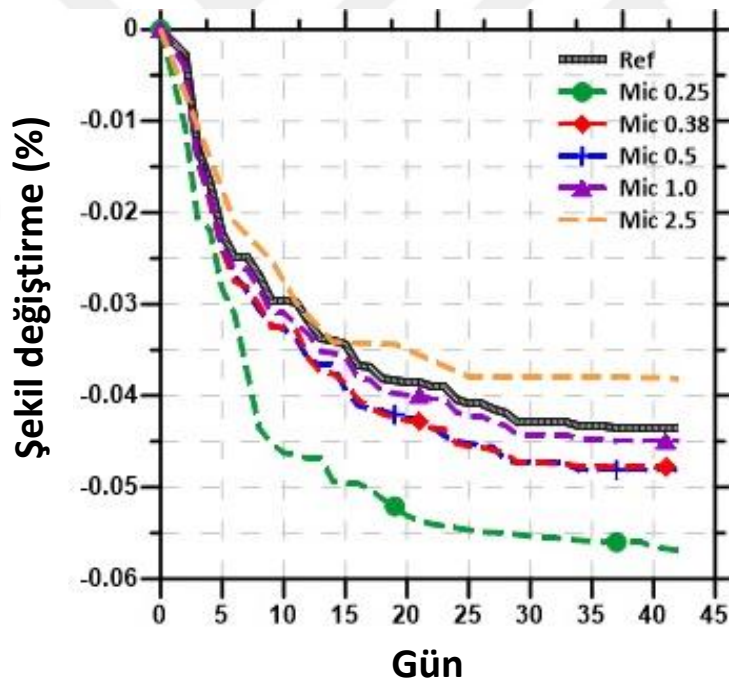


Şekil 4.2 : Harç numunelere ait SEM görüntüleri: 0.025% MWCNT (A) 50000x, (A') 200000x, 0.0375% MWCNT (B) 50000x, (B') 100000x, 0.050% MWCNT (C) 50000x and (C') 100000x.

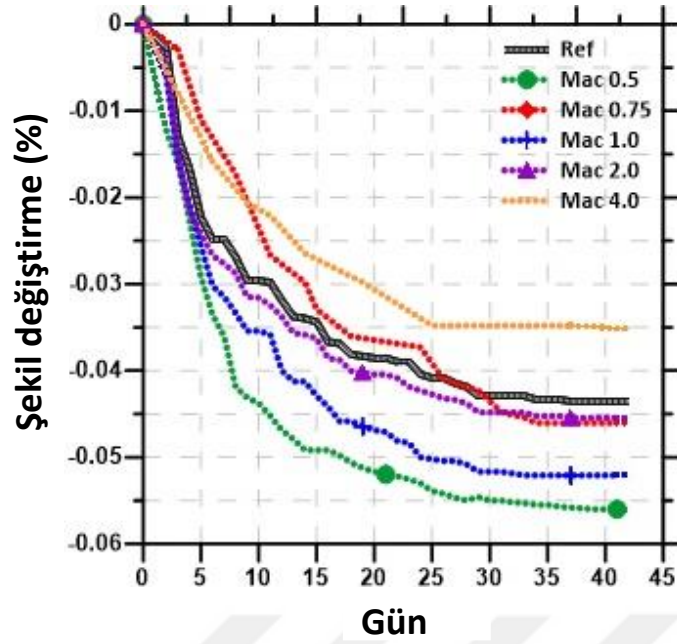
A ve A' görüntü serisi, %0,025 MWCNT içeren karışıma, B ve B' görüntü serisi %0,0375 MWCNT içeren karışıma, C ve C' serisi ise %0,050 MWCNT içeren karışıma aittir ve her görüntü ilgili MWCNT ile donatılanmış harcın aynı bölgesine yaklaşılarak elde edilmiştir. Görüntülerden MWCNT'lerin harç matrisini güçlendirdiği ve çatlakları nano boyutta köprülediği anlaşılmaktadır. Bu özelliğinden dolayı MWCNT katkılı karışımlar nanomateriyal içermeyen referans karışıma göre daha yüksek dayanım kazanmıştır. Bu tür davranışlar bu alanda daha önce yapılan Hawreen ve diğ. (2019) çalışmada da benzer şekilde rapor edilmiştir.

4.3 Serbest rötre

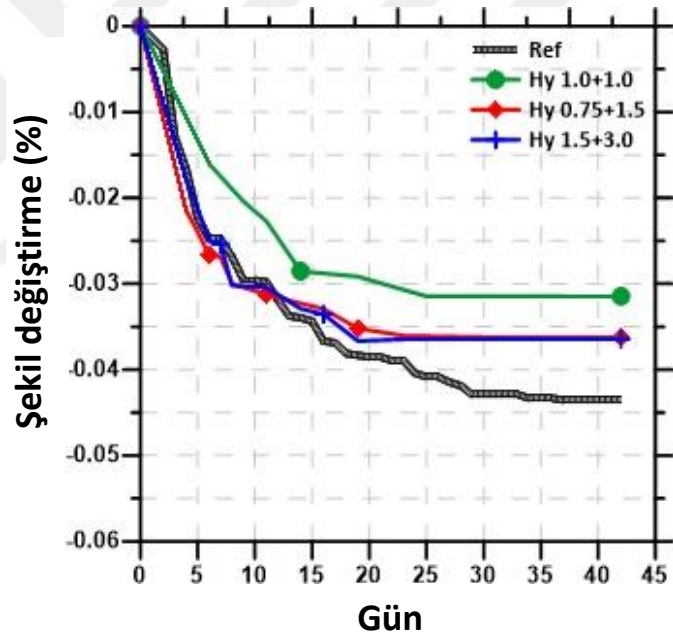
Serbest rötre deneyindeki numunelerde bir kısıtlanma olmadığından dolayı gerilme oluşumu veya çatlama söz konusu değildir. Dolayısıyla lif katkılarına bu konuda fazla iç düşmemektedir. Serbest rötre değerleri numuneler kalıptan çıkarıldıktan hemen sonrasında ölçülmeye başlanmıştır. Numunelerin doğal olarak su kaybetmelerinin akabinde büzülme meydana gelmiş ve boyları kısalarmıştır. Beton numunelere ait günlük ölçümlerin sonuçları şekil 4.3, 4.4 ve 4.5'te, harç numunelere ait grafikler ise şekil 4.6'te gösterilmiştir. Grafikleri sadeleştirmek adına lif katkılarından minimum, maksimum ve orta değerde olanların değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; serbest rötre erken yaşta (ilk günlerde) meydana gelmekte ve yaklaşık 6 hafta sonra neredeyse sona ermektedir. Literatürde lif katkıların  imento esaslı kompozitlerin serbest r tresini azalttığını bildiren bazı çalışmalar mevcuttur (Saje ve diğ, 2011)



şekil 4.3 : Mikro lif katkılı beton numuneler için serbest rötre ölçüm değerleri.



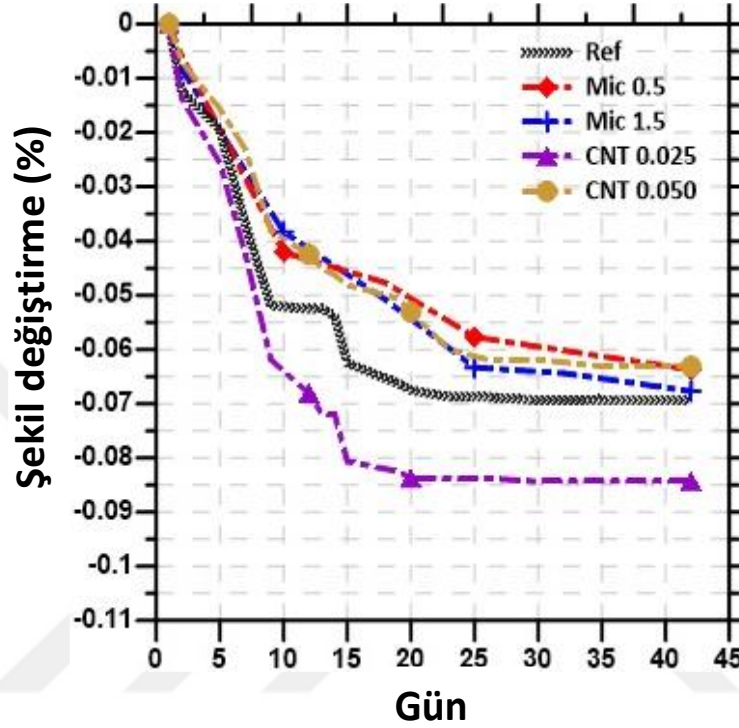
Şekil 4.4 : Makro lif katkılı beton numuneler için serbest rötre ölçüm değerleri.



Şekil 4.5 : Hibrit lif katkılı beton numuneler için serbest rötre ölçüm değerleri.

Şekil 4.3 ve 4.4'te görülebileceği üzere, lif katkıları serbest rötre değerlerini farklı şekilde etkilemişlerdir. Youseff ve diğ. (2017) mikro lif takviyeli betonun (bu çalışmadaki Mic 2.5 ile benzer oranda kullanılmıştır) serbest rötre değerinin referans değere göre %12 oranında az olduğunu bildirmiştir. Tez kapsamındaki bu çalışmada Mic 2.5 karışımı için serbest rötre değeri referans numuneye göre %18 daha az bulunmuştur. Ayrıca 4,0 kg/m³ makro lif referans karışımla kıyaslandığında yine serbest rötrenin azaldığı görülmüştür. Hibrit karışımın iki düzeyde (mikro ve makro ölçekte) etkili olabilmesi ve liflerinin farklı uzunluk ve çaplarda olması, betonda daha

homojen bir dağılıma olanak sağlamaktadır. Bu özelliklerinden dolayı serbest rötreye karşı tek tip lif kullanımına göre hibrit lifler daha iyi performans göstermişlerdir. Kullanılan PP lifler arasında serbest rötreye açısında en iyi performansı gösteren karışım, referans numuneye göre %22 azalma değeriyle hibrit 1.0 mic + 1.0 mac karışımı olmuştur.



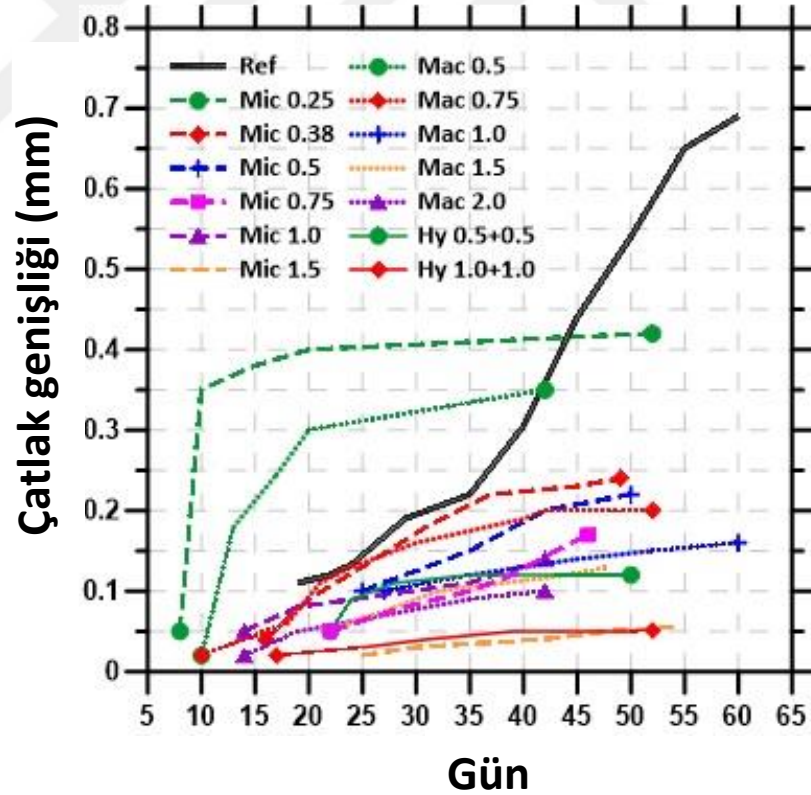
Şekil 4.6 : Harç numuneler için serbest rötreye ölçüm değerleri.

Hogancamp ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmalarında karbon nano tüp katkılarının eksenel şekil değiştirmeleri azalttığını bildirmişlerdir. Tez kapsamındaki çalışmaya bakıldığında, MWCNT'lerin harca %0,025 oranında eklendiğinde serbest rötreyi iyileştiremediği ancak %0,050 oranında kullanıldığında serbest rötreyi %9 oranında önleyebildiği görülmektedir. Mevcut çalışmada su / çimento oranı 0,5 olan normal boşluklu bir harç tercih edilmiştir. Az miktarda kullanılan nano katkıların harç içerisinde bulunan çok daha büyük miktardaki suyun kapladığı hacimleri dolduramamış olması nedeniyle serbest rötreye tam olarak engelleyemediği düşünülmektedir.

Şekil 4.6'da harç numunelere ait güne bağlı olarak şekilde değişime diğer bir deyişle % büzülme miktarının değişimi gösterilmektedir.

4.4 Kısıtlanmış rötre

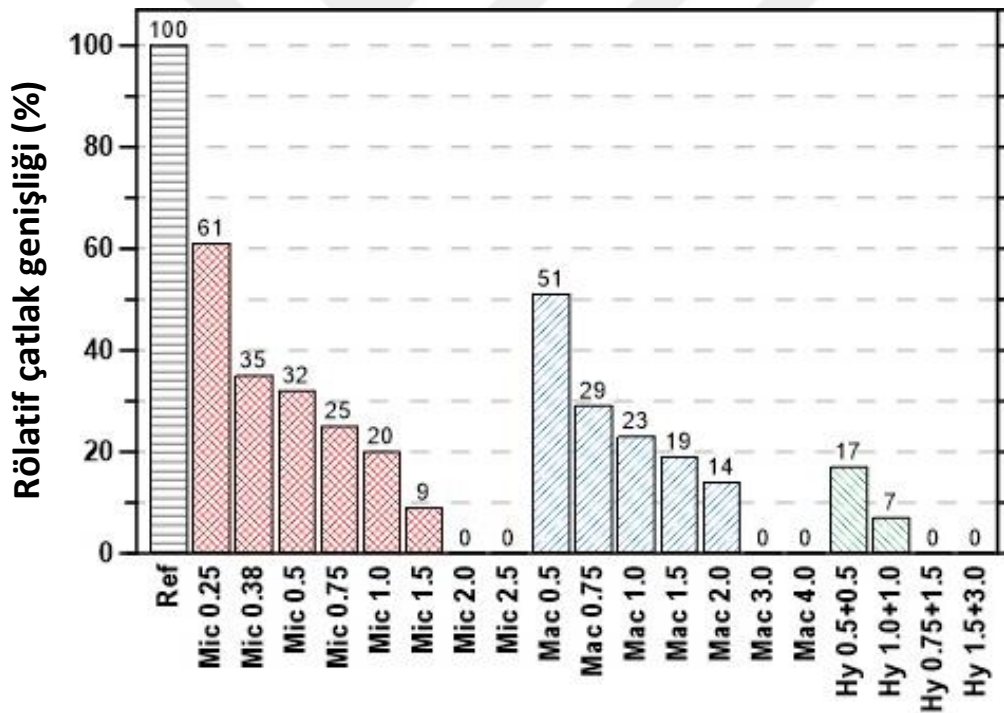
Çimento esaslı kompozitlerde kısıtlanmış rötre nedeniyle çatlak oluşumu yapı sektöründe uzun zamandır sorun olmuştur. Kaybedilen su nedeniyle hacmi azalan beton büzölmek isteyecektir. Ancak kısıtlanma olduğu için sahip olduğu esneklik kapasitesi aşıldığında çatlama meydana gelir. İlk çatlak oluşuktan sonra gerilmenin azaldığı dolayısıyla kısıtlanmanın kısmen kalktığı ancak su kaybının devam etmesiyle ilk çatlak genişliğinin artabileceği veya yeni çatlakların ortaya çıkabileceği söylenebilir. ASTM C1581 standardına göre beton numunelerde yapılan kısıtlanmış rötre deneyine ait sonuçlar Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Söz konusu grafik meydana gelen çatlakların genişliklerini göstermektedir, bu grafikte çatlak oluşumunu tamamen önleyen lif katkıları sıfır çatlak genişliğine sahip ölçüm değerleri grafiği sadeleştirmek amacıyla dahil edilmemiştir. Deneyler ortalama 6 haftalık sürede sonlandırılmıştır. Lif katkısı içermeyen referans numunede gelişim gözlemlendiği için 60 güne kadar devam edilmiştir.



Şekil 4.7 : ASTM C1581 standardına göre yapılan deneylerde ölçülen çatlak genişlikleri.

Xie (2021a), Xie (2021b), Cao (2019), Yao (2022) yaptıkları çalışmalarında bahsettikleri gibi; lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerde lifler, çatlaklar üzerinde köprüleme görevi görerek çatlakları önleyebilir veya mevcut çatlakların ilerlemesini durdurabilir. Liflerin kullanımı, çatlak ilerlemesini geciktiren, gevrek kırılmayı önleyen ve tokluğu arttıran köprüleme etkisi nedeniyle çimento matrisi içindeki gerilim transferini sağlar. Bunun yanı sıra, lifler eğrilik yarıçapını arttırarak meydana gelen gerilmeleri azaltabilir.

Agresif ortamlara maruz kalan beton için izin verilen maksimum çatlak genişliği 0,1 mm olarak düşünülebilir. ASTM C1581 yöntemine göre ölçüldüğünde, 1,0 kg/m³ makro ve 1,0 kg/m³ mikro PP lif katkıli hibrit karışımın ölçüm değerleri 0,1mm'nin altında kalmaktadır. Şekil 4.8'de PP lif katkıli betonların hiç lif içermeyen referans numuneye ve birbirlerine karşı ne oranda iyileşme sağladığı yüzdesel olarak verilmiştir.

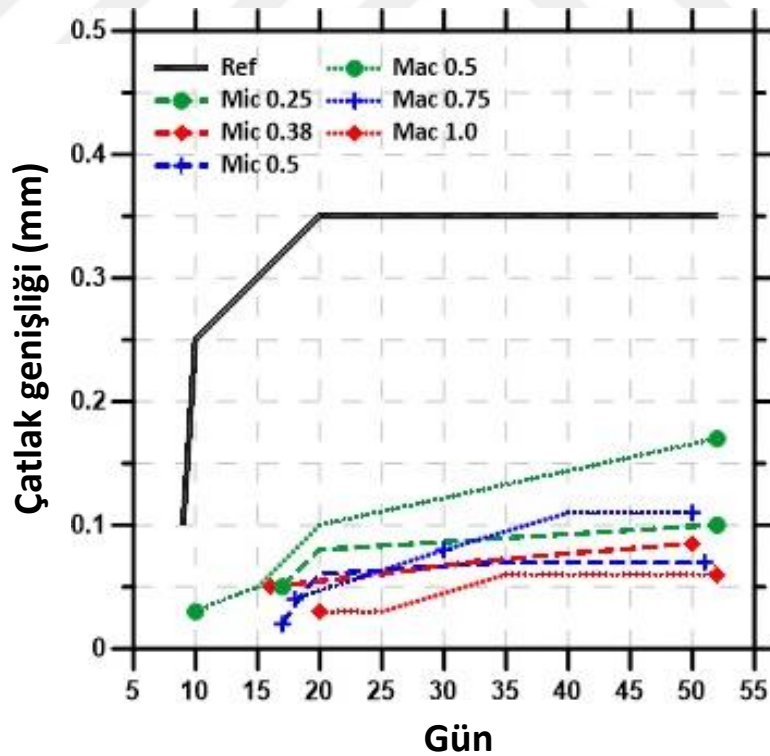


Şekil 4.8 : ASTM C1581 standardına göre ölçülen çatlak genişliklerinin kıyaslanması.

Mao ve diğ. (2023) yaptıkları kısıtlanmış rötre çalışmasında 6 kg/m³ P lif kullanıldığını ve bu oranda lif kullanıldığında gözle görülür çatlak meydana gelmediğini bildirmişlerdir. Tez kapsamındaki mevcut çalışmada, ASTM C1581 standardına göre yapılan çelik halka kullanımlı kısıtlanmış rötre deneylerine göre; mikro PP liflerde 2,0 kg/m³'den, makro liflerde 3,0 kg/m³'den ve hibrit liflerde 0,75 mic + 1,5 mac

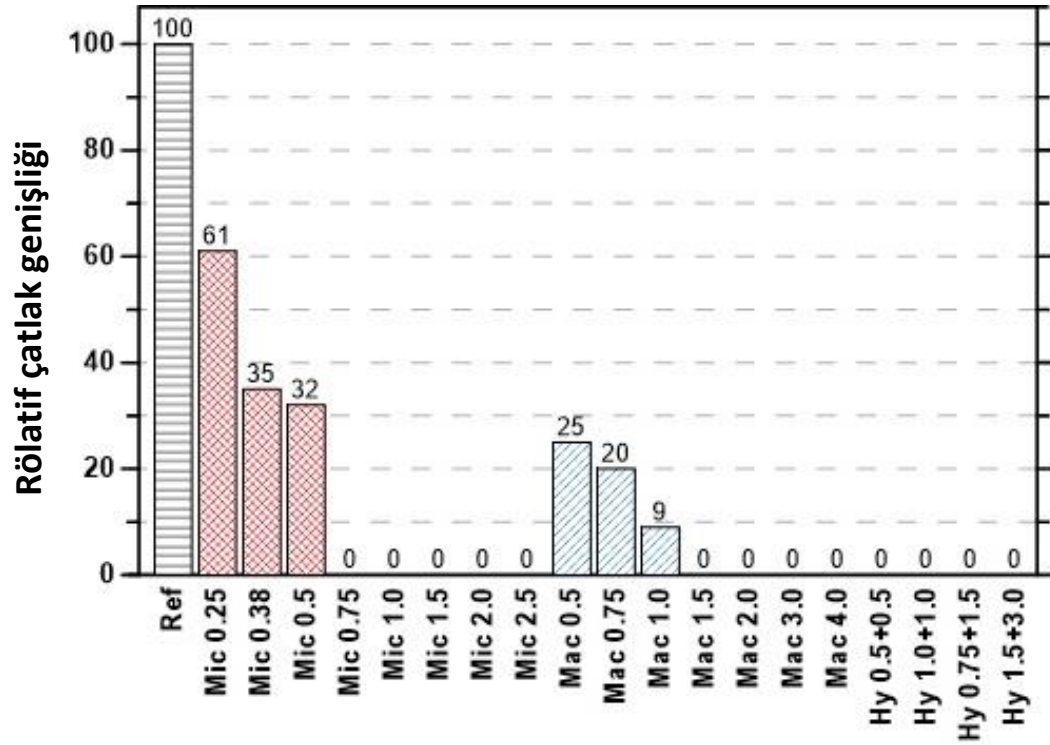
kg/m³'den fazla kullanıldığında numune yüzeyinde gözle görülür bir çatlamanın meydana gelmediği tespit edilmiştir.

Plastik rötre ve kısıtlanmış kuruma rötresinin birleşik şekilde etki ettirildiği modifiye deney düzeneğine baktığımızda da PP lif katkısının çatlak önleme açısından oldukça etkili olduğu söylenebilir. Şekil 4.8'de modifiye yönteme göre betonda meydana gelen çatlak genişlikleri verilmiştir. Daha önceki grafikte olduğu gibi grafik alanında sıfır değerli numunelere sadeleşme amacıyla yer verilmemiştir. Portatif mikroskopla yapılan ölçümlere göre 1,0 kg/m³ makro lif veya 0,5 kg/m³ mikro liften daha fazla lif içeriği kullanıldığında PP liflerin çatlamayı tamamen önleyebildiği görülmüştür. Modifiye yöntemle yapılan deneylerde çatlak genişliklerinin ASTM C1581 yöntemine göre daha az olmasının nedeni, modifiye yöntemde kullanılan beton numunelerin genişliğinin ASTM C1581'de tarif edilen genişlikten yaklaşık 4 kat daha büyük olmasıdır. Daha ince duvar kalınlığına sahip bir numunede daha büyük çatlakların oluşmasının beklendiği bilinen bir gerçektir. Banthia ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada polipropilen liflerin betondaki plastik rötre çatlaklarını kontrol etmede çok etkili olduğunu bildirmiştir.



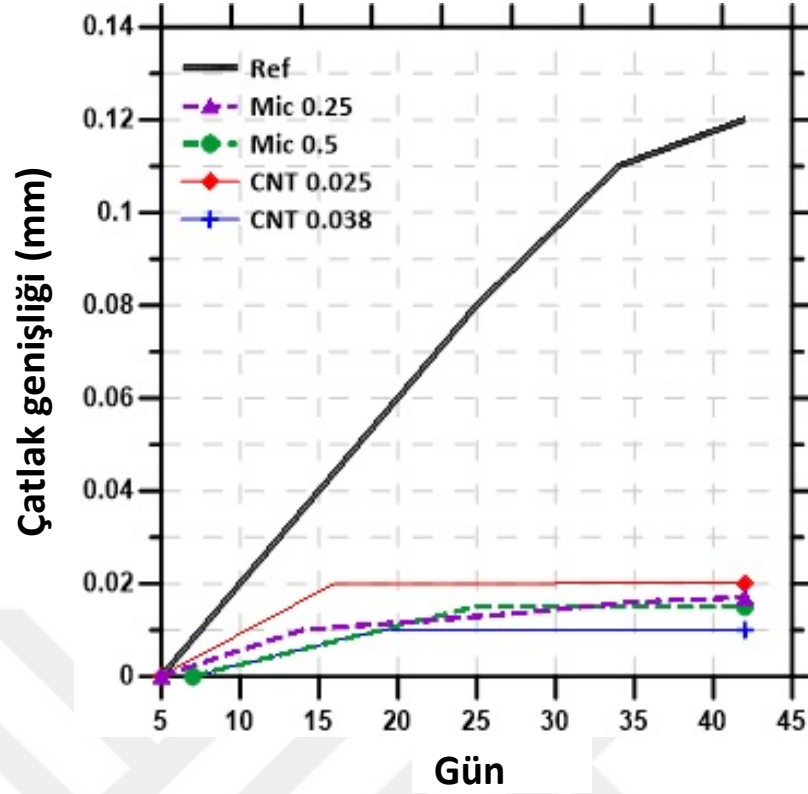
Şekil 4.9 : Modifiye yönteme göre yapılan deneylerde ölçülen çatlak genişlikleri.

Hiç lif içermeyen referans numuneye kıyasla PP lif katkıların betonda çatlak gelişimini ne oranda azalttığı yüzdesel olarak Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Modifiye edilmiş kısıtlanmış rötre deney düzeneğinden elde edilen sonuçlara göre; mikro PP lif 0,75 kg/m³'den, makro PP lif 1,5 kg/m³'den fazla kullanıldığında ve bu çalışmada yer verilen tüm hibrit karışumlu lif oranlarında kullanıldığında çatlakların önlendiği görülmüştür.



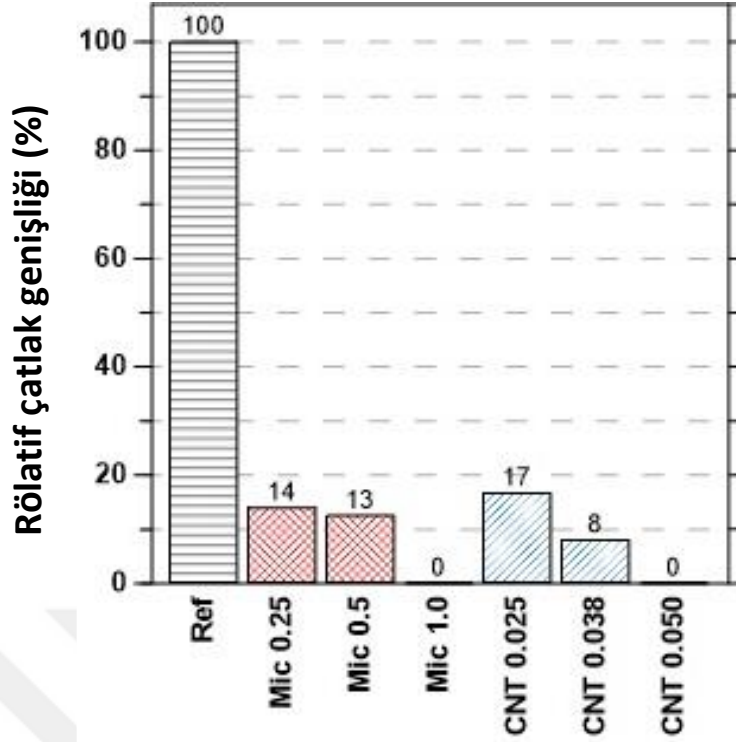
Şekil 4.10 : Modifiye yöntemine göre yapılan deneylerde ölçülen çatlak genişliklerinin kıyaslanması.

MWCNT liflerle donatılanmış harç numunelerde yapılan kısıtlanmış rötre deneylerine ait çatlak ölçümleri incelendiğinde, MWCNT'lerin çatlak genişliklerini azaltma ve çatlak oluşumunu geciktirme yeteneğinin çok etkili olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 4.11'de grafik olarak gösterilmiştir. Söz konusu grafik alanında daha öncekilerde olduğu gibi sıfır değerleri numunelere sadeleştirme amacıyla yer verilmemiştir.



Şekil 4.11 : Harç numunelerde yapılan kısıtlanmış rötre deneylerinde çatlak genişlikleri.

MWCNT lifleri %0,025 gibi çok küçük miktarlarda dahi kullanıldığında referans numuneyle karşılaştırıldığında toplam çatlak genişliğinde %83 gibi önemli bir azalmaya katkı sağlamıştır (Şekil 4.12). Harç numunelerde CNT 0.050 ve Mic 1.0 numunelerinde ise gözle görünür bir çatlakın meydana gelmediği gözlenmiştir. Yuan Gao'nun (2018) yılında yaptığı çalışmaya göre karbon nano liflerin kısıtlanmış rötre deneyinde çatlak genişlemesini sınırlayabildiği sonucuna varılmıştır ve bu durumda da potansiyel bir kendi kendini iyileştirme kabiliyetine işaret ettiği vurgulanmıştır.



Şekil 4.12 : Harç numunelerde yapılan kısıtlanmış rötre deneylerinde ölçülen çatlak genişliklerinin kıyaslanması.

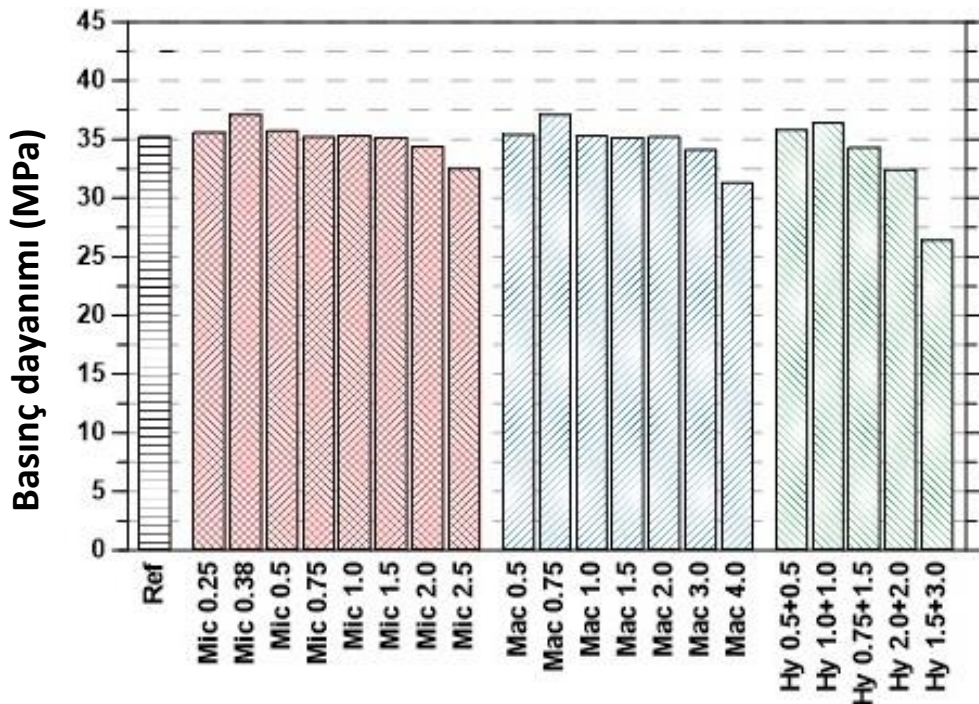
Çatlak gelişimi nano düzeyde başlar, ardından mikro düzeyde devam eder ve son olarak makro düzeyde malzemede kırılma öncesi gelişiminin sonuna gelmiş olur. Çatlak oluşması için harcın yük taşıma kapasitesinin üzerinde bir başlangıç enerjisi gerekmektedir. Nano lif karkı maddeleri çatlak gelişimini nano mertebede kontrol edebilir. Karbon nano tüpler donatı görevi görme ve çatlakları köprüleme yeteneğine sahiptir. Ayrıca nano katkılar harç matrisi içerisindeki boşlukları doldurabilir ve çimento hidratların mikro yapısını güçlendirebilirler. A Dinesh ve arkadaşları (2023) yayınladıkları makalelerinde; karbon nano liflerin kompozitin hidratlar arasında bağlanmasını artırma konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğunu bildirmişlerdir.

4.5 Mekanik özellikler

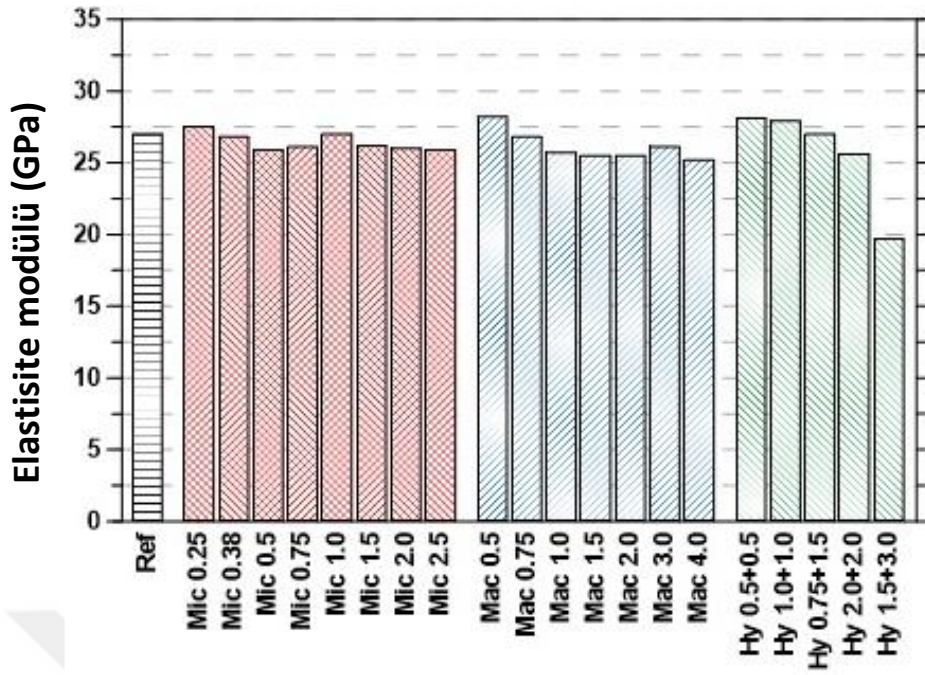
Farklı tip ve oranlarda kullanılan liflerin çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini nasıl değiştirdiği anlamak için eğilme, kırılma enerjisi, ultrases geçiş hızı, elastisite modülü ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Sedaghatdoost ve diğ. (2018) yılında yaptıkları çalışmanın sonucunda harç numunelerini MWCNT liflerle donatılmanın mekanik özellikleri iyileştirdiği rapor edilmiştir. Cerro-Prada ve diğ.

(2021) yaptıkları deneysel çalışmalarında MWCNT liflerin az miktarda dahi harca dahil edildiğinde basınç ve eğilme dayanımlarını arttığını bildirmişlerdir.

Daha önce bahsedildiği gibi tez çalışması kapsamında üretilen beton numunelerde lif olarak PP malzeme tercih edilmiştir. Özgül ağırlığı beton karışımı içerisindeki diğer malzemelere göre daha düşük ve karıştırması daha zor bir malzeme olan PP lifler beton numunelerdeki basınç dayanımı değerlerinde bir miktar azalmaya sebebiyet vermiştir. Şekil 4.13'te ayrıntılı şekilde gösterilen sonuçlara göre, belirli bir seviyeye kadar lif kullanımı dayanımı önemli şekilde etkilememiştir fakat 1,5 kg/m³ mikro, 2,0 kg/m³ makro ve hibrit olarak 0,75 mik + 1,5 mak kg/m³ miktarından daha fazla PP lif kullanımı betonda basınç dayanımı önemli ölçüde düşürmüştür. Basınç dayanımındaki en büyük düşüş %25 ile hy 1,5+3,0 numunesinde gözlenmiştir ve bu durum beton karışımlar açısından keskin bir düşüş olarak değerlendirilmelidir. Elastisite modülü değerlerinde de basınç dayanımı değerlerine paralel bir sonuç tespit edilmiştir. Hy 1,5+3,0 dışındaki PP lif kullanımında ciddi bir değişiklik olmamakla birlikte hy 1,5+3,0 karışımındaki %27 lik azalma göze çarpmaktadır. Şekil 4.17'de görüleceği gibi ultrases geçiş hızı değerinde de benzer bulgular elde edilmiştir. Basınç dayanımı ve elastisite modülündeki azalmanın nedeni PP liflerin düşük yoğunluk ve elastisite modülüne sahip olması ve karışım içerisine geometrilerinden dolayı hava boşluğu getirme eğiliminde olmalarından kaynaklanmaktadır.



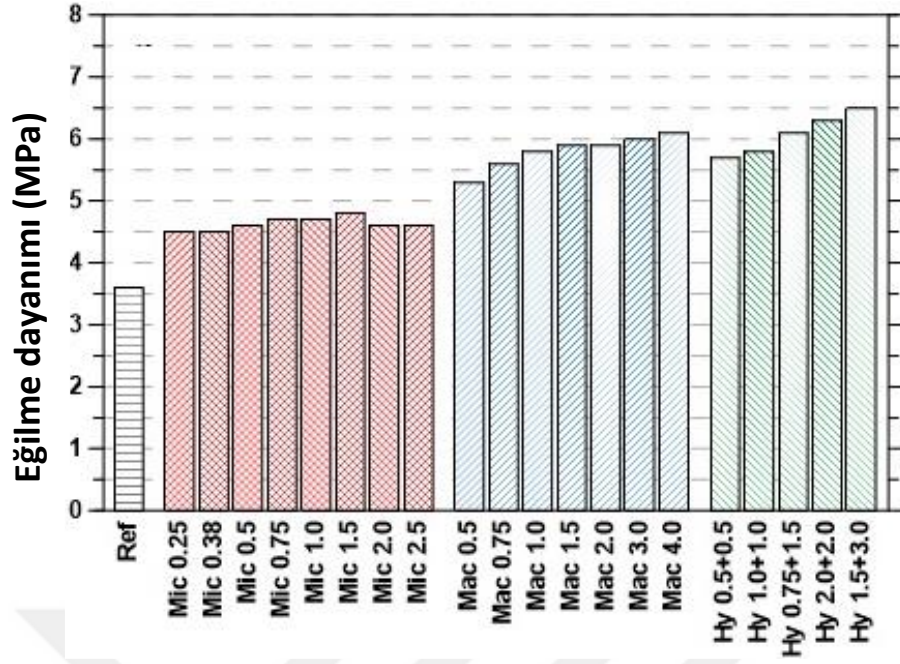
Şekil 4.13 : PP lifli beton numunelere ait basınç dayanımı değerleri.



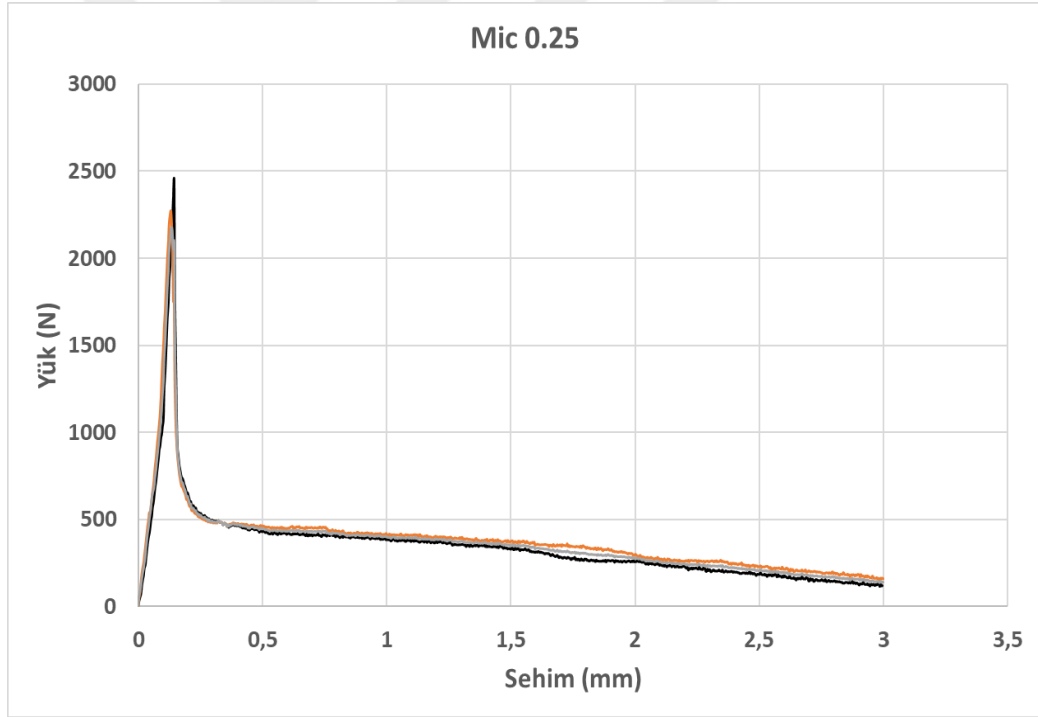
Şekil 4.14 : PP lifli beton numunelere ait elastisite modülü değerleri.

Eğilme dayanımı açısından inceleme yapıldığında, lif kullanımıyla birlikte betonda eğilme mukavemetinin arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, karışımlarda kullanılan liflerin uzunluk ve çapının eğilme mukavemeti değerlerine doğrudan etki ettiğini göstermiştir. Matris ve lifler arasındaki kenetlenme boyları ve kenetlenme ara yüzey alanları ne kadar büyük olursa eğilme mukavemeti değerlerinin de o derece yüksek olduğu gözlenmiştir. Özellikle makro liflerin mikro liflere karşın üstünlüğü söz konusudur. Şekil 4.15'te gösterildiği gibi hy 1,5+3,0 karışımı referans karışımla kıyaslandığında %81 gibi ciddi bir artış gözlenmiştir.

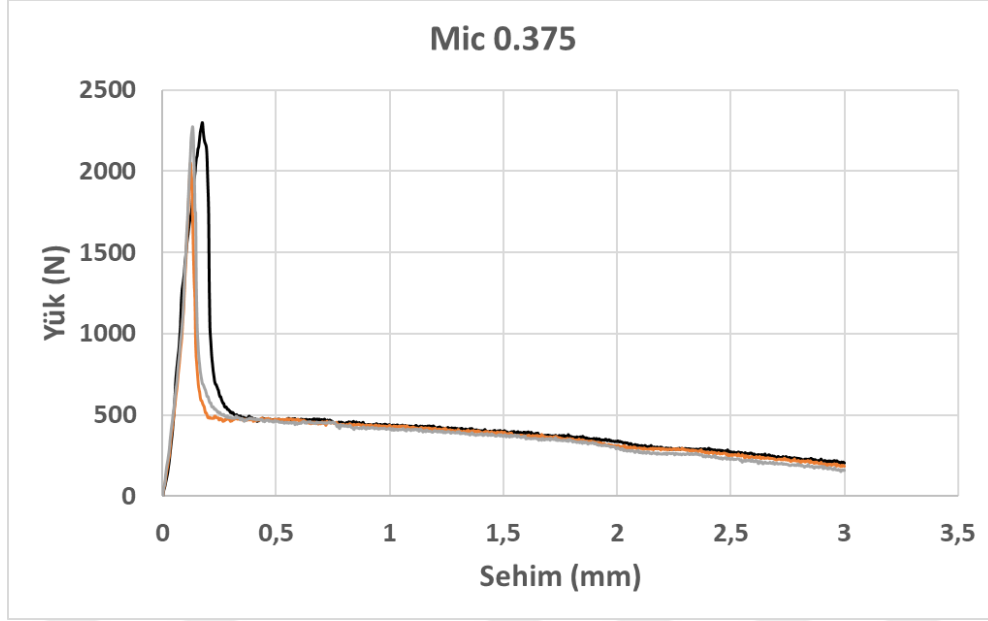
Şekil 4.16'da ise en az mikro PP lif içeriği olan Mic 0.25 kodlu numuneye ait yük – sehim grafiği gösterilmektedir. Pratikteki kullanımlara göre çok az miktardaki lif içeriğinin eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi açısından etkinliği olmakla birlikte sınırlı kalmıştır.



Şekil 4.15 : PP lifli beton numunelere ait eğilme dayanımı değerleri.

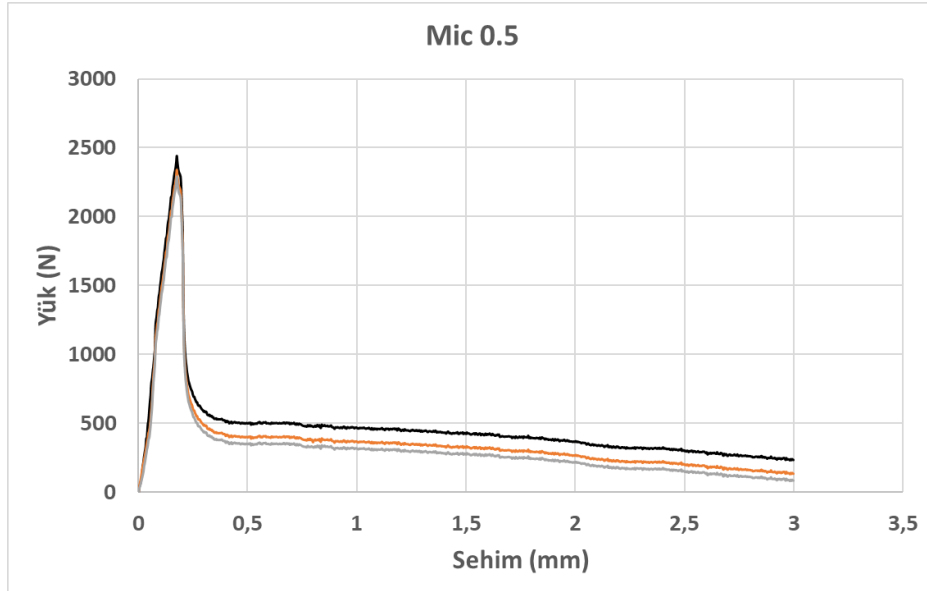


Şekil 4.16 : Mic 0.25 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

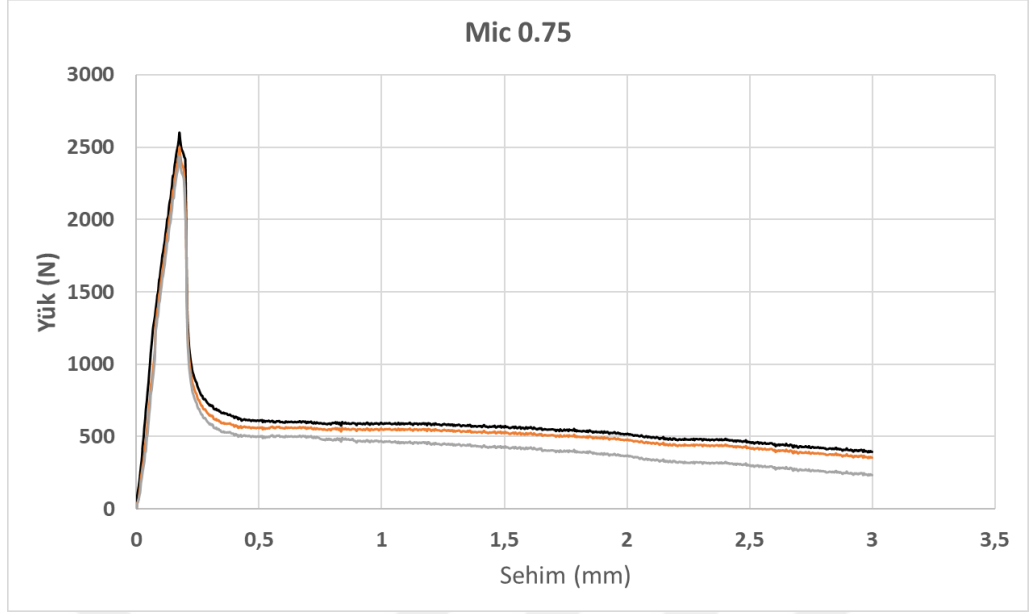


Şekil 4.17 : Mic 0.375 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

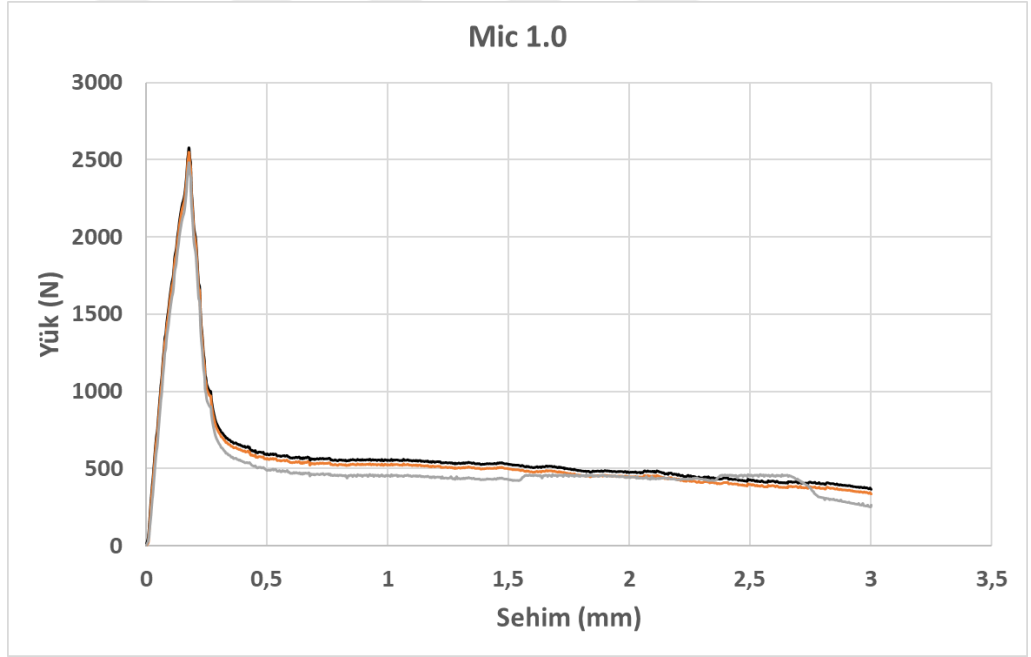
Referans numune gevrek davranış gösterdiği için hemen kırılmıştır. Dolayısıyla enerji yutma kapasitesi lifler numunelere göre oldukça düşüktür bu nedenle grafiklerde yer verilmemiştir. Mikro PP lif katkılı numunelerde başlangıç seviyesi olan %0,25 katkı oranlı numune Mic 0.025 kodlu numunedir. Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve devamındaki grafiklerde mikro lif katkısının miktarı arttıkça numunelerdeki sünek davranış gözlemlenebilir.



Şekil 4.18 : Mic 0.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

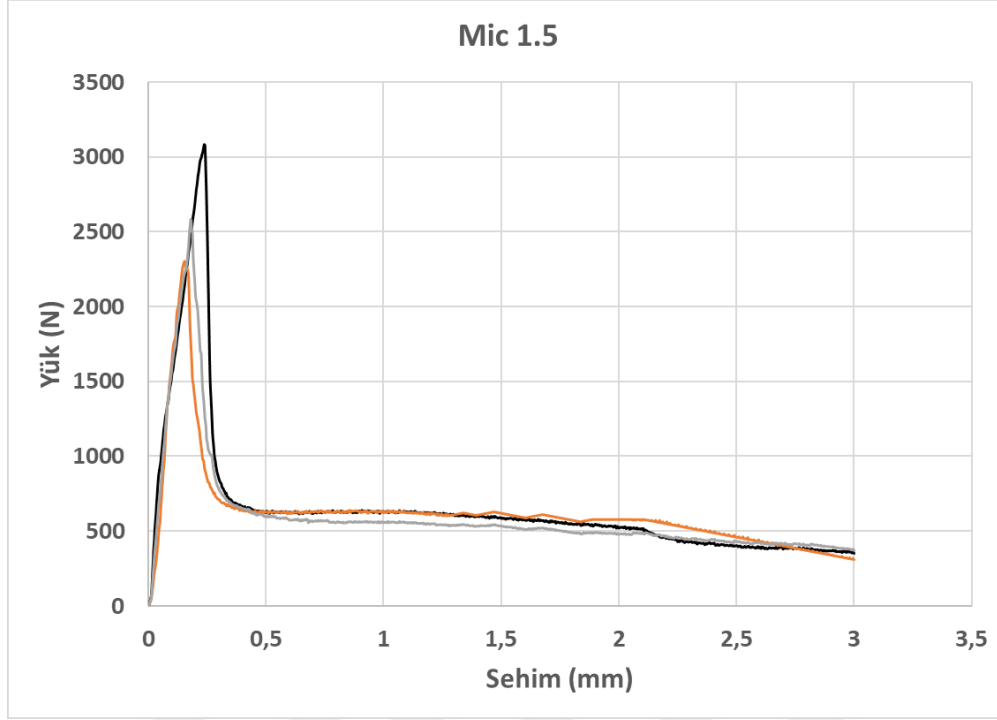


Şekil 4.19 : Mic 0.75 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.



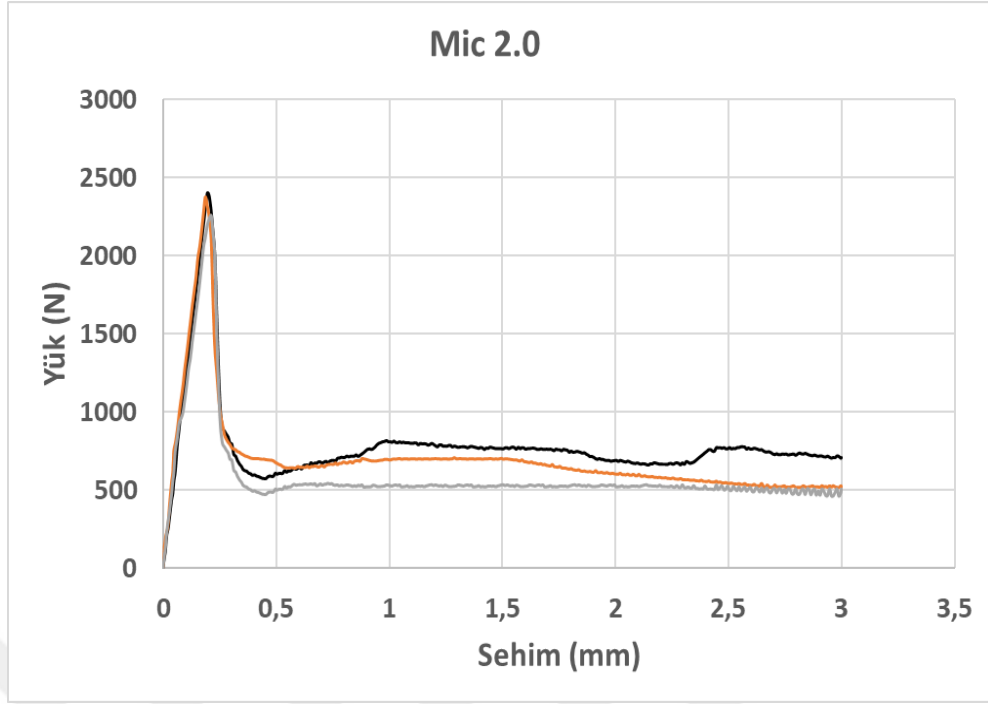
Şekil 4.20 : Mic 1.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de, Mik 0.75 ve Mik 1.0 numunelerine ait yük/sehim grafikleri gösterilmektedir.



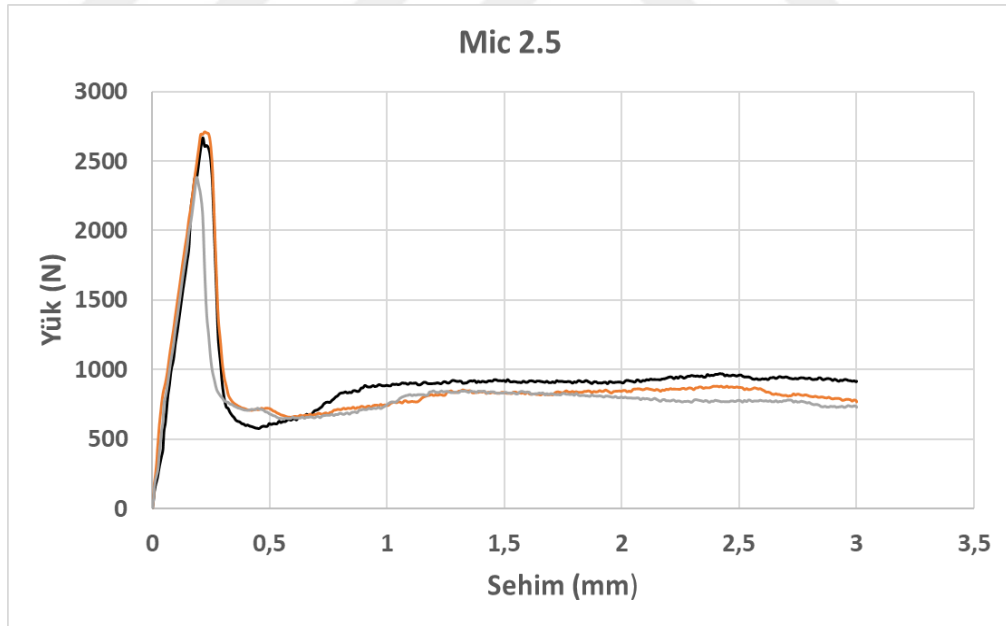
Şekil 4.21 : Mic 1.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Mikro PP lif katkı numunelerde en yüksek kırılma enerjisi değeri lif oranı ağırlıkça 2,5 kg/m³ olan Mic 2.5 kodlu numunede hesaplanmıştır. Piyasada ve yapı endüstrisinde “elyaf” ismiyle bu lif türü giderek artan oranda kullanıldığında kırılma enerjisini de arttırmaktadır. Ancak pürüzsüz bir yüzeye sahip olması, eş değer çapının makro liflere göre görece az olması, boyunun kısa olması gibi etmenler nedeniyle özellikle iri agregaya sahip beton numunelerde makro lifler kadar etkinlik gösterememiştir. Dolayısıyla eğer rötre çatlaklarını önleme, sınırlandırma veya geciktirmenin yanında kırılma enerjisi yönünden de anlamlı bir iyileşme bekleniyorsa mikro lif katkısını yüksek oranda kullanmak gerekecektir.

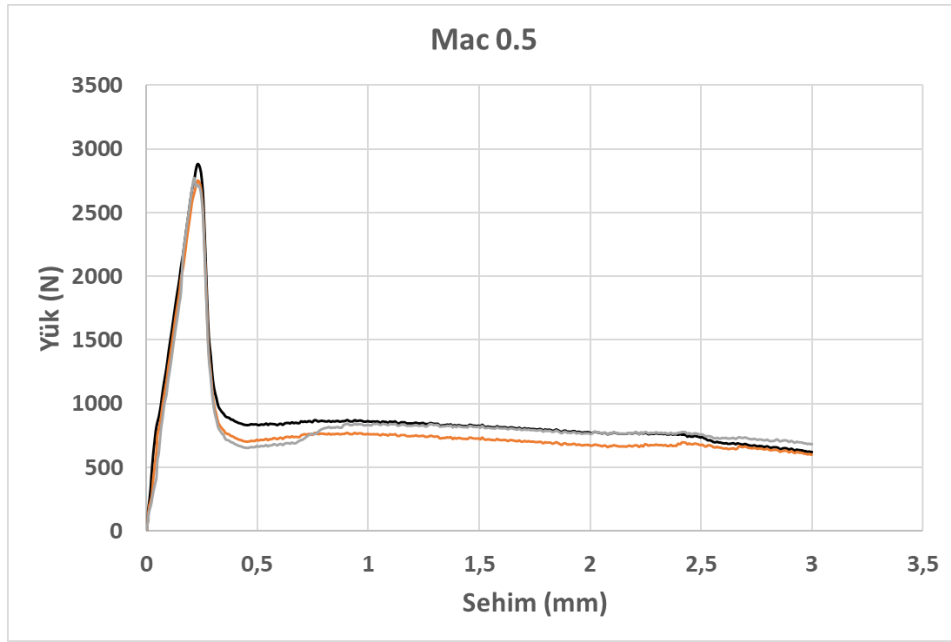


Şekil 4.22 : Mic 2.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te Mic 2.0 ve Mic 2.5 numunelerine ait eğilme deneyinden elde edilen yük/sehim grafikleri gösterilmektedir.

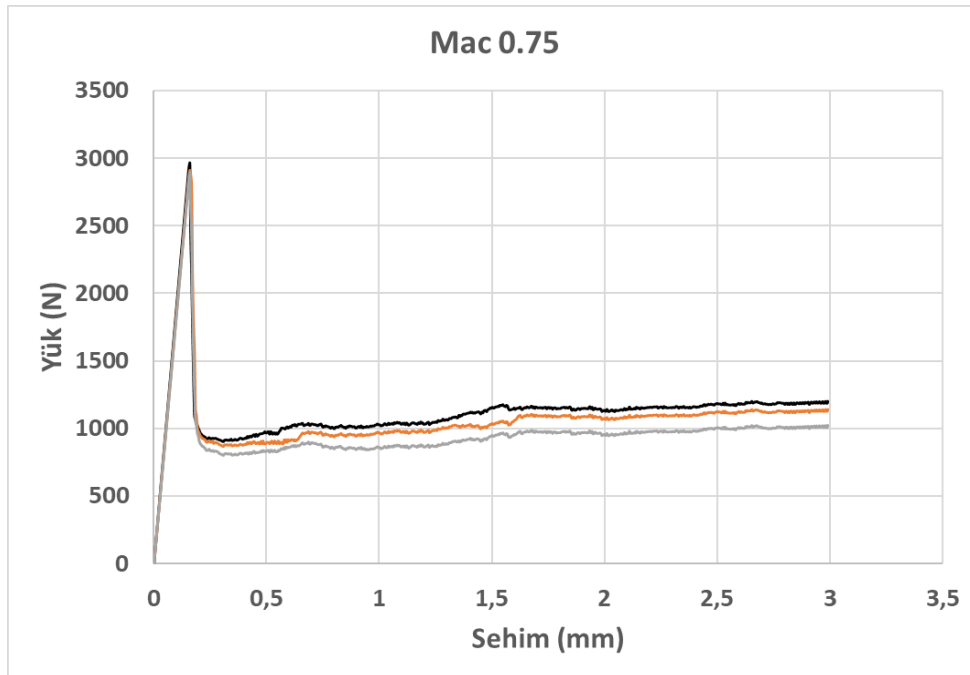


Şekil 4.23 : Mic 2.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

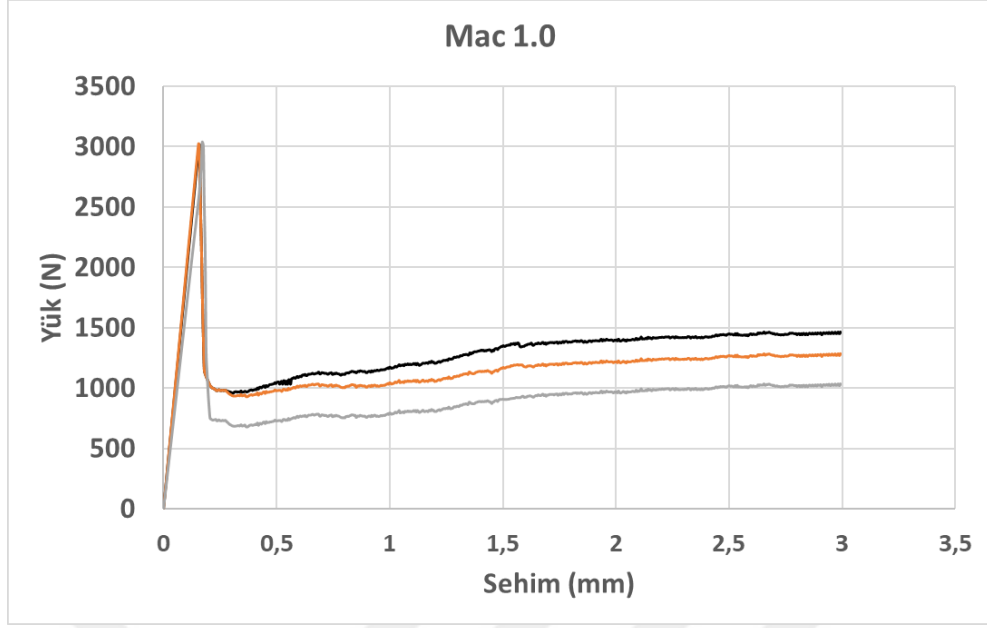


Şekil 4.24 : Mac 0.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Makro PP liflerin donatı olarak kullanıldığı beton numunelerde yapılan eğilme deneyi ve kırılma enerjisi sonuçlarına baktığımızda en düşük oranda kullanılan ağırlıkça 0,5 kg/m³ oranında ağırlığa sahip Mac 0.5 kodlu numunede dahi anlamlı bir kırılma enerjisi değeri ve sünek davranışa sahip olduğunu görmekteyiz. Diğer numunelerle kıyaslayabilme imkânı olması açısından 3 mm sehim miktarında deney sonlandırıldığında dahi Şekil 4.24'te gösterilen Mac 0.5 kodlu numunenin halen yük taşıyabildiğini görmekteyiz.

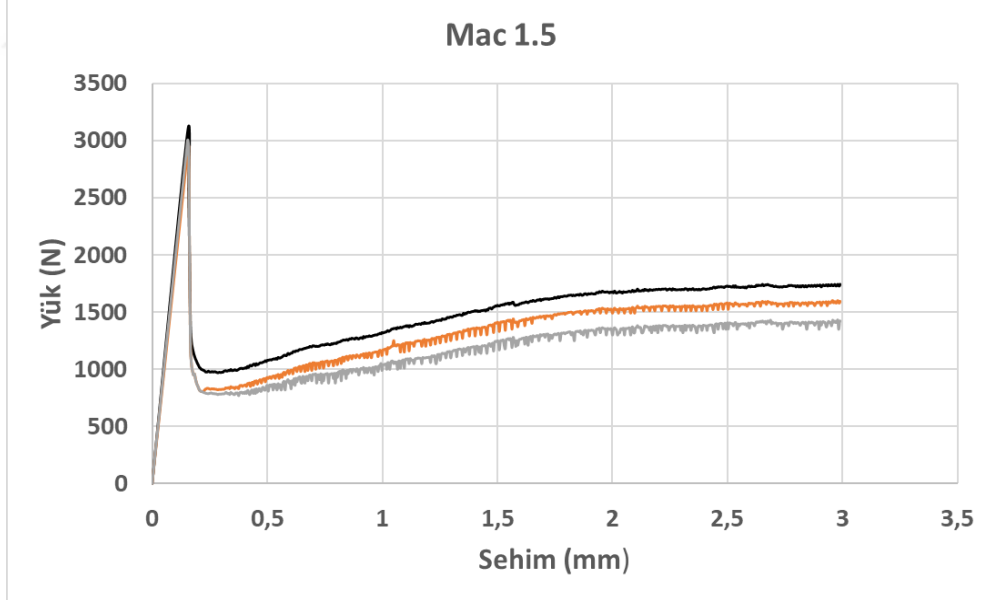


Şekil 4.25 : Mac 0.75 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

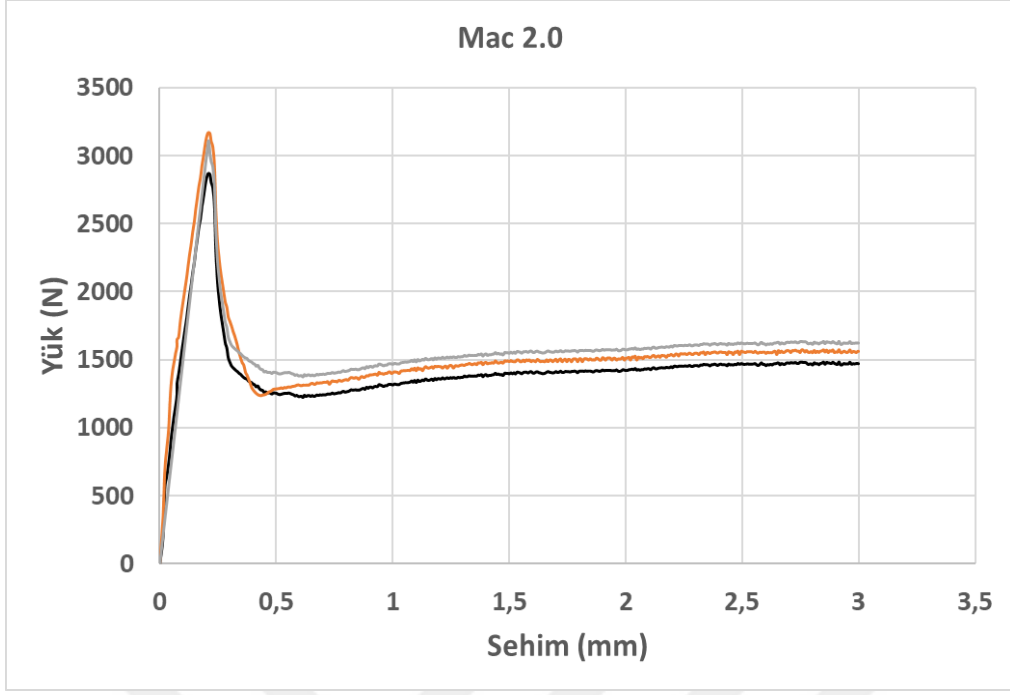


Şekil 4.26 : Mac 1.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de Mac 1.0 ve Mac 1.5 numunelerine ait eğilme deneyinden elde edilen yük/sehim grafikleri gösterilmektedir. Pratikte makro lifler $2,0 \text{ kg/m}^3$ olarak sıklıkla kullanılmaktadır, makro lifler m^3 ’te $1,0 \text{ kg}$ miktarından itibaren kırılma enerjisi bakımından ciddi etkinlik göstermiştir.

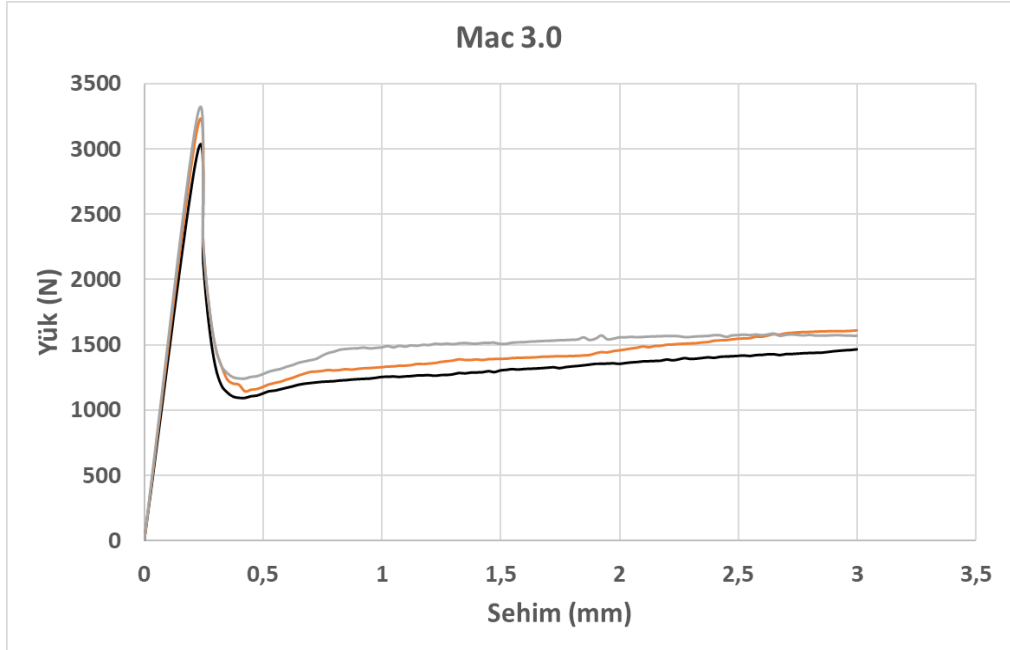


Şekil 4.27 : Mac 1.5 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

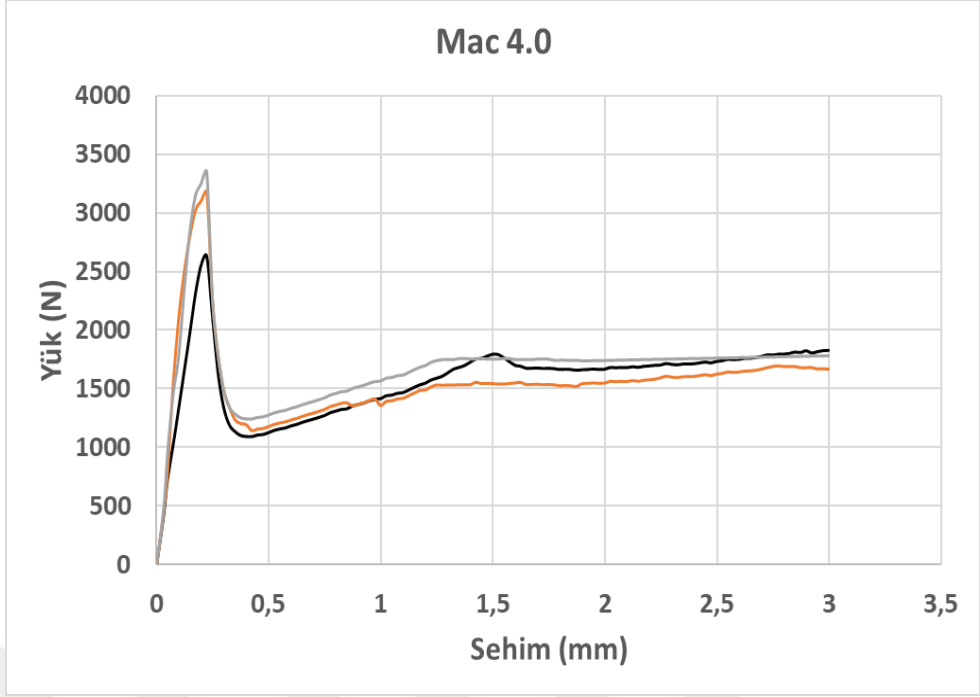


Şekil 4.28 : Mac 2.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Makro PP liflerin tez çalışması kapsamında kullanılan diğer liflere (Mikro PP ve MWCNT) göre boy olarak çok daha uzun olması ve eşdeğer çapının diğer liflere göre çok daha yüksek olması nedeniyle beton içerisindeki aderans alanı çok daha fazladır. Bu durum neticesinde makro lif katkıları diğer bir deyişle donatıları betona yüksek derecede enerji yutma kapasitesi özelliği sağlamaktadır.

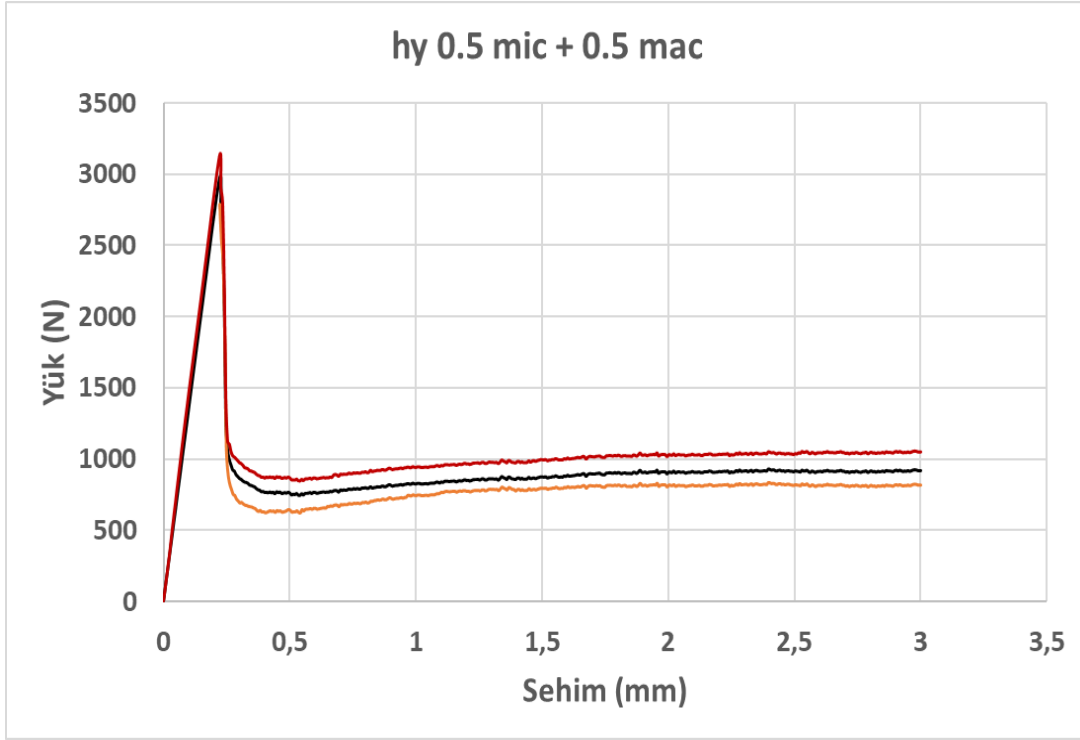


Şekil 4.29 : Mac 3.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.



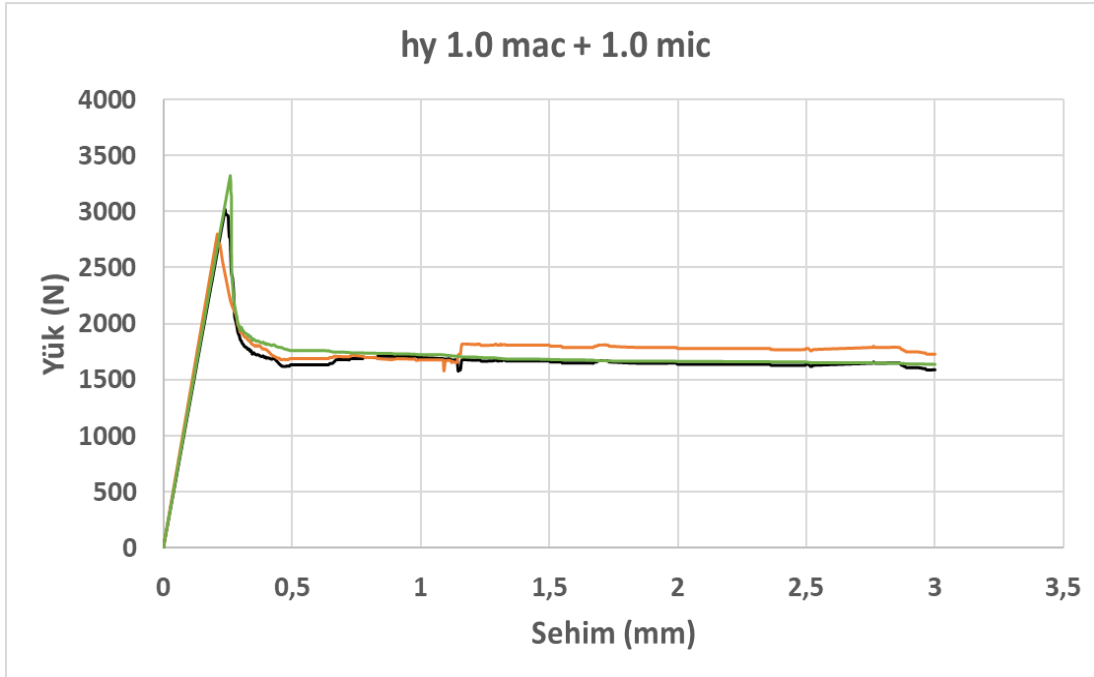
Şekil 4.30 : Mac 4.0 numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Makro lif katkılı betonlardan kırılma enerjisi deneylerinde ve hesaplamalarında en yüksek performansı en yük lif oranına sahip olan Mac 4.0 kodlu numune göstermiştir (Şekil 4.30). Bu numunede lif oranı, kullanılan çimento oranının Yüzde 4'ü kadardır. Tez çalışması kapsamında üretilen betonlarda maksimum agrega dane boyutu 10 mm'dir. Dere kumu ve filler malzemeler ise ortalama bir betona göre daha yüksek oranda kullanılmıştır. Rötire deneylerindeki farkı net görebilmek adına dizayn edilen bu betonun su ihtiyacı yüksektir. Granülometrideki bu ince malzeme yoğunluğu betonda işlenebilirliği bir miktar zorlaştırıcı hale getirmiştir. Bununla birlikte uzunluğu fazla olan makro PP liflerin de katkı olarak kullanılması işlenebilirliği epey düşürmüştür. Pratik kullanımda metreküpte 6 kg'a kadar kullanım alanı bulan makro PP lif, tez çalışması kapsamında dizayn edilen betonun özelliği nedeniyle maksimum 4 kg'la sınırlandırılmıştır.

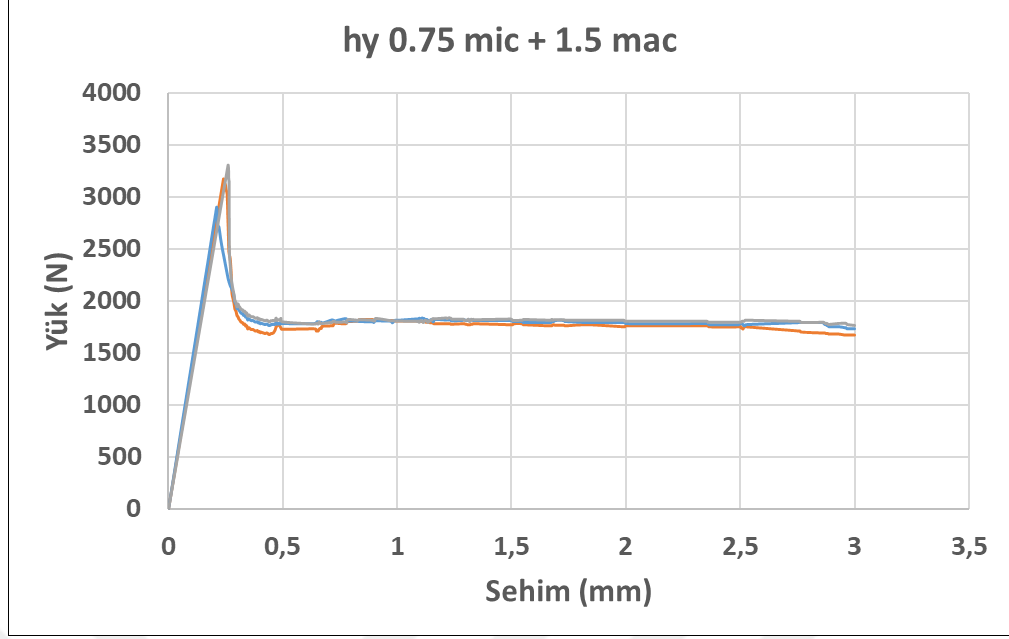


Şekil 4.31 : Hy 0.5 mic + 0.5 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Şekil 4.31’de hy 0.5 mic + 0.5 mac numunelerine ait, Şekil 4.32’de ise hy 1.0 mac + 1.0 mic numunelerine ait eğilme deneyinden elde edilen yük – sehim grafikleri gösterilmiştir.



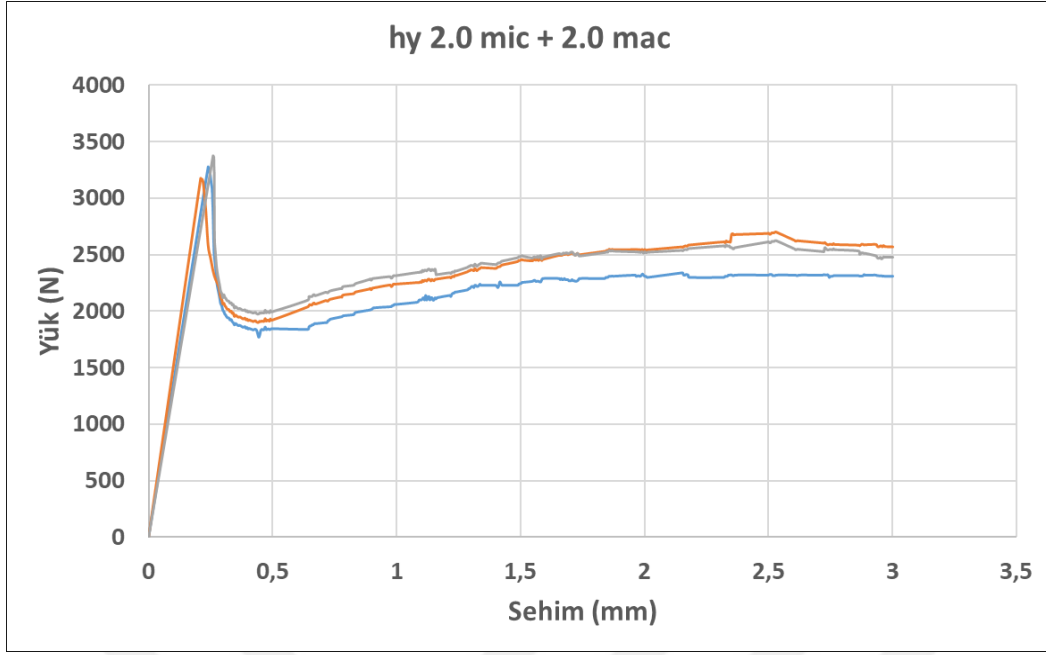
Şekil 4.32 : Hy 1.0 mic + 1.0 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.



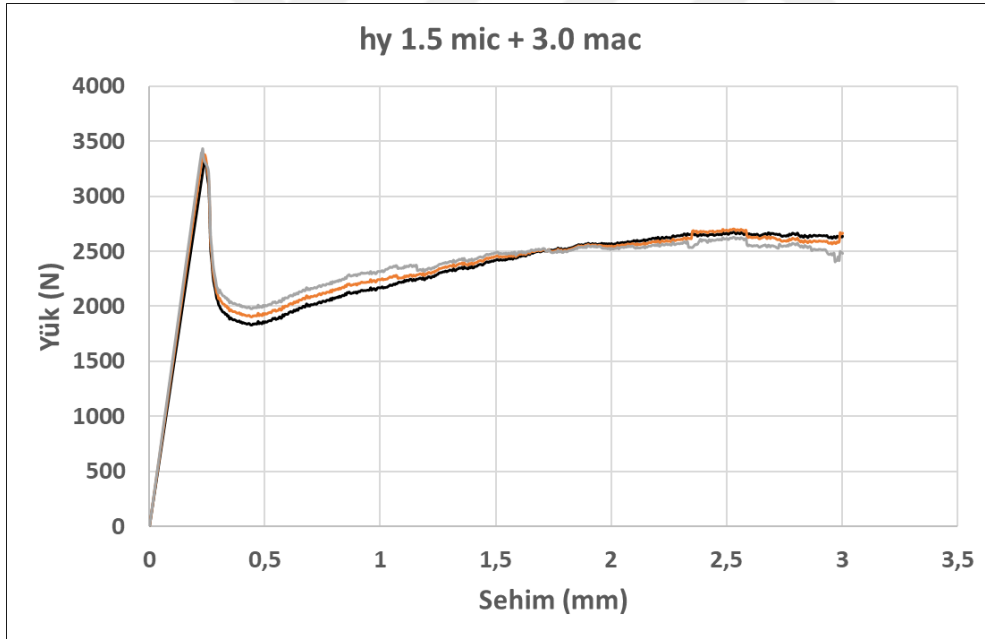
Şekil 4.33 : Hy 0.75 mic + 1.5 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Daha önce de bahsedildiği gibi çimento esaslı kompozitlerde çatlak gelişimi küçük ölçekten başlayarak makro ölçeğe gelmektedir. Mikro ve makro liflerin birlikte kullanımı hem mikro ölçekteki çatlaklarda hem de makro ölçekteki çatlaklarda birlikte direnç oluşturmaktadır. Her iki ölçekte sağlanan bu direnç hibrit liflere rötire deney sonuçlarında olduğu gibi kırılma enerjisi değerlerinde de anlamlı bir üstünlük kazandırmaktadır. Çimento esaslı kompozitlerde hibrit lif kullanımı literatürde kısmen bildirilse de günümüzde pratik kullanımda oldukça kısıtlıdır. Alışkanlıkların zor değiştiği yapı endüstrisinde tek çeşit lif yerine liflerin birlikte hibrit kullanımı hem ekonomi hem dayanım hem de durabilite anlamında daha yüksek getiriler sağlayacaktır.

Şekil 4.34'te hy 2.0 mic + 2.0 mac numunelerine ait ve Şekil 4.35'te hy 1.5 mic + 3.0 mac numunelerine ait eğilme deneyinden elde edilen yük sehim grafikleri gösterilmektedir.

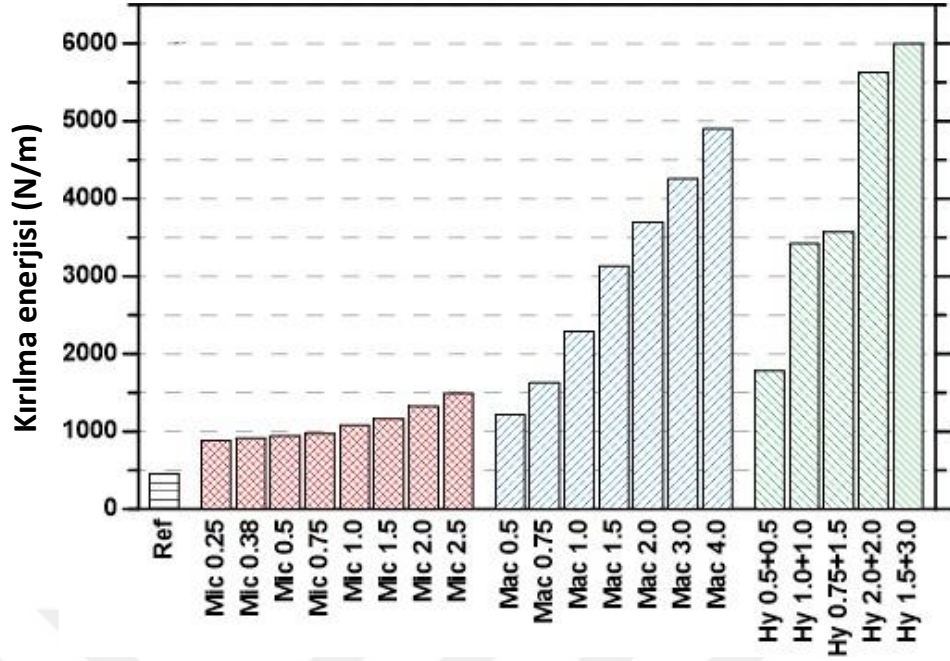


Şekil 4.34 : Hy 2.0 mic + 2.0 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.



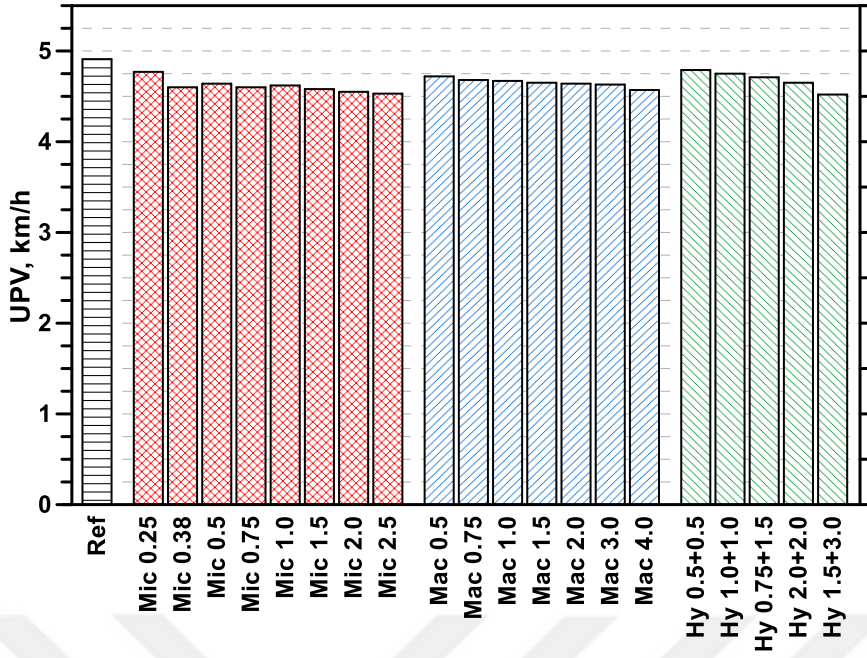
Şekil 4.35 : Hy 1.5 mic + 3.0 mac numunelerine ait eğilmede yük sehim grafikleri.

Kırılma enerjisi değerleri incelendiğinde eğilme dayanımına benzer eğilimde sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Lif içeriğinin artmasıyla birlikte kırılma enerjisi değerleri referans karışıma göre önemli ölçüde artmıştır (Şekil 4.36). Betona ne kadar çok lif eklenirse o kadar süneklik kazanılmış olmaktadır. Daha sünek durum daha fazla kırılma enerjisi gerektirecektir. Lif tipi de kırılma enerjisi değerlerini etkilemiştir. Makro lifler mikro liflere göre daha yüksek kırılma enerjisi değerleri sergilemiştir.



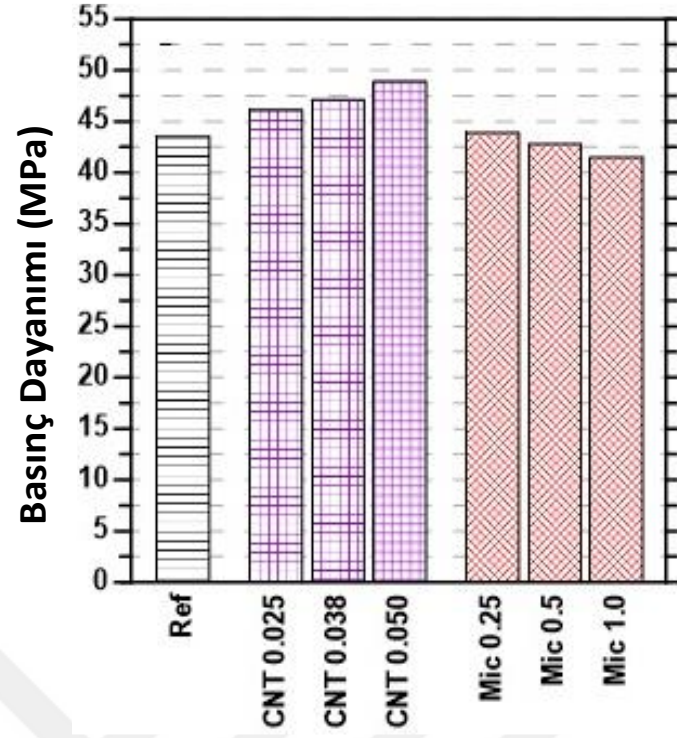
Şekil 4.36 : PP lifli beton numunelere ait kırılma enerjisi değerleri.

Matris içerisinde kalan gömülü lif uzunluğu makro lifler için anlamlı bir avantaj sağlamaktadır. Şengül (2018) ve Hsie (2008) yaptıkları çalışmalarda tez çalışması kapsamındaki mevcut çalışmamıza benzer şekilde lif uzunluğunun kırılma enerjisi üzerinde olumlu etkileri olduğunu vurgulamışlardır. Tez çalışmasındaki eğilme deneylerindeki numuneler ebatları 70 x 70 x 280 mm ebatlarındaki beton numunelerdir. Bu numunelere daha evvel bahsedildiği gibi çentikler açılmıştır ve hesaplamalar net kesit alanı üzerinden yapılmıştır. Yüksek oranda lif içeren numunelerde sehim miktarı çok fazla olmakla birlikte doğru kıyaslama yapabilmek için eğilme deneyleri 3 mm'lik sehim seviyesinde sonlandırılmıştır.

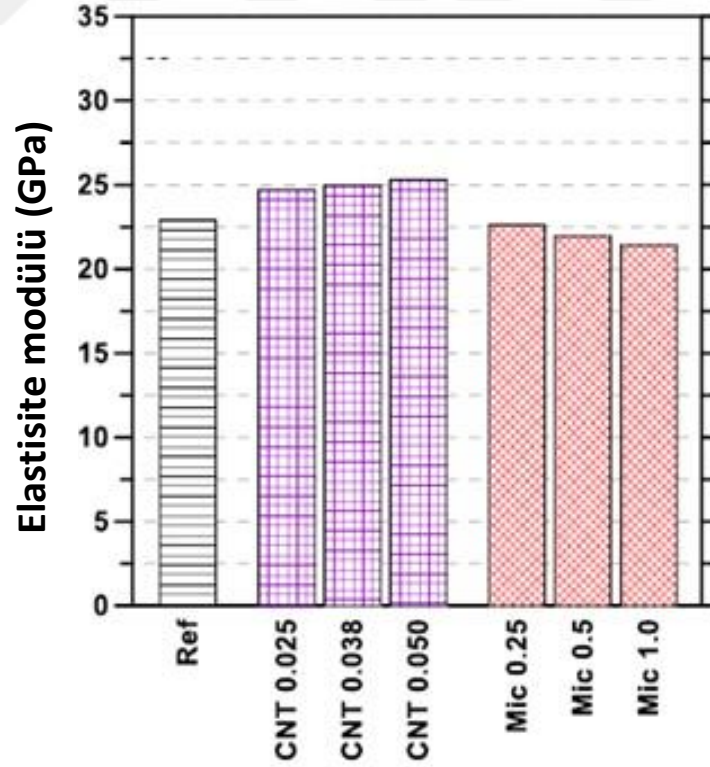


Şekil 4.37 : PP lifli beton numunelere ait ultrases geçiş hızı değerleri.

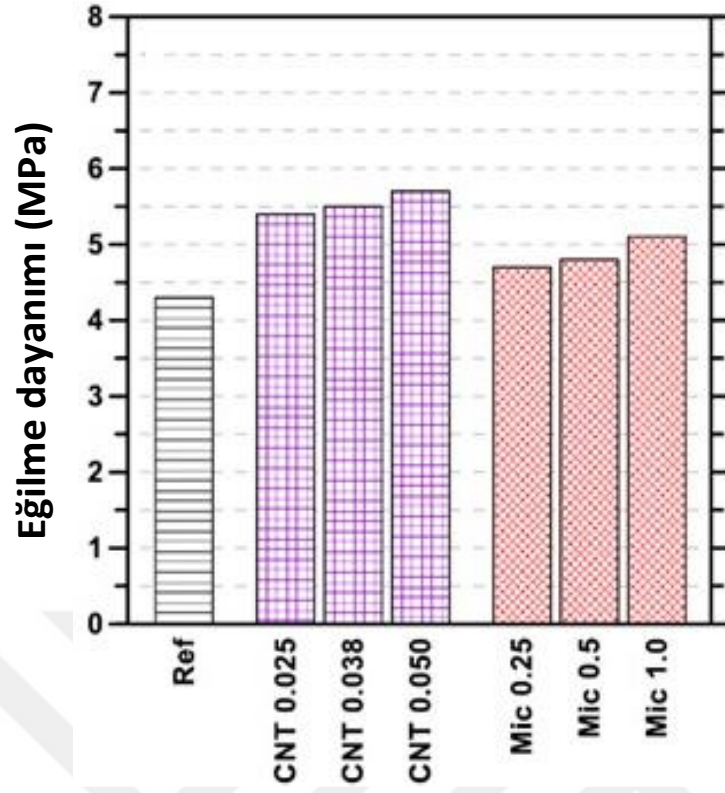
Al-Mufadi ve Sherif (2019) yaptıkları çalışmada; MWNCT'lerin ne kadar çok kullanılırsa, basınç dayanımının da o kadar yüksek olduğunu bulmuşlardır. Hawreen (2019a) CNT lif katkısının genel olarak çimento esaslı kompozitlerde elastisite modülünü iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Tez çalışması kapsamındaki harç karışımlarının basınç dayanımı (Şekil 4.38), UPV ve elastisite modülü sonuçlarına bakıldığında, PP liflerin uygulanmasıyla değerlerin bir miktar düştüğü, buna mukabil MWCNT eklenmesiyle söz konusu değerlerin bir miktar arttığı gözlenmiştir. CNT 0.050 kodlu numunede basınç dayanımında %12, elastisite modülünde ise %10 artış ölçülmüş olup bu maksimum gelişimi temsil etmektedir. Bu azalma PP liflerinin daha düşük yoğunluk ve elastisite modülüne sahip olmasıyla açıklanabilir. MWCNT'lerin özgül ağırlıklarının epey yüksek ve üstün mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen, bu çalışmada seçilen su/çimento oranının 0,5 olması nedeniyle basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinde sınırlı iyileşmeler olmuştur. Su/çimento oranındaki değişiklikler kompozitteki boşluk oranını değiştireceğinden CNT katkılarının etkinliğini de değiştirecektir. Aynı zamanda süperakışkanlaştırıcı katkıların türü ve miktarı ile kullanılan MWCNT'lerin özellikleri de kompozitlerin mekanik davranışını etkileyecektir. Hawreen (2019b), yaptıkları çalışmada donatılama verimliliğinin CNT'lerin türüne ve miktarına ve ayrıca su/çimento oranına bağlı olduğunu bildirmiştir.



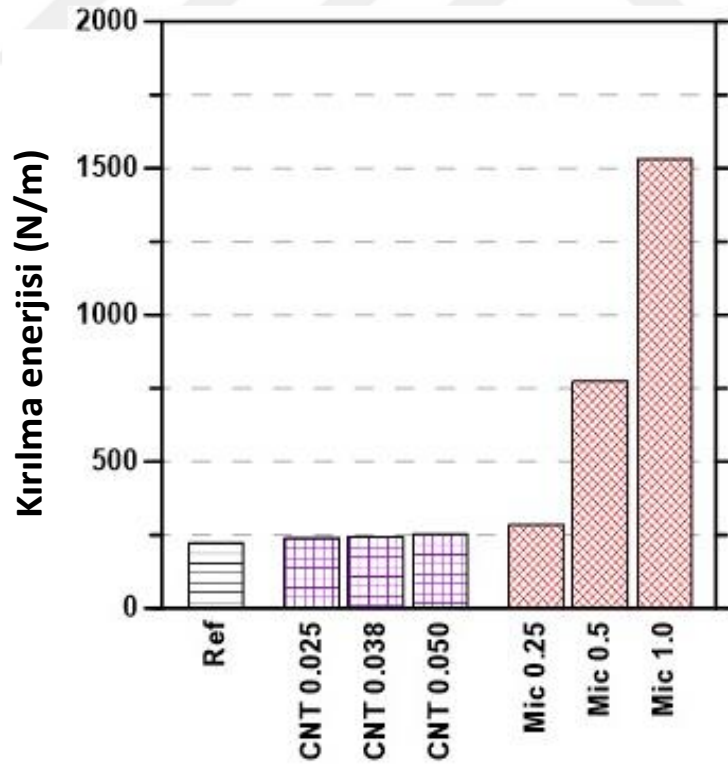
Şekil 4.38 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait basınç dayanımı değerleri.



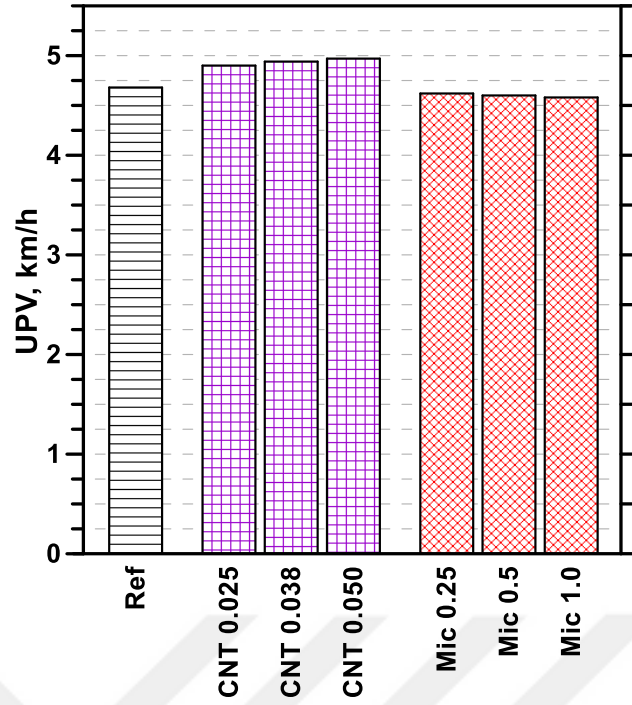
Şekil 4.39 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait elastisite modülü değerleri.



Şekil 4.40 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait eğilme dayanımı değerleri.



Şekil 4.41 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait kırılma enerjisi değerleri.



Şekil 4.42 : MWCNT ve mikro PP lifli harç numunelere ait ultrases geçiş hızı değerleri.

MWCNT lif içeriği artarken, eğilme kesit alanı boyunca da lif sayısı artmaktadır. Artan lif sayısına karşılık çatlağı başlatmak veya var olan çatlakları genişletmek için daha yüksek değerlerde gerilmeye ihtiyaç olduğu açıktır. Kırılma enerjisi sonuçları değerlendirildiğinde mikro PP lifler MWCNT liflere göre daha iyi performans göstermiştir. MWCNT'lerin çok küçük uzunluklarının enerjiyi absorbe etmek için yeterli olmadığı ancak nispeten daha uzun mikro PP liflerin MWCNT'lere göre daha iyi çatlak köprüleme etkisi sağladığı anlaşılmıştır.



5. SONUÇ

Bu deneysel çalışmanın amacı, ASTM C1581 standardında tarif edilen yönteme ek olarak birleşik rötre koşulları altında meydana gelen çatlakların genişliklerini incelemektir. Basit, ucuz ve ticari olarak temin edilebilen PP liflerin çimento esaslı kompozitlerdeki rötre kaynaklı meydana gelen çatlakları azaltma veya geciktirme yeteneklerini ve mekanik özelliklerdeki olası iyileştirmeleri deneysel olarak göstermek amaçlanmıştır. Öte yandan harç içerisinde kolaylıkla dağılılabilen MWCNT'lerin kısıtlanmış rötre kaynaklı çatlaklara ve mekanik özelliklere etkisi de araştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara dayanarak, aşağıdaki değerlendirmeler çıkarılabilir:

- 1- Çimento esaslı kompozitlerde kırılmanın kademeli ve çok ölçekli olması nedeniyle tüm ölçeklerde çatlakları durdurmak için farklı tipte liflerin hibrit bir şekilde kullanılması önerilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları, serbest rötrenin azaltılması, kısıtlanmış rötre, eğilme mukavemeti ve kırılma enerjisi açısından hibrit lif uygulamasının tek tip lif kullanımına göre daha etkili olduğunu göstermiştir.
- 2- Çimento esaslı kompozitlerde hibrit lif kullanımı literatürde kısmen bildirilse de günümüzde pratik kullanımda oldukça kısıtlıdır. Alışkanlıkların zor değiştiği yapı endüstrisinde tek çeşit lif yerine liflerin birlikte hibrit kullanımı hem ekonomi hem dayanım hem de durabilite anlamında daha yüksek getiriler sağlayacaktır.
- 3- Ölçülen çatlak genişlikleri açısından bakıldığında, PP lif katkıları içerik oranına bağlı olarak kısıtlanmış rötre kaynaklı çatlakları önemli ölçüde azaltmıştır. Bu çalışmada, ASTM C1581'e göre yapılan ölçümlere dayanarak, mikro PP lif içerik oranının $2,0 \text{ kg/m}^3$ 'ten, makro liflerin $3,0 \text{ kg/m}^3$ 'den ve hibrit liflerin $0.75 \text{ mik} + 1.5 \text{ mak}$ 'dan daha fazla olması durumunda gözle görülür bir çatlamanın meydana gelmediği tespit edilmiştir. Modifiye edilmiş kısıtlanmış rötre deneylerinin sonuçlarına göre, içerik oranı $0,75 \text{ kg/m}^3$ 'ten fazla mikro PP

lif, 1.5 kg/m³'ten fazla makro lif kullanıldığında ve tüm hibrit karışımlarda gözle görünür çatlak oluşmadığı anlaşılmıştır.

- 4- Lif kullanımı ile birlikte betonun eğilme dayanımında artış gözlenmiştir. Sonuçlar, karışımlarda kullanılan liflerin uzunluğunun ve eş değer çapının eğilme mukavemeti değerlerine doğrudan etki ettiğini göstermiştir. Hy 1.5 mic + 3.0 mac karışımında referans karışıma göre eğilme mukavemetinde %81 oranında artış gözlenmiştir. Benzer şekilde lif içeriği arttıkça kırılma enerjisi değerleri de referans karışıma göre önemli ölçüde artmıştır. Bununla birlikte, daha yüksek lif içeriğine sahip karışımlarda daha düşük basınç dayanımı, daha düşük UPV değeri ve daha düşük elastisite modülü ölçülmüştür. PP lifler 1,5 kg/m³ mikro, 2,0 kg/m³ makro ve hibrit olarak 0,75 mikro + 1,5 makro kg/m³'dan fazla kullanıldığında basınç dayanımında bir miktar azalma görülmüştür. PP lif içeriği arttıkça slump değerleri düşmüş ve işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür.
- 5- MWCNT katkıları düşük oranlı kullanımlarda dahi kısıtlanmış rötreye karşı iyi performans göstermiştir. Çimento ağırlığına göre %0,025 kullanılan MWCNT katkısı kısıtlanmış rötreye çatlaklarını %83 oranında önlemiştir. MWCNT %0,050 oranında kullanıldığında ise kısıtlanmış rötreye çatlaklarını %100 oranında önlemiştir.
- 6- Harç karışımların basınç dayanımı, UPV ve elastisite modülü sonuçlarına göre PP lif kullanıldığında değerlerin bir miktar düştüğü, MWCNT kullanıldığında ise değerlerin bir miktar arttığı görülmüştür. Maksimum performansı temsil eden CNT 0.050 kodlu numune için basınç dayanımında referansa göre %12'lik, elastisite modülünde ise %10'luk bir artış tespit edilmiştir.

Öneri olarak, MWCNT karışimli harçlarla yapılan deneysel çalışmaların daha ileri seviyeye geliştirilmesi önerilmektedir. Karbon saflığının ekonomik olarak fiyatı çok etkilediği MWCNTlerde düşük saflığının veya yüksek saflığın mekanik özellikleri ve rötreye çatlaklarını nasıl etkilediği kıyaslanabilir. Öte yandan değişik su/çimento oranlarında yine nano liflerin kıyaslamasının yapılabilmesi literatürdeki boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adesina, A. (2021).** Performance of cementitious composites reinforced with chopped basalt fibres – An overview. *Construction and Building Materials*, 266, 120970.
- Al-Mufadi, F., & Sherif, H. A. (2019).** Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on Sensing Crack Initiation and Ultimate Strength of Cement Nanocomposites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(2), 1403–1413.
- Al-Rekabi, S. R. J. (2017).** *Use of Carbon Nanofilaments in Producing Cementitious Composites with Improved Mechanical and Durability Performance*. University of Brighton.
- Alrekabi, S., Cundy, A., Lampropoulos, A., & Savina, I. (2016).** Experimental Investigation on the Effect of Ultrasonication on Dispersion and Mechanical Performance of Multi-Wall Carbon Nanotube-Cement Mortar Composites. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 10(3), 11.
- Assi, L., Alsalman, A., Bianco, D., Ziehl, P., El-Khatib, J., Bayat, M., & Hussein, F. H. (2021).** Multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) dispersion & mechanical effects in OPC mortar & paste: A review. *Journal of Building Engineering*, 43(January), 102512.
- ASTM C1581M-18. (2018).** Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress, 1–7.
- Banthia, N., & Soleimani, S. M. (2005).** Flexural response of hybrid fiber-reinforced cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 102(6), 382–389.
- Bertelsen, I. M. G., Ottosen, L. M., Fischer, G., (2020).** Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials*, 230, 116769.
- BS 12504-4:2021. (2019).** Testing concrete in structures Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. *British Standard*, (July), 1–18.
- BS EN 12390-13:2021. (2021).** Testing hardened concrete Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression. *British Standard*, (July), 1–16.
- BS EN 12390-3:2019. (2019).** Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens. *British Standard*, (April), 1–18.
- Cao, M., Xie, C., & Guan, J. (2019).** Fracture behavior of cement mortar reinforced by hybrid composite fiber consisting of CaCO₃ whiskers and PVA-steel hybrid fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 120(February), 172–187.

- Cerro-Prada, E., Pacheco-Torres, R., & Varela, F. (2021).** Effect of multi-walled carbon nanotubes on strength and electrical properties of cement mortar. *Materials*, 14(1), 1–13.
- Deb, S., Mitra, N., Majumder, S. B., & Maitra, S. (2018).** Improvement in tensile and flexural ductility with the addition of different types of polypropylene fibers in cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 180, 405–411.
- Dinesh, A., Parthiban, V., Sakthi Parvathi, N., & Sowndarya, S. (2023).** Crack-bridging and strengthening prospects of nanofibers in the cement composite – A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Dong, Wei, Zhou, X., Wu, Z., & Kastiukas, G. (2016).** Effects of specimen size on assessment of shrinkage cracking of concrete via elliptical rings: Thin vs. thick. *Computers and Structures*, 174, 66–78.
- Dong, Wenkui, Li, W., Wang, K., & Shah, S. P. (2021).** Physicochemical and Piezoresistive properties of smart cementitious composites with graphene nanoplates and graphite plates. *Construction and Building Materials*, 286, 122943.
- Grzybowski, M., Shah, S. P., Karagüler, M. E. (1989).** A Model To Predict Restrained Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete *Fibre Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments*, pp. 334–345.
- Grzybowski, M. (1989).** Determination of Cracking Arresting Properties of Fibre Reinforced Cementitious Composites. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology.
- Grzybowski, M., & Shah, S. P. (1990).** Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 87(2), 138–148.
- Hawreen, A., & Bogas, J. A. (2019).** Creep, shrinkage and mechanical properties of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*, 198, 70–81.
- Hawreen, A., Bogas, J. A., & Kurda, R. (2019).** Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Different Types of Carbon Nanotubes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(10), 8361–8376.
- He, P., Gao, Y., Lian, J., Wang, L., Qian, D., Zhao, J., ... Shi, D. (2006).** Surface modification and ultrasonication effect on the mechanical properties of carbon nanofiber/polycarbonate composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9), 1270–1275.
- Hogancamp, J., & Grasley, Z. (2017).** The use of microfine cement to enhance the efficacy of carbon nanofibers with respect to drying shrinkage crack resistance of portland cement mortars. *Cement and Concrete Composites*, 83, 405–414.
- Hossain, A. B., & Weiss, J. (2004).** Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 531–540.

- Hsie, M., Tu, C., & Song, P. S. (2008).** Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 494(1–2), 153–157.
- Karagüler, M. E., & Shah S.P., (1990).** Shrinkage Cracking of Concrete. *Construction Materials Serviceability / Durability*, vol. 2, pp. 626–639.
- Kawashima, S., & Shah, S. P. (2011).** Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 201–208.
- Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Shah, S. P. (2010).** Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 110–115.
- López-Buendía, A. M., Romero-Sánchez, M. D., Climent, V., & Guillem, C. (2013).** Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 54, 29–35.
- Mao, J., Liang, N., Liu, X., Zhong, Z., & Zhou, C. (2023).** Investigation on early-age cracking resistance of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete in restrained ring tests. *Journal of Building Engineering*, 70(February), 106155.
- Metaxa, Z. S., Boutsoukou, S., Amenta, M., Favvas, E. P., Kourkoulis, S. K., & Alexopoulos, N. D. (2022).** Dispersion of Multi-Walled Carbon Nanotubes into White Cement Mortars: The Effect of Concentration and Surfactants. *Nanomaterials*, 12(6).
- Metaxa, Z. S., Konsta-Gdoutos, M. S., & Shah, S. P. (2013).** Carbon nanofiber cementitious composites: Effect of debulking procedure on dispersion and reinforcing efficiency. *Cement and Concrete Composites*, 36(1), 25–32.
- Nuaklong, P., Boonchoo, N., Jongvivatsakul, P., Charinpanitkul, T., & Sukontasukkul, P. (2021).** Hybrid effect of carbon nanotubes and polypropylene fibers on mechanical properties and fire resistance of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 275, 122189.
- Passuello, A., Moriconi, G., & Shah, S. P. (2009).** Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 699–704.
- RILEM TCS. (1985).** Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, 18(106), 285–290.
- Saje, D., Bandelj, B., Šušteršič, J., Lopatič, J., & Saje, F. (2011).** Shrinkage of Polypropylene Fiber-Reinforced High-Performance Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 941–952.
- Sedaghatdoost, A., & Behfarnia, K. (2018).** Mechanical properties of Portland cement mortar containing multi-walled carbon nanotubes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 176, 482–489.

- Şengül, O. (2016).** Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires. *Construction and Building Materials*, 122, 649–658.
- Şengül, O. (2018).** Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers. *Construction and Building Materials*, 186, 1082–1091.
- Shah, S. P., Karagüler, M. E., Sarigaphuti, M. (1992).** Effects of Shrinkage-Reducing Admixtures on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete.pdf, 289–295.
- Shah, S.P., Sarigaphuti, M., Karagüler, M. E. (1994).** Comparison of Shrinkage Cracking Performance of Different Types of Fibers and Wiremesh. *ACI Materials Journal*, SP-142.
- Shao, J., Zhu, H., Xue, G., Yu, Y., Mirgan Borito, S., & Jiang, W. (2021).** Mechanical and restrained shrinkage behaviors of cement mortar incorporating waste tire rubber particles and expansive agent. *Construction and Building Materials*, 296, 123742.
- Shi, T., Li, Z., Guo, J., Gong, H., & Gu, C. (2019).** Research progress on CNTs/CNFs-modified cement-based composites – A review. *Construction and Building Materials*, 202, 290–307.
- Smarzewski, P. (2020).** Comparative fracture properties of four fibre reinforced high performance cementitious composites. *Materials*, 13(11).
- Sun, Z., & Xu, Q. (2009).** Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 527(1–2), 198–204.
- Uyan, M., Karagüler M., (1995).** Effects of Superplasticizing Admixtures on Dryingkage of Portland Cement Mortars. *XI. Ermco'95 Kongresi, Turkey*.
- Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H., (2019).** Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape. *Composites Part B: Engineering*, 174, 107021.
- Xie, C., Cao, M., Guan, J., Liu, Z., & Khan, M. (2021).** Improvement of boundary effect model in multi-scale hybrid fibers reinforced cementitious composite and prediction of its structural failure behavior. *Composites Part B: Engineering*, 224(August), 109219.
- Xie, C., Cao, M., Khan, M., Yin, H., & Guan, J. (2021).** Review on different testing methods and factors affecting fracture properties of fiber reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 273.
- Xu, S., Liu, J., & Li, Q. (2015).** Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste. *Construction and Building Materials*, 76, 16–23.
- Yang, Y., Zhou, Q., Deng, Y., & Lin, J. (2020).** Reinforcement effects of multi-scale hybrid fiber on flexural and fracture behaviors of ultra-low-weight foamed cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 108(December 2019), 103509.

- Yao, X., Lu, M., Guan, J., Han, A., Wang, H., Li, L., ... He, S. (2022).** Development of a design method for the fracture performance of steel fiber-reinforced concrete by considering steel fiber characteristics and aggregate gradation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 121(July), 103486.
- Yousefieh, N., Joshaghani, A., Hajibandeh, E., & Shekarchi, M. (2017).** Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete. *Construction and Building Materials*, 148, 833–845.
- Yuan Gao. (2018).** *Characterization of Carbon Nanotube Reinforced Cementitious Materials* (Doktora Tezi). Northwestern University, Illinois.
- Zhang, D., Yu, J., Wu, H., Jaworska, B., Ellis, B. R., Li, V. C., (2020).** Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC). *Composites Part B: Engineering*, 184, 107741.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Koray Mehmet ARSLAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2009-2009, İnşaat Mühendisi, Türk Telekom A.Ş.
- 2009-Halen, İnşaat Mühendisi, İstanbul Teknik Üniversitesi

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Arslan K.M.**, Karagüler M.E. 2021. Effect of Micro PP Fibers on the Restrained Shrinkage of Concrete Mixture. *14th International Congress On Advances In Civil Engineering*, September 6-8, 2021 Istanbul, Turkey.
- **Arslan K.M.**, Karagüler M.E. 2024. Shrinkage Cracking and Mechanical Properties of Cementitious Composites Produced with Multiwall Carbon Nano Tubes and Different Types of Polypropylene Fibres. *Construction and Building Materials*, 420, 135599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135599>.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Arslan K.M.**, Atahan H.N. 2014. Enhanced Durability against External Sulfate Attack: Effect of Nano and Micro Cementitious Mineral Admixtures. *11th International Congress On Advances In Civil Engineering*, October 21-25, 2014 Istanbul, Turkey.
- Atahan H.N., **Arslan K.M.** 2016. Improved durability of cement mortars exposed to external sulfate attack: The role of nano & micro additives. *Sustainable Cities and Society*, 22 (40-48), <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.01.008>.