

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SENTETİK FİBER DONATILI PÜSKÜRTME BETON UYGULAMASINDA
FİBER DONATI NARİNLİK ORANININ BETONUN TOKLUK İNDEKSİNE
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Lühan Arda BAYRAKTAROĞLU

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SENTETİK FİBER DONATILI PÜSKÜRTME BETON UYGULAMASINDA
FİBER DONATI NARİNLİK ORANININ BETONUN TOKLUK SINIFINA
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Lühan Arda BAYRAKTAROĞLU
505181011**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Cüneyt Atilla ÖZTÜRK

HAZİRAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505181011 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Lühan Arda BAYRAKTAROĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı SENTETİK FİBER DONATILI PÜSKÜRTME BETONDA FİBER DONATI NARİNLİK ORANININ BETONUN TOKLUK SINIFINA ETKİSİ başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Cüneyt Atilla ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kemal BARIŞ**
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Mayıs 2022

Savunma Tarihi : 13 Haziran 2022





Her Zaman Yanımda Olan Eşime ve Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek Lisans öğrenimim sırasında göstermiş olduğu destek ve alakadan dolayı danışmanım, çok değerli yol göstericim, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi öğretim üyelerinden Doç. Dr. Cüneyt Atilla ÖZTÜRK'e, üzerimdeki emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tezime konu olan fiber donatılarla alakalı bilgi paylaşımı, desteği ve alakasından ötürü arkadaşım Uğur ALPARSLAN'a ve ailesine teşekkür ederim.

Hayatımda her koşulda yanımda olan annem Sevgi BAYRAKTAROĞLU'na, babam Ali BAYRAKTAROĞLU'na, ablam Saide Olga BAYRAKTAROĞLU ÇALIŞ'a, eşim Zehra BAYRAKTAROĞLU'na ve oğlum Altay BAYRAKTAROĞLU'na her türlü desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Haziran 2022

Lühan Arda BAYRAKTAROĞLU
(Maden Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Tez Çalışmasında İzlenen Yöntem	3
2. FİBER DONATILI PÜSKÜRTME BETON	5
2.1 Püskürtme Beton.....	5
2.1.1 Kuru karışım püskürtme beton	6
2.1.2 Yaş karışım püskürtme beton	7
2.2 Fiber Donatı Hammaddeleri	7
2.3 Sentetik Fiber Donatılar ve Betona Etkileri	10
2.3.1 Çekme dayanımı	17
2.3.2 Elastisite modülü	17
2.3.3 Narinlik.....	17
2.3.4 Tokluk.....	19
2.4 Sentetik Fiber Donatılı Püskürtme Betonun Tokluk Sınıfının Belirlenmesi ile Alakalı Standartlar	22
2.4.1 EN 14889-2 polimer lifler – tarifler, özellikler ve uygunluk	22
2.4.2 EN 14488-1 taze ve sertleşmiş betondan numune alma	23
2.4.3 EN 14488-5 lif takviyeli plaka numunelerde enerji yutma kapasitesinin tayini.....	23
2.4.4 EN 14488-7 lifle güçlendirilmiş betonun lif içeriği	25
2.4.5 EN 14651 metal lifli beton eğilmede çekme dayanımının tayini	26
2.4.6 ASTM C1550 fiber takviyeli betonun eğilme tokluğu	29
2.4.7 ASTM C1609 fiber takviyeli betonun eğilme performansı.....	31
2.5 Değerlendirme	33
3. YER ALTI MADENCİLİĞİNDE FİBER DONATI KULLANIMI	37
3.1 Giriş	37
3.2 Kaya Kütlesi Sınıflandırma Sistemleri	37
3.3 Q Kaya Sınıflaması.....	38
3.4 Değerlendirme	46
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	49
4.1 Deneysel Çalışmanın Kapsamı	49
4.2 Deneysel Çalışmanın Programı	49
4.3 Kullanılan Malzemeler	51

4.3.1 Çimento.....	51
4.3.2 Agrega.....	52
4.3.3 Kullanılan fiber donatılar.....	53
4.3.4 Kullanılan beton katkıları	54
4.3.4.1 Akışkanlaştırıcı katkı.....	54
4.3.4.2 Priz hızlandırıcı katkı.....	55
4.3.5 Su	56
4.4 Numunelerin Üretimi	56
4.5 Numunelerin Hazırlığı	59
4.6 Yapılan Beton Deneyleri	60
4.6.1 Taze beton deneyleri.....	60
4.6.1.1 Birim ağırlık deneyi.....	60
4.6.1.2 Çökme deneyi	61
4.6.1.3 Fiber içeriği tayini	61
4.6.2 Sertleşmiş beton deneyleri.....	62
4.6.2.1 Basınç dayanımı tayini	62
4.6.2.2 Enerji tokluk seviyesi tayini	63
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	65
5.1 Taze Beton Deneyleri	65
5.1.1 Birim ağırlık deneyi.....	65
5.1.2 Çökme deneyi	66
5.1.3 Fiber içeriği tayini.....	66
5.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri	68
5.2.1 Basınç dayanımı tayini	68
5.2.2 Enerji tokluk seviyesi tayini	69
5.2.2.1 MF54+ plak numuneleri enerji tokluk seviyesi.....	69
5.2.2.2 MF54 plak numuneleri enerji tokluk seviyesi	73
5.2.2.3 MF60+ plak numuneleri enerji tokluk seviyesi.....	77
5.2.2.4 MF60 plak numuneleri enerji tokluk seviyesi	82
6. SONUÇLAR.....	87
KAYNAKLAR.....	93
EKLER.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	99

KISALTMALAR

ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
BTS	: İngiliz Tünelcilik Derneği
CMOD	: Çatlak ağzı açılma deplasmanı
DM	: Desimetre
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
EN	: Avrupa Normu
ESR	: Kazı destek oranı
GPa	: Gigapaskal
KG	: Kilogram
kN	: Plak numunelerin eğilme testi altında direnç gösterdiği kuvvet, (kilo Newton)
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LVDT	: Lineer değişken diferansiyel transformatörler
MF	: Makro fiber sentetik lif
NATM	: Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi
NGI	: Norveç Geoteknik Enstitüsü
MPa	: Megapaskal (N/mm ²)
PVA	: Polivinil alkol
Sfr	: Fiberli püskürtme beton
SRF	: Gerilme indirgeme faktörüdür
TS	: Türk Standardı



SEMBOLLER

E	: Elastisite modülü
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımı, (MPa)
h	: Kesit yüksekliği, (mm)
J	: Plak numunelerin eğilme testi altında sönümlendiği enerji miktarı, (joule=N.m)
J_n	: Eklem takım sayısı
J_r	: Eklem pürüzlülük sayısı
J_a	: Eklem alterasyon sayısı
J_w	: Eklem suyu indirgeme sayısı
kg/m³	: 1 m ³ betonda kullanılan malzeme miktarı
°C	: Sıcaklık birimi – santigrat derece
σ_c	: Basınç dayanımı



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Fiberlerin tipik özellikleri.....	7
Çizelge 2.2 : Polimer lif sınıflandırması.....	22
Çizelge 3.1 : Başlıca sınıflandırma sistemleri.	37
Çizelge 3.2 : Eklem takım sayısı (J_n) (Kaya, 2002).....	39
Çizelge 3.3 : Eklem pürüzlülük sayısı (J_r) (NGI, 2015).....	40
Çizelge 3.4 : Eklem alterasyon sayısı (J_a) (NGI, 2015).....	41
Çizelge 3.5 : Eklem suyu indirgeme faktörü (J_w) (NGI, 2015).	42
Çizelge 3.6 : Gerilme azaltma faktörü (SRF) (NGI, 2015).	43
Çizelge 3.7 : ESR değerleri (NGI, 2015).....	44
Çizelge 3.8 : Barton çizelgesinin yorumlanması.	45
Çizelge 3.9 : Yer altı madenciliği için modifiye edilmiş esr değerleri (Öztürk ve diğ, 2021).	46
Çizelge 3.10 : Destek elemanlarının özellikleri ve mühendislik özellikleri (Öztürk ve diğ, 2021).	47
Çizelge 4.1 : Alınan numunelere ait miktarlar.....	50
Çizelge 4.2 : Deneysel çalışmada kullanılan beton reçetesi.	51
Çizelge 4.3 : Çimentoya ait içerik ve yüzde oranlar.....	52
Çizelge 4.4 : Kullanılan agregaların elek analizi.....	52
Çizelge 4.5 : Deneyde kullanılan fiberlere ait teknik veriler.....	53
Çizelge 4.6 : Akışkanlaştırıcı katkıya ait kimyasal analiz sonuçları.	55
Çizelge 4.7 : Priz hızlandırıcı katkıya ait kimyasal analiz sonuçları.	55
Çizelge 5.1 : Birim ağırlık deney sonuçları.	65
Çizelge 5.2 : Çökme deneyi sonuçları.	66
Çizelge 5.3 : MF54+ fiber içeriği tayini.	67
Çizelge 5.4 : MF54 fiber içeriği tayini.	67
Çizelge 5.5 : MF60+ fiber içeriği tayini.	68
Çizelge 5.6 : MF60 fiber içeriği tayini.	68
Çizelge 5.7 : Beton basınç sonuçları.....	68
Çizelge 5.8 : MF54+ enerji tokluk testi sonucu.....	69

Çizelge 5.9 : MF54 enerji tokluk testi sonucu.....	73
Çizelge 5.10 : MF60+ enerji tokluk testi sonucu.....	78
Çizelge 5.11 : MF60 enerji tokluk testi sonucu.....	82



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Tez akım şeması.	3
Şekil 2.1 : İlk püskürtme beton makinesi.	5
Şekil 2.2 : Polipropilenin kimyasal yapısı (Moghimi, 2014).	8
Şekil 2.3 : Polipropilene ait diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) davranışı.	9
Şekil 2.4 : Fiber donatı çatlak köprülemesi (Anderson, 1991).	11
Şekil 2.5 : Bazı kısa kesilmiş fiber örnekleri a) Yüzey şekli b) En kesit (Bentur, 2007).	14
Şekil 2.6 : Fibrilize polipropilen fiber miktarının ve uzunluğunun betonun işlenebilirliğine etkisi (a) Çökme (b) Vebe testleri (Spadea ve Frigione, 1987).	15
Şekil 2.7 : Dikdörtgen kesitli fiberlerin lif içeriği ve uzunluğunun çökme üzerindeki etkisi (Hasaba ve diğ, 1984).	16
Şekil 2.8 : Çalışmada kullanılan sentetik fiber.	17
Şekil 2.9 : Yük sehim eğrilerinin karşılaştırılması (Hameed ve diğ, 2009).	19
Şekil 2.10 : Kare panellerin yük – deplasman eğrisi.	21
Şekil 2.11 : KTŞ yük deformasyon – enerji deformasyon eğrileri.	22
Şekil 2.12 : EN 14488-5 test düzeneği.	24
Şekil 2.13 : Yük sehim – enerji sehim eğrileri.	25
Şekil 2.14 : Lifle güçlendirilmiş beton gerilme blokları.	27
Şekil 2.15 : Fiberli betonların numune kalıplarına alınması.	29
Şekil 2.16 : EN 14651 eğilme testi, numune boyutları, yükleme ve mesnet koşulları.	29
Şekil 2.17 : ASTM C1550 yuvarlak panel eğilme testi, yükleme ve mesnet koşulları.	30
Şekil 2.18 : Fiberli beton numunesi ve test düzeneği plan görüntüsü.	30
Şekil 2.19 : Püskürtme uygulaması sonrası numunelerin taşınması.	31
Şekil 2.20 : ASTM C1609 eğilme testi, numune boyutları, yükleme ve mesnet koşulları.	32
Şekil 2.21 : Örnek bir fiber takviyeli beton eğilme testi davranışı ve mühendislik parametreleri.	32
Şekil 2.22 : Farklı narinlik oranlarına sahip fiberlerin çökme değerleri.	33

Şekil 2.23 : Farklı narinlik oranlarına sahip fiberlerin basınç dayanım değerleri.	34
Şekil 2.24 : Eğilme tokluğu – narinlik – yükleme hızı.	34
Şekil 2.25 : Fiber uzunluğunun beton üzerindeki etkisi.	35
Şekil 3.1 : Eklem desenleri.	39
Şekil 3.2 : Farklı j_r değerlerine sahip eklem-duvar yüzeyleri örnekleri (NGI, 2015).	40
Şekil 3.3 : Eş boyut ve Q değerlerine bağlı destek kategorileri (NGI, 2015).	45
Şekil 4.1 : Deney ziyareti.	49
Şekil 4.2 : Taze haldeki sentetik lif takviyeli betonun yaş haldeki görüntüsü.	51
Şekil 4.3 : Granülometri eğrisi.	53
Şekil 4.4 : Deneysel çalışmada kullanılan fiberler.	54
Şekil 4.5 : Deneysel çalışmada kullanılan fiberlerin öbek halinde duruşu.	54
Şekil 4.6 : Fiber dozajlama makinesi.	56
Şekil 4.7 : Silindir numune alımı ve çökme testi.	57
Şekil 4.8 : Püskürtme beton makinesi mazgal yapısı.	57
Şekil 4.9 : Panel numunesi alımı.	58
Şekil 4.10 : Kalıptan çıkartılan plak numuneler.	58
Şekil 4.11 : Başlık yapılmış silindir numunesi.	59
Şekil 4.12 : Başlık yapılmış panel numunesi.	60
Şekil 4.13 : Çökme deneyi.	61
Şekil 4.14 : Fiber içeriği tayini.	62
Şekil 4.15 : Basınç deneyine tabi tutulan numune.	63
Şekil 4.16 : Enerji tokluk deneyi test cihazı.	63
Şekil 4.17 : Enerji tokluk seviyesi testine tabi tutulan numune.	64
Şekil 5.1 : Silindir numunenin birim ağırlık deneyine tabi tutulması.	66
Şekil 5.2 : Fiber içeriği tayini – kurutma ve tartma.	67
Şekil 5.3 : MF54+ 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	69
Şekil 5.4 : MF54+ 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	70
Şekil 5.5 : MF54+ 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	70
Şekil 5.6 : MF54+ 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	71
Şekil 5.7 : MF54+ 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	71
Şekil 5.8 : MF54+ 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	72
Şekil 5.9 : MF54+ 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	72
Şekil 5.10 : MF54+ 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	73
Şekil 5.11 : MF54 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	74

Şekil 5.12 : MF54 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	74
Şekil 5.13 : MF54 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	75
Şekil 5.14 : MF54 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	75
Şekil 5.15 : MF54 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	76
Şekil 5.16 : MF54 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	76
Şekil 5.17 : MF54 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	77
Şekil 5.18 : MF54 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	77
Şekil 5.19 : MF60+ 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	78
Şekil 5.20 : MF60+ 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	79
Şekil 5.21 : MF60+ 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	79
Şekil 5.22 : MF60+ 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	80
Şekil 5.23 : MF60+ 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	80
Şekil 5.24 : MF60+ 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	81
Şekil 5.25 : MF60+ 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	81
Şekil 5.26 : MF60+ 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	82
Şekil 5.27 : MF60 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	83
Şekil 5.28 : MF60 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	83
Şekil 5.29 : MF60 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	84
Şekil 5.30 : MF60 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	84
Şekil 5.31 : MF60 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	85
Şekil 5.32 : MF60 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	85
Şekil 5.33 : MF60 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.	86
Şekil 5.34 : MF60 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.	86
Şekil 6.1 : Narinlik oranı - tokluk değeri korelasyonu.	88
Şekil 6.2 : Maksimum tepe yük - tokluk değeri korelasyonu.	89
Şekil 6.3 : Basınç dayanımı – tokluk değeri korelasyonu.	89
Şekil 6.4 : Fiber adedi – tokluk değeri korelasyonu.	91



SENTETİK FİBER DONATILI PÜSKÜRTME BETON UYGULAMASINDA FİBER DONATI NARİNLİK ORANININ BETONUN TOKLUK SINIFINA ETKİSİ

ÖZET

Piramitlerin yapıldığı milattan önce 2500'li yıllarda, gevrek yapı malzemelerinin süneklik kazanabilmesi için kerpiç yapılarda saman parçaları gibi doğal takviye kaynakları kullanılmıştır. Günümüzde ise kerpiç yapısı betona, içerisinde yer alan donatı vazifesini üstlenen saman ise fibere evrilmiştir.

Tünel uygulamalarında kullanılan tahkimat sistemi geçmişten bugüne gelişmekte olan teknolojiye paralel olarak yenilenmektedir. Ağaç kütükleri ile başlayan donatılandırma serüveni, çelik tahkimat sistemleri ile pekişmiş olup, bugünlerde ise tünel yapıları hem pratik hem de dayanıklı olan fiber donatılı beton ile güçlendirilmektedir. Sürekli üretim anlayışı, verimliliği yüksek planlamanın ön planda olması, tahkimat sisteminin uygulanmasında zaman muhakemesinin iyi yapılmasını oldukça kritik bir noktaya taşımaktadır.

Günümüz uygulamalarında beton karışımına eklenen fiber donatının miktarı, geometrisi, narinliği ve uzunluğu, betonun mekanik davranışını etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Dolayısıyla fiber donatı narinlik durumu ve tokluk sınıflaması arasındaki ilişki gözetilirken fiber donatının başta uzunluk olmak üzere mekanik davranışa etki edebilecek tüm faktörleri takip edilmelidir. Geçmiş çalışmalarda prizma beton numuneleri üzerine yapılan araştırmalar, fiber donatı narinlik oranının betonun çökme, işlenebilme, çatlak ağzı açılma deplasmanı gibi değerlerinde kayda değer değişikliklere sebebiyet verebildiğini ortaya çıkartmıştır. Bir diğer yaklaşım olarak fiber donatı miktarının beton matrisine etkisi yine söz konusu çalışmalar kapsamında değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular üzerinden fiber donatıların betona çekme mukavemeti kazandırdığı yorumu yapılabilir. Özellikle beton yol, endüstriyel zemin ve yol bariyerleri gibi dökme beton uygulamalarında, bir diğer ifadeyle noktasal ve yayılı yük altında çalışacak zemin yapılarında, fiber donatılı betona ait çatlak ağzı açılma deplasman değerleri statik rapor hazırlanması esnasında kullanılmaktadır.

Her ne kadar dökme beton uygulamalarından elde edilen verilerde fiber donatıların, beton performansına olumlu etkileri takip edilebiliyor olsa da püskürtme beton uygulamasının, doğası gereği içerisinde barındırdığı hava ve kimyasal katkı olan priz hızlandırıcı faktörlerinin göz ardı edilmemesi gereklidir. Aynı zamanda tez kapsamında enerji tokluk seviyesinin belirlenmesi için EN 14488-5 standardına göre alınan beton numunelerinin boyutları ve test sırasındaki çatlak deplasman genişlikleri, statik rapor için ihtiyaç duyulan EN 14651 standardından oldukça farklıdır. Sonuç olarak püskürtme beton uygulamaları için ayrıca fiber narinlik oranına göre deneyler yapılması ihtiyacını gün yüzüne çıkartmıştır.

Şev ve tünel yapılarında, oluşan deformasyonların hızlıca karşılanabilmesi noktasında püskürtme beton uygulamaları kritik öneme sahiptir. Bununla beraber yer altı madenciliğinde fiber donatı kullanımının değerlendirilmesi öncesinde kaya kütlesi

kavramının bir bütün olarak incelenmesi, kayaç, sağlam kaya ve süreksizliklerin tespiti elzemdir. Kaya kütlelerinin genel davranışı incelenirken kayacın Q çizelgesine göre araştırması yapılmalıdır. 1970 yılında geliştirilen Q sistemi, kayanın birbirinden farklı altı parametresi aracılığı ile hesaplanmakta ve tünel yapısını istisnai iyi ile istisnai kötü arasında dokuz farklı bölüme ayırmaktadır. Sistem, aynı zamanda her bir bölüm için kazı destek önerisinde bulunmaktadır. Burada fiber donatılarla alakalı durum incelendiğinde özellikle iyi, orta, zayıf, çok zayıf yapı sınıflamasında 500 ila 1000 Joule arasında değişen enerji absorbe etme kapasitesi sistem içerisinde aranmaktadır. Aynı zamanda Q sistemi incelenirken sentetik fiber donatıların paslanmaz yapıda olması, süneklik ve esneklik kabiliyeti, aşındırıcı ortamlardaki direnci gibi avantajları ön plana çıkmıştır.

Q sisteminde önerilen fiber donatılı betonunda sentetik fiberin fiziksel özellikleri bu tez kapsamında incelenmiştir. Araştırmanın altında yatan ana unsurlar ilk etapta narinlik oranının etkilediği fiber adedi, dolayısıyla çatlak köprüleme yeteneği, nihayetinde elde edilen çatlak kontrolü ile enerji tokluk indeksiindeki değişimler ön plana çıkmıştır.

Balıkesir İli, Balya İlçesi sınırları içerisinde özel bir madencilik firmasında Kasım 2021 tarihinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda aynı beton reçetesi içerisine farklı narinlik oranlarındaki fiber donatılar test edilmiştir. Tek bir üretici tarafından aynı desen yapısında tedarik edilen fiber donatıların betonun mekanik özelliklerine etkisi bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Sentetik lifli betonun tokluk, eğilme sünekliği, enerji yutma ve yük taşıma kapasiteleri gibi performanslarının belirlenmesi amacıyla her bir fiber tipi için en az dört adet olmak üzere toplam 16 adet TS EN 14488-5 standartlarına uygun 60 cm * 60 cm * 10 cm ölçülerinde plak numunesi ve fiber içeriği tayini, birim ağırlık ve basınç dayanımı testleri için, 32 adet 10 cm * 20 cm ölçülerinde silindir numunesi hazırlanmıştır. Taze beton deneylerinin tamamı özel maden işletmesinde gerçekleştirilirken, sertleşmiş beton deneyleri sentetik fiber donatı üretici firmanın beton laboratuvarında tamamlanmıştır.

Deneysel çalışma süresince tek bir beton reçetesi takip edilmiş olup, çalışma başlamadan, ilgili reçetenin sahada uygulanabilirliği test edilmiştir. Fiber donatılar maden işletmesi beton santralinde yer alan fiber dozajlama makinesi yardımıyla karışıma eklenmiş olup, karışım beton mikserine aktarılmadan önce santral bunkerinde yaklaşık 60 saniye boyunca iyice harmanlanmıştır. Buradaki amaç fiber donatının beton içerisinde homojen olarak dağılımının korunması olarak açıklanabilir. Santralde tamamlanan karışım sekiz metre küp beton taşıma kapasitesine sahip miksera aktarılmıştır. Akabinde sırasıyla çökme, birim ağırlık deneyleri tamamlanmış ve 28 gün kürde tutulmak üzere basınç dayanım testine tabi tutulacak silindir numuneleri alınmıştır. Yaş beton numune alım işlemini takiben beton mikseri yaklaşık 25 dakika mesafe kat ederek uygulama noktasına ulaşmıştır. Püskürtme beton uygulamasını yapacak olan makinenin beton beslemesi yapıldığı bölgesinde yer alan ızgara yapısı, fiber donatılı beton akışına uygun hale getirilmiştir. Bu sayede fiberlerin herhangi bir tıkanıklığa ya da topaklanmaya maruz kalmadan akışı mümkün kılınmıştır. Püskürtme beton uygulamasından alınan panel numunelerinin üzeri püskürtme işlemi tamamlanır tamamlanmaz TS EN 14488-5 standardında bahsedildiği gibi kalınlığı 10 cm olacak şekilde düzeltilmiştir ve 24 saat boyunca yerinden hareket ettirilmeden sabit halde bırakılmıştır. Numuneler ertesi gün kürlenme işlemine tabi tutulacakları alana nakledilmiş ve hem silindir numuneleri hem de panel numuneleri 28. günde sentetik fiber donatı üretici firmanın beton laboratuvarında kırma tabi tutulmuştur.

Sentetik fiber donatıların tahkimat elemanı olarak sağladığı faydalar, betonarme yapısına kazandırdığı eğilme performansı, çatlakların köprülenmesi, enerji tokluk

değerlerinin artırılması, ani kırılma ve göçmelerin önlenmesi, geri sekme miktarının azaltılması, demir işçiliğine dayalı imalat, montaj hatalarının elimine edilmesi, maliyetlerin düşürülmesi ve daha güvenli bir çalışma ortamı yaratılması şeklinde sıralanabilir. Nitekim tez çalışması kapsamında söz konusu sentetik fiber donatıların farklı narinlik oranlarında betonarme yapısına kazandırdığı enerji tokluk değerleri yani bir diğer ifade ile beton yapısının parçalanana dek absorbe ettiği toplam enerji seviyeleri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar altı başlık halinde yorumlanmıştır.

Dört farklı narinlik oranının değerlendirildiği deneysel çalışma süresince narinlik oranı ve tokluk indeksi arasında lineer bir ilişki kurulabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Öte yandan çalışmalarda kullanılan hem + serisinde sabit çap altında hem de normal seride sabit çap altında fiber boyunun artması enerji absorpsiyon seviyesinin yükselmesi şeklinde sonuçlanmıştır. Bunlara ek olarak narinlik oranı ile enerji tokluk indeksindeki maksimum tepe yük arasındaki ilişki araştırılmış ancak sonuçların neredeyse fiberli ve fibersiz tüm numunelerde benzer netice verdiği görülmüştür. Bu durum maksimum tepe yük değerinin beton matrisi ile; tokluk değerinin ise fiberli beton kompozit yapısının bir sonucu olması şeklinde yorumlanmıştır. Silindir numuneler üzerinden elde edilen basınç dayanım değerleri ve narinlik oranı arasındaki ilişki değerlendirilirken fiber donatıların basınç dayanımı üzerinde olumlu yahut olumsuz herhangi bir etki oluşturmadiğı görülmüştür.

Narinlik oranı ile doğrusal ilişkiye sahip birim hacimdeki fiber sayısı, kırımı tamamlanan plakların arka yüzeyinde gözle görülür şekilde ortaya çıkmıştır. Bu durum aynı zamanda çökme testinde de gözlenmiştir. Sabit uzunluk ve azalan çap etkisi incelendiğinde, artan fiber adedinin enerji tokluk indeksine pozitif yönde etki ettiği görülmüştür. Diğer bir deyişle çatlağın genişlemesini önlemek için ortamda daha fazla fiber donatı yer almış, bu sayede daha geniş bir yüzey alanı elde edilmiş ve neticesinde artan aderans ile beton daha uzun süre yük taşıyabilir hale gelmiştir. Bu netice betonun enerji yutma kapasitesinde artış olarak takip edilmiştir. Beton yoğunlukları üzerinden bir değerlendirme yapıldığında, taze betondan alınan numune ağırlığının hacme bölünmesiyle elde edilen yoğunluk değerlerinde rasyonel bir bağlantı kurulamamıştır. Yani fiber donatının beton birim ağırlığına etki etmediği sonucuna ulaşılmıştır.

Enerji tokluk değerleri incelendiğinde tüm sonuçların 700 ila 1000 J arasında yani beş ve altı destek kategorisinde konumlandığı görülmüştür. Bu durum artan narinlik oranında daha düşük dozaj artışlarıyla bir üst destek kategorisi olan 1000 J değerinin arandığı 7'ye geçilebileceği şeklinde yorumlanabilir. Benzer şekilde elde edilen sonuç, narinlik oranının, beton optimizasyonu, maliyeti ve işlenilebilirliği hususlarında, önemli bir mühendislik parametresi olarak değerlendirilebileceği şeklinde değerlendirilebilir.



EFFECT OF FIBER ASPECT RATIO ON TOUGHNESS CLASS IN SYNTHETIC FIBER REINFORCED SHOTCRETE APPLICATION

SUMMARY

In the 2500 BC, when the pyramids were built, natural reinforcement resources such as straw pieces in mudbrick structures were used in order to increase the ductility of brittle building materials. Today, the mudbrick structure has evolved into concrete, and the straw, which takes on the role of reinforcement, has evolved into fiber reinforcement.

The reinforcement system used in tunnel applications has been renewed in parallel with the developing technology from past to present. The adventure of reinforcing, which started with wood blocks, has been changed with steel fortification systems, and nowadays tunnel structures are reinforced with fiber-reinforced concrete, which is both practical and durable. The understanding of continuous production with high-efficiency planning fact is at the forefront, brings good time judgment in the implementation of the fortification system to a very critical point.

In today's applications, the amount, geometry, aspect ratio and length of the fiber reinforcement added to the concrete mix are among the factors affecting the mechanical behavior of the concrete. Therefore, while considering the relationship between fiber reinforcement aspect ratio and toughness classification, all factors that may affect the mechanical behavior of the fiber reinforcement, especially the length, should be followed. Researches on prism concrete samples in previous studies revealed that fiber reinforcement aspect ratio can cause significant changes in values such as slump, workability, crack opening displacement of concrete. As another approach, the effect of the amount of fiber reinforcement on the concrete matrix has been evaluated within the scope of these studies. Based on the findings, it can be interpreted that fiber reinforcements increase the tensile strength to concrete. Especially in cast concrete applications such as concrete roads, industrial floors and road barriers, in other words, in ground structures that will operate under point and distributed loads, crack opening displacement values of fiber-reinforced concrete are used during the preparation of static reports.

Although the positive effects of fiber reinforcements on concrete performance can be followed in the data obtained from cast concrete applications, the air and set accelerating admixtures factors that the shotcrete application contains by its nature should not be ignored. At the same time, the dimensions of the concrete samples taken according to the EN 14488-5 standard to determine the energy toughness level within the scope of the thesis and the crack displacement widths during the test are quite different from the EN 14651 standard required for the static report. As a result, for shotcrete applications, the need to conduct tests according to fiber aspect ratio has come to light.

In slope and tunnel structures, shotcrete applications have critical importance at the point of reinforcing the deformations that occur quickly. However, before evaluating the use of fiber reinforcement in underground mining, it is essential to examine the concept of rock mass as a whole, and to identify rock, solid rock and discontinuities.

When examining the general behavior of the rock mass, the rock should be investigated according to the Q chart. The Q system, developed in 1970, is calculated by the help of six different parameters of the rock and divides the tunnel structure into nine different sections between exceptionally good and exceptionally bad. The system also proposes excavation support for each section. Here, when the situation related to fiber reinforcements is examined, energy absorption capacity ranging from 500 to 1000 Joules is needed within the system, especially in good, medium, weak, very weak structure classification. At the same time, while examining the Q system, the advantages of synthetic fiber reinforcements such as noncorrosive structure, ductility and flexibility, and resistance in abrasive environments came to the fore.

The physical properties of synthetic fiber in fiber reinforced concrete proposed in the Q system were investigated within the scope of this thesis. The main factors underlying the research were the number of fibers affected by the aspect ratio in the first place, hence the crack bridging ability, the resulting crack control and the changes in the energy toughness index. In parallel, the relationship between energy absorption capacity and concrete compressive strength, slump test, fiber aspect ratio could be followed, so the approach between concrete matrix and fiber concrete composite structure could be interpreted. As a result, the interpretation of the outputs obtained as a result of the differentiation in the physical properties of the fiber reinforcement and the monitoring of the load carrying capacities of the fiber reinforcements, which are preferred during the application of shotcrete in underground mining enterprises, under the changing physical properties can be said as another objective of the thesis.

Fiber reinforcements with different aspect ratios were tested in the same concrete recipe in experimental studies carried out in November 2021 in a private mining company within the borders of Balıkesir Province, Balya District. The effect of fiber reinforcements supplied in the same pattern structure by a single manufacturer on the mechanical properties of concrete was investigated within the scope of this study. In order to determine the performances of synthetic fiber concrete such as toughness, bending ductility, energy absorption and load carrying capacity, a total of 16 panel samples of 60 cm * 60 cm * 10 cm in accordance with TS EN 14488-5 standards, at least four for each fiber type. For the determination of fiber content, unit weight and compressive strength tests, 32 cylinder samples of 10 cm * 20 cm dimensions were prepared. All of the fresh concrete tests were carried out in the private mining facility, the hardened concrete tests were completed in the concrete laboratory of the synthetic fiber reinforcement manufacturer company.

During the experimental study, a single concrete recipe was followed, and the applicability of the relevant recipe in the field was tested before the study started. Fiber reinforcements were added to the mixture with the help of fiber dosing machine in the concrete plant of the mining facility, and the mixture was thoroughly blended for approximately 60 seconds in the plant bunker before being transferred to the concrete mixer. The aim here can be explained as maintaining the homogeneous distribution of the fiber reinforcement in the concrete. When the mixture completed at the plant, concrete was transferred to a mixer with a carrying capacity of eight cubic meters. Subsequently, slump and unit weight tests were completed, respectively, and cylinder samples were taken for the compressive strength test and be kept in curing for 28 days. Following the wet concrete sampling process, the concrete mixer has reached the application area which has a distance of approximately 25 minutes from the concrete plant. The grid structure, of the shotcrete machinery's concrete feeding part, is made suitable for the fiber reinforced concrete flow. In this way, it is possible to flow the fibers without being subject to any blockage or balling. As soon as the spraying process

was completed, the panel samples taken from the shotcrete application were corrected to 10 cm in thickness, as mentioned in the TS EN 14488-5 standard, and were left in exact position without being moved for 24 hours. The samples were transferred the next day and led to be cured for according to relevant standart. Both cylinder samples and panel samples were tested in the concrete laboratory of the synthetic fiber reinforcement manufacturer on the 28th day.

The benefits of synthetic fiber reinforcement as a support element, the bending performance it provides to the reinforced concrete structure, the bridging of cracks, the increase of energy toughness values, the prevention of sudden breakage and collapses, the reduction of rebound, the elimination of ironwork-based manufacturing, the elimination of installation errors, the reduction of costs and a safer operation can be listed as creating a working environment. As a matter of fact, within the scope of the thesis study, the energy toughness values that synthetic fiber reinforcements provide to the reinforced concrete structure at different aspect ratios, in other words, the total energy levels that the concrete structure absorbs until it crashed, were investigated and the results were interpreted under six headings.

During the experimental study in which four different aspect ratios were evaluated, it was concluded that a linear relationship could be established between the aspect ratio and the toughness index. On the other hand, increasing the fiber length both under the fixed diameter in the + series and under the fixed diameter in the normal series, which was used in the studies, resulted in an increase in the energy absorption level. In addition, the relationship between the aspect ratio and the maximum peak load in the energy toughness index was investigated, however, it was observed that the results were similar in almost all samples with and without fiber. This is with the concrete matrix of the maximum peak load value; the toughness value was interpreted as a result of the fiber concrete composite structure. When evaluating the relationship between compressive strength values and aspect ratio obtained on cylindrical samples, it was observed that fiber reinforcements did not have any positive or negative effect on compressive strength.

The number of fibers per unit volume, which has a linear relationship with the aspect ratio, appeared visibly on the back surface of the panel that had been crushed. This was also observed in the slump test. When the effect of fixed length and decreasing diameter was examined, it was seen that increasing fiber number had a positive effect on the energy toughness index. In other words, more fiber reinforcement was placed in the environment to prevent the crack from expanding, thus a larger surface area was obtained, and as a result, the concrete became load-bearing for a longer period of time with increased adherence. This result was followed as an increase in the energy absorption capacity of concrete. When an evaluation is made on concrete densities, a rational connection could not be established in the density values obtained by dividing the sample load taken from fresh concrete by volume. In other words, it has been concluded that the fiber reinforcement does not affect the concrete unit weight.

When the energy toughness values were examined, it was seen that all the results were between 700 and 1000 J, that is, in the five and six support categories. This situation can be interpreted as 7, where the 1000 J value is sought, which is an upper support category, with lower dosage increases in the increasing aspect ratio. Similarly, the obtained result can be evaluated as aspect ratio can be evaluated as an important engineering parameter in terms of concrete optimization, cost and workability.



1. GİRİŞ

Madenler, kalkınmanın en temel unsuru olarak adres gösterilen, ülkelerin gelişmişlik ve yaşam seviyelerinin belirleyicisi olarak kabul edilen, sanayi, enerji ve tarım sektörlerinin temellerini oluşturan, devletlerin yurtiçi hasıllarında önemli pay sahibi olan servetlerdir. Bu servetin ülke ekonomisine kazandırılabilmesi maksadıyla kurulan ticari işletmelerde doğru bir planlama oluşturmak ve bu plana uygun olacak şekilde iş güvenliği tedbirlerini elden bırakmadan en hızlı üretim yöntemi ile hareket etmek elzemdir.

Ulaşım, sulama, enerji ve maden tünelleri gibi büyük hacimli boşluklarda, tünel kesitinin ivedi bir şekilde tahkimi gerek operasyonel ekonomiye katkı vermekte gerekse oluşabilecek erken deformasyonlarda emniyetli bir ortam sağlanmasına olanak sağlamaktadır. Gelişen püskürtme beton teknolojisi ve bu teknolojinin yer altı yapılarının duraylılığına olan katkısı, bahsi geçen boşlukların hızlı yapımının önünü açılmıştır. Püskürtme beton hem uygulama kolaylığı hem de kaya kütesine kazandırdığı mekanik özellikler sayesinde yer altı boşluklarının güçlendirilmesini daha pratik ve daha hızlı bir hale getirmiştir.

Arıoğlu ve diğ. (2008) tanımladığı haliyle geleneksel betona göre kalıp gerektirmeden yerleştirilmesi ve özel katkılar yardımıyla hemen dayanım kazanmaya başlayarak taşıyıcılığını yerine getirmeye başlaması gibi özellikleri nedeniyle yer altı mühendislik yapılarında, maden mühendisliği uygulamalarında yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Neticesinde kazı sonrası bir yüzeyi serbest hale gelmiş olan kaya kütesinin güçlendirilmesiyle kesit altında kalan bölgelerde çalışma yapılabilmektedir. Hasır çelik ve bulon teknolojisine ek ve uygun şartlar altında yerine geçebilen fiber donatılı püskürtme beton sistemi sayesinde söz konusu zaman avantajı yaratılabilmektedir. Nitekim 3000 yılı aşkın süredir, kerpiç yapılardaki saman takviyesi gibi doğal güçlendirme kaynakları, gevrek yapı malzemeleri için kullanılmaktadır. Çelik liflerin betonda kullanımına ilişkin ilk bilimsel çalışmalar 1960'lı yıllara kadar gitmektedir. O dönemden beri, zemin, kompozit yapılar, prekast ve püskürtme beton dahil olmak üzere fiber donatı kullanılarak binlerce proje başarıyla tamamlanmıştır (ACI, 1996).

Karayolları Teknik Şartnamesinde (2013) ifade edildiği şekliyle çelik ve sentetik lifler genellikle betonun enerji yutma kapasitesini, çekme dayanımını, deformasyon yeteneğini ve çatlak oluşma olasılığını azaltmak amacıyla kullanılır. Lifler genellikle ya bireysel taneler halinde ya da suda hızlı bir şekilde eriyen yapıştırıcılarla bir araya getirilmiş topluluklar halindedirler. Liflerin püskürtme betonda kullanım amacı, geleneksel çelik donatı miktarı ve aralığını azaltmak ya da uygun koşullarda çelik donatı ihtiyacını tamamen ortadan kaldırarak, onun yerine geçmektir.

1.1 Tezin Amacı

Giriş bölümünde ifade edildiği şekliyle fiber takviyeli püskürtme beton, kaya kütlelerini desteklemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı durumlarda, bileşenlerden yalnızca biri kullanılabilirken, genellikle kaya bulonları fiber takviyeli püskürtme beton ile birlikte tercih edilmektedir. Kaya bulonları, tek tek blokları sabitlemek için nokta bulonlama şeklinde veya sistematik olarak yerleştirilebilir. Püskürtme beton ile kaya bulonları arasındaki yük çelik pullarla aktarılırken, kaya saplaması ile kaya kütleleri arasındaki yapısal bağlantıyı sağlamak için enjeksiyonlu kaya saplamaları kullanılabilir. Böylece, kaya kütlelerinin deformasyonu sentetik fiberlerle tutulurken aynı zamanda bulonda çekme kuvvetlerine ve pul ile püskürtme beton arasında bir sıkıştırma kuvvetine neden olmaktadır.

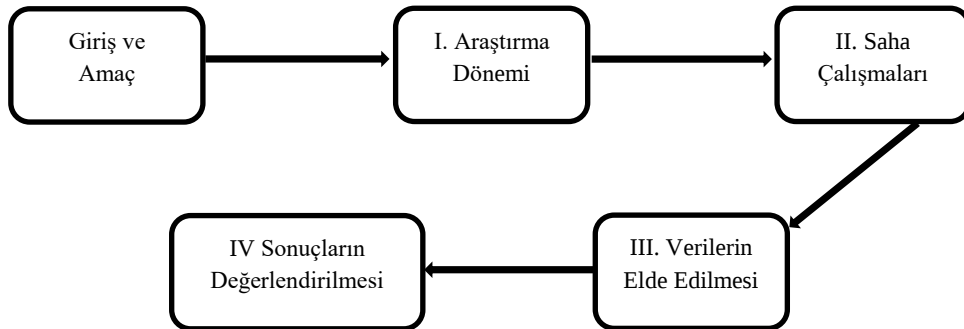
Karayolları Teknik Şartnamesinde (2013) belirtildiği haliyle yaygın olarak kullanılan lifler 12–50 mm uzunluktadır. Boy kısaldıkça, liflerin beton içinde homojen olarak karıştırılabilmesi ve püskürtülmesi kolaylaşır, geri sıçrama kaybı azalır. Ancak uzun olanlar betonun enerji yutma kapasitesini artırma ve çatlak oluşumunu engelleme yönünden daha olumlu etki yapmaktadır. Sentetiklerin aksine çelik liflerin boylarının ise genellikle 25-35 mm arasında olması istenir. Genel bir kural olarak çelik lif boyunun 50 mm'yi aşması istenmemektedir.

Bu tez çalışmasında, farklı çap ve uzunluklardaki fiber donatılarla güçlendirilmiş beton panellerin yenilme sonrası davranış durumları incelenmiştir. Araştırmanın altında yatan ana unsurlar göz önünde bulundurulduğunda ilk etapta narinlik oranının etkilediği fiber adedi, fiber adedinin etkilediği çatlak köprüleme yeteneği, neticesinde elde edilen çatlak kontrolü ile enerji tokluk indeksindeki değişimler ön plana çıkmıştır. Paralel olarak enerji yutma kapasitesi ile beton basınç dayanımı, çökme deneyi, fiber narinlik oranı arasındaki ilişki takip edilebilmiş, dolayısıyla beton matrisi ile fiberli

beton kompozit yapısı arasındaki yaklaşım yorumlanabilmiştir. Sonuç olarak fiber donatı fiziksel özelliklerindeki farklılaştırma neticesinde elde edilen çıktıların yorumlanması ve yer altı maden işletmelerinde püskürtme beton uygulaması esnasında tercih edilen fiber donatıların değişen fiziksel özellikler altında yük taşıma kapasitelerinin takip edilmesi tezin bir diğer amacı olarak söylenebilir.

1.2 Tez Çalışmasında İzlenen Yöntem

Çalışma Şekil 1.1’de gösterildiği haliyle dört aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama olarak kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu araştırma, fiber donatılı püskürtme betonun karakteristik özelliklerinin incelenmesini ve yer altı maden projeleri için kaya kütlesi sınıflandırma sistemlerinin gözden geçirilmesini içermektedir. Çalışmanın ikinci aşaması, uygulama alanında ön hazırlık çalışmalarını ve verilerin toplanabilmesi için ihtiyaç duyulan deneylerin araştırılmasını içermektedir. Çalışmanın üçüncü aşaması saha çalışmasını içermektedir. Sahada numune alımının nasıl yapıldığı, dikkat edilen hususlar, karakteristik özellikler, betonun kürlenmesi ile alakalı veriler bu bölümde yer almaktadır. Çalışmanın dördüncü aşamasında söz konusu test sonuçları paylaşılmış ve bu sonuçlar üzerinden değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 1.1 : Tez akım şeması.



2. FİBER DONATILI PÜSKÜRTME BETON

2.1 Püskürtme Beton

Püskürtme beton; agrega, çimento, su ve priz hızlandırıcı katkı karışımının boru hattı içerisinde basınçlı hava ile taşınıp, püskürtülerek yerleştirilen beton olarak tanımlanmaktadır(Arıoğlu ve ark. 2008). Geleneksel betona göre kalıp gerektirmeden uygulanabilir olması ve priz hızlandırıcı katkıları vesilesiyle hızla dayanım kazanmaya başlayarak taşıma vazifesini yerine getirmeye başlaması gibi özellikleri nedeniyle tünel tahkimat sistemi içerisinde yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Hayata gözlerini 19 Mayıs 1864 yılında açan Carl Ethan Akeley (1864-1926) püskürtme betonun mucidi olarak kabul edilmektedir (Teichert, 2002). İlk başlarda Amerika, Şikago'daki Field Columbian Müzesi'nde bir binanın cephesini rehabilite etmek için alçı uygulaması için geliştirilen püskürtme beton, kısa sürede çimentolu malzemelerin müzelerde yer alan modellerin çimentolu karışım, tel ve kumaş ile güçlendirilerek çeşitli yüzeylere uygulanmasında kullanılmıştır. Akeley tarafından icat edilen ve Şekil 2.1'de yer alan tabanca çift odacık prensibiyle çalışmakta olup hazneler üst üste yerleştirilmekte ve alternatif olarak hava ile basınçlandırılmaktaydı. En eski yer altı kullanımlarından biri, New York şehrine su temini için Hunter's Brook hattının kaplanması olarak kayıtlara geçmiştir (Teichert P, 2002).



Şekil 2.1 : İlk püskürtme beton makinesi.

Amerika, Allentown'daki Cement Gun Company, Akeley'in çimento tabancası patentlerinin haklarını ve “gunite” ticari markasını almıştır. Gunite uygulama sektörlerini, kanalizasyon, su ve demiryolu tünellerinin kaplanması dahil olmak üzere çok çeşitli alanlara yaymış, madenlerde zemin desteklemesinde, binaların inşaatlarında ve onarımlarında, yapısal çeliğin korozyona ve yangın hasarına karşı korunmasında; köprülerin, barajların ve kanalların onarımında; kaya şev stabilizasyonda ve su tutma yapılarının inşasında kullanılacak şekilde genişlemiştir.

Gunite 1920'lerin başında yalnızca Kuzey Amerika'da tercih edilirken, 1921'de Almanya'ya, 1924'te Birleşik Krallık'a ve on yılın sonunda Hindistan, Güney Afrika ve Avrupa'daki diğer ülkelere yayılmıştır. İkinci Dünya Savaşı'ndan hemen sonra, 1950'li yıllarda, daha ekonomik ve güvenli destekleme sistemleri konusunda araştırmalar yapılmış, malzeme teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak; daha büyük dane çapındaki (25 mm'ye kadar) agrega içeren karışımları püskürtebilen makinaların geliştirilmesiyle yer altı yapıları ve madenlerdeki destekleme sistemlerinde yaygın olarak yer almaya başlamıştır.

İlkeleri Rabcewicz ve diğ. (1964) tarafından ortaya konulan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nde, hızlı yerleştirilebilmesi ve kısa zaman aralığında dayanım kazanması, değişik kaya ve zemin koşulları, kesit geometrilerine kolaylıkla uyum sağlaması dolayısıyla püskürtme beton; çelik bağ, çelik hasır ve kaya saplamalarından oluşan destekleme sisteminin ayrılmaz parçası haline gelmiştir. Püskürtme beton, onarım ve restorasyon, madencilik, yer altı ve tünel açma, refrakter ve yeni inşaat dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere birçok yapı alanında kullanılmaktadır. Kuru karışım püskürtme beton ve yaş karışım püskürtme beton olmak üzere iki tip uygulama mevcuttur.

2.1.1 Kuru karışım püskürtme beton

Beton bileşenleri olan 0-5 mm aralığında ince agrega, 5-16 mm aralığında olan kaba taneli çakıl, bağlayıcı özellikteki çimento ve puzolanlar ile mineral katkıları ve son olarak donatı vazifesi gören makro fiber donatılar kuru karışım öğeleri arasında yer almaktadır. Kuru karışıma, işlem esnasında püskürtme ekipmanı ucundan suyun ve sıvı/toz priz hızlandırıcıların eklenmesi ile yapılan işleme ise kuru karışım püskürtme beton uygulaması adı verilir.

2.1.2 Yaş karışım püskürtme beton

Beton karışımına dahil edilen tüm bileşenlerin (agrega: 0-5 mm boyut aralığındaki ince taneli kum ve 5-16 mm boyut aralığındaki kaba taneli çakıl, hidrolik bağlayıcı; çimento ve puzolanlar-mineral katkıları, su, karışımda ise sentetik veya metalik fiber, akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları) beton karışım tasarımında belirtilen miktarlarda bir beton üretim tesisinde harmanlanması sonrası uygulama alanına getirilmesi, uygulama püskürtme ekipmanı ucundan sıvı priz hızlandırıcıların eklenmesi ile yapılan bir püskürtme işlemi sistemidir. Günümüzde ağırlıklı olarak tercih edilmekte olan yöntemdir.

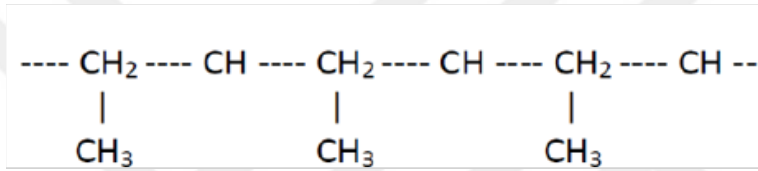
2.2 Fiber Donatı Hammaddeleri

Fabrika ortamında üretilen sentetik fiberlerin pek çok kullanım alanı bulunmaktadır. Fiberlerin bu kullanım alanlarında hem makro hem de mikro çatlakların oluşmasını ve/veya genişlemesini engelleme rolü bulunmaktadır. Petrol tabanlı olan ve termal işlemler ile şekil verilen bu ürünler farklı molekül ağırlıklarından dolayı molekül ağırlığına göre farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Madencilik ve inşaat endüstrilerinde en çok kullanılan sentetik lifler, bunların fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.1’de paylaşılmıştır.

Çizelge 2.1 : Fiberlerin tipik özellikleri.

Fiber Türü	Çap (µm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme dayanımı (GPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kopmada uzama (%)
Akrilik	20 - 350	1,16 - 1,18	0,20 - 1,00	14 - 19	25 - 45
Aramit	10 - 12	1,44	2,30 - 2,50	63 - 120	2 - 4,50
Karbon (PAN)	8 - 9	1,60 - 1,70	2,50 - 4,00	230 - 280	0,50 - 1,50
Karbon (Pich)	9 - 18	1,60 - 1,21	0,50 - 3,10	30 - 480	0,50 - 2,40
Nylon	23 - 400	1,14	0,75 - 1,00	4,10 - 5,20	16 - 20
Poliester	10 - 200	1,34 - 1,39	0,23 - 1,20	10 - 18	10 - 50
Polietilen	25 - 1000	0,92 - 0,96	0,08 - 0,60	5	3 - 100
Polioleefin	150 - 635	0,91	0,27	2,7	15
Polipropilen	20 - 400	0,90 - 0,95	0,45-0,76	3,50 - 10	15 - 25
PVA	14 - 650	1,3	0,80 - 1,50	29 - 36	5,7
Çelik fiber	100 - 1000	7,84	0,50 - 2,60	210	0,50 - 3,50
Beton matrisi	-	1,50 - 2,50	0,003-0,007	16711	0,02

Farklı kimyasal yapılara sahip olan sentetik fiberlerin mekanik özelliklerinin yanında çimento pastası-agrega karışımındaki uyumu ile kompozitin mekanik özellikleri konusunda da değerlendirilmektedir. Örneğin karbon fiberler, her ne kadar mekanik özellikleri yüksek olsa da, çok ince yapıları, yüzeylerinin beton ile çok uyumlu olmaması nedeniyle, yük taşıma amaçlı sistemlerde oldukça fazla miktarda kullanım ihtiyacı duymaktadır. Benzer şekilde polyester fiberler de sert yapısı ve parlak yüzeyleri sebebi ile beton içinde yeterli aderansa sahip olmamakta, ayrıca aşırı agresif alkali ortamlarda da yük taşıma performansları süreklilik göstermemektedir. Bu sebeple, fiberlerin mekanik değerleri tek başlarına anlam içermemektedir. Polyester fiberler dışında sentetik yapıda olan polipropilen fiber donatılara ait kimyasal yapı Şekil 2.2’de verilmektedir.



Şekil 2.2 : Polipropilenin kimyasal yapısı (Moghimi, 2014).

Hammadde erişilebilirliği, fiyat/performans ve üretim parametreleri bakımından en çok kullanılan sentetik fiber olan polipropilen, kimyasal olarak inert ismiyle nitelendirilirken, alkali direnci yüksek olması vesilesiyle performans değerlerine ek olarak durabilite konusunda da avantajlı bir konuma sahiptir. Sudan hafif (0,9-0,95 g/cm³) yoğunluğa sahip polipropilenin öz mekanik değerleri ile sentetik fiber donatıların pek çok kullanım alanı bulunmaktadır. Fiberlerin bu kullanım alanlarında hem makro hem de mikro çatlakların oluşmasını ve/veya genişlemesini engelleme rolü bulunmaktadır. Petrol tabanlı olan ve termal işlemler ile şekil verilen bu ürünler farklı molekül ağırlıklarından dolayı farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmaktadır.

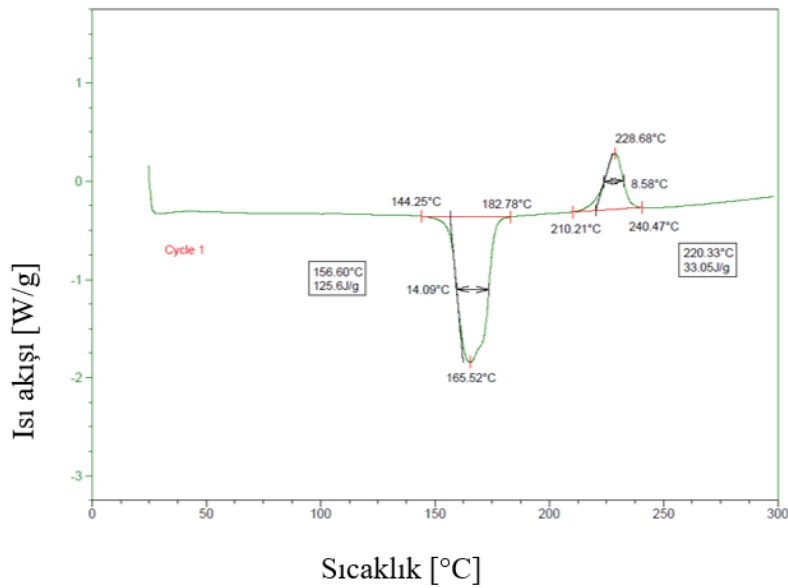
Madencilik ve inşaat endüstrilerinde sıklıkla tercih edilmekte olan polipropilen makro liflere ait fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 2.1 içerisinde paylaşılmıştır. Her ne kadar görece düşük elastisite modülü ve kopma dayanımına sahip olduğu gösterilmiş olsa da özellikle yüzey pürüzlülüğü sayesinde beton ile birlikte senkron çalışarak ihtiyaç duyulan çekme etkilerine karşı oluşan direnci karşılayabilmektedir.

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi polipropilen en küçük organik yapıların bir araya gelmesi ile kimyasal olarak inert (bağ kurmaz) karaktere sahip olmaktadır. Bu sayede kuvvetli asit veya bazlar içinde bütünlüğünü korumakta, böylelikle beton matrisi içinde beton

var olduğu sürece servis verebilmektedir. Benzer şekilde kimyasal yapısı sebebi ile bünyesinde su tutmamakta, yüzey olarak da hidrofobikler sınıfına girmektedir (ACI 2012).

Isıl işlemler ile 160-170°C aralığında eritilip şekil verilen polipropilen, farklı en kesitlerde yüzey desenleri verilerek son şeklini alır. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi ısı işlem altında polimer yapının entalpisi, erime sıcaklığı, kristallenme bölgesi ve saf olup olmadığı DSC (diferansiyel taramalı kalorimetre) ile anlaşılabilmektedir.

Fiber çapına göre mikro veya makro olarak sınıflandırılırken, makro fiberler dolu kesit veya fibrilize olarak üretilebilmektedir. Bununla birlikte ince kesitli film olarak üretilip, tasarlanan ölçülerde kesilebilen, böylelikle beton içinde parça sayısının artması hedeflenen ürün tasarımları da bulunmaktadır. Tüm fiberler, betonda homojen karışımları için PVA (polivinil alkol) ile sarılarak demetler halinde betona beslenebileceği gibi demet haline getirilmeden dağınık halde de eklenebilmektedir. Bu seçim ürün tasarımının bir parçasıdır. Ürün tasarımının bir diğer parçası da fiber uzunluğu ve çapının belirlenmesidir. Daha kalın fiberler beton içinde daha az parça sayısına sahip iken bunun karşılığında karışım kolaylığı sağlamaktadır. Son kullanıcının kullanım amacı ve isterlerine göre uygun fiber türü ve miktarı, fiberli beton katmanı tasarımcısının değerlendirme aşamasında göz önüne aldığı parametrelerdir (Bentur ve Mindess, 2007).



Şekil 2.3 : Polipropilene ait diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) davranışı.

Her ne kadar yüzey şekilleri ve geometrileri bakımından pek çok fiber türü var olsa da bu çeşitlilik neticesinde fiberli betonların davranışları ve dirençleri de farklılık göstermektedir. Öz değerleri bakımından birbirine benzeyen fibrilize fiberler ve monofilaman yapıdaki fiberlerin çatlak köprüleme performansları farklılık gösterebilmektedir (Singh, 2011). Buna göre monofilaman yapıdaki fiberler, fibrilize fiberlere göre çatlak köprüleme bakımından daha iyi performans göstermiştir.

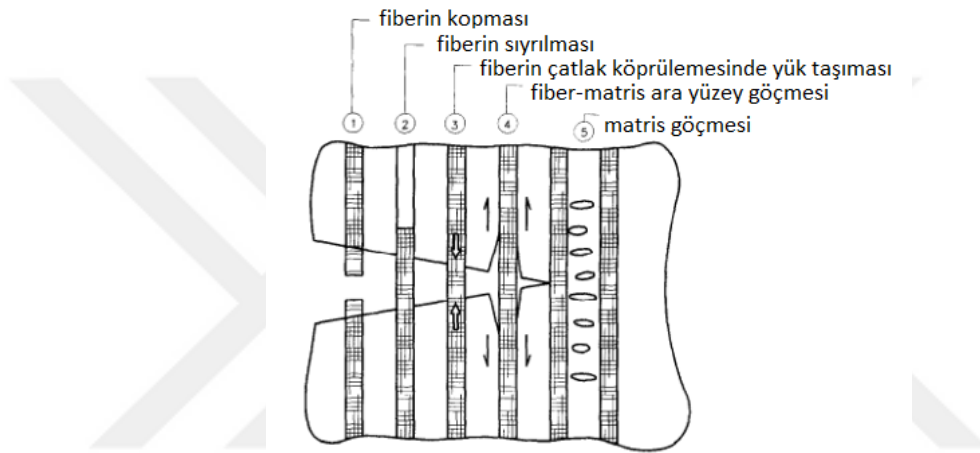
Polipropilenler çok yüksek oranda (hacimsel olarak %5 ve üzerinde) kullanıldığında birincil taşıyıcı (moment taşıma kapasitesini artırıcı) olarak kullanılabildiği gibi daha düşük dozajlarda çatlak köprüleyici (ikincil taşıyıcı) olarak daha fazla kullanım alanı bulmaktadır (Singh, 2011). Her iki kullanım şeklinde de mühendislik parametreleri göz önüne alınarak gerekli lif dozajı hesaplanabilmektedir. Açık saha zemin betonları için Amerikan ACI 544.4R, İngiliz TR34 (The Concrete Society, 2016) rehberleri yol gösterirken sentetik fiber donatılı püskürtme betonlar için rehberler 3. başlık altında tartışılacaktır.

2.3 Sentetik Fiber Donatılar ve Betona Etkileri

Basınç etkileri altında güçlü olan beton eğilme/çekme etkileri altında zayıf olduğundan bu amaçla güçlendirme malzemelerine ihtiyaç duymaktadır. Geçmişten günümüze betonu güçlendirmek için metalik malzemeler kullanılsa da durabilite açısından çok uzun süreli aynı ölçüde servis veremeyen bu metalik malzemelerin yerini yeni trendde sentetik yapıdaki malzemeler almaktadır.

Bu yönüyle sentetik fiber takviyeli betonların geleneksel yöntemler ile takviye edilen veya çelik fiberlerin kullanıldığı betonlara oranla sağladıkları üstünlüklerden dolayı kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Bu betonlar, püskürtme betonların kullandığı alanlar haricinde yaygın olarak beton yollar ve yol üst yapılarında, zemine oturan sistemlerde (fabrika yapıları vb.), şev stabilizasyonunda, havalimanlarında, suliman yapılarında, fabrika ortamında üretilmiş betonarme elemanları (beton boru, paneller, traversler) ile güvenlik yapılarında kullanılmaktadır. Her ne kadar geniş kullanım alanları bulunsun da sentetik fiberler üzerine özellikle püskürtme betonlarda ve özellikle fiberlerin beton performansına etkisi hakkında çok geniş akademik çalışmalar yer almamaktadır.

Kullanılan sentetik lifler farklı yüzeylere, geometriye sahip olabilmektedir. Sentetik lifler hem saha betonlarında hem de püskürtme betonlarda beton kesitinde oluşan çekme kuvvetlerinin güvenle taşınabilmesindeki ihtiyacı karşılayabilmektedir. 2.4 başlığında gösterilen testler ile lifli betonların performansı ölçülebilmektedir. Bu testlerin sonuçları, elde edilen eğrilerin ham verilerinin işlenmesi ile bir mertebe olarak değerlendirilmektedir. Diğer bir ifade ile sentetik fiberler beton matrisinin enerji yutma kapasitesini ve deformasyon yeteneğini arttırmak, çatlak oluşma olasılığını azaltmak amacıyla kullanılırlar. Bu durum Anderson'un (1991) çalışmasında Şekil 2.4'teki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Fiber donatı çatlak köprülemesi (Anderson, 1991).

Sentetik fiberlerin çatlak köprüleme yetenekleri, çatlak köprüleme sırasında kopma durumları ve içeride oluşan etkileri Anderson tarafından takip edilmiştir. Çalışmada fiberlerin sürtünme etkilerini ve aderansın artırılması ile tasarım isterlerine göre hedeflenen performansa erişebilme durumları incelenmiş olup, fiberli betonun taze beton özelliklerinin göz önüne bulundurulması kaydıyla optimum fiber miktarı ile performans değerlerinin sağlanması gerekliliği ortaya konmuştur.

Dinamik yükler sebebi ile oluşan çekme bölgelerinden dolayı çeşitli doğrultu ve boyutlarda beton matrisinde hasarlar meydana gelmektedir. Tasarım süreçlerinde çoğunlukla betonun karakteristik basınç dayanımı göz önüne alınırken, beton davranışını kırılgan davranıştan sünek davranışa doğru değiştirmek adına sentetik fiberlerin kullanımı günden güne artmaktadır. Bu sayede betonun enerji yutma kapasitesi artacak diğer bir değişle tokluğu daha yüksek mertebelere ulaşacaktır (ACI, 2018). Karışım içinde üç boyutlu homojen olarak dağılan fiber donatılar, geleneksel

uygulamalarda kullanılan çelik donatılardan farklı olarak, sadece bir bölgede değil tüm kesit boyunca çatlak kontrolü sağlamak ve hasar aldığı durumda dahi betona yük taşıyabilir karakter kazandırmaktadır. Liflerin çekme dayanımları, beton matrisine ait olan çekme dayanımlarından daha fazla olduğu için maruz kalınan çekme gerilmeleri esnasında kompozit yapı beraber çalışarak olası birçok gözle görülür çatlağın önüne geçebilmektedir. Bu özelliğinin yanında donatı işçiliğini elimine etmesi ile hem zaman hem de ekonomik açıdan son kullanıcıya avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, püskürtme beton uygulamalarında, uygulamanın doğasından kaynaklanan geri sekme oranına da olumlu yönde katkısı bulunmaktadır. Özellikle mikro yapıdaki fiberler (fiber çapının 0,3 mm'den düşük olduğu formları), betonun iç yapısını değiştirerek kohezyonu artırmakta ve meydana gelen atık malzeme miktarını azaltabilmektedir (Brandt, 2015). Çevresel etkileri bakımından ise sentetik fiberler çelik tabanlı malzemelere göre (çelik fiber, çelik hasır) üretimi sırasında daha düşük CO₂ salınımı ile de daha çevreci bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır.

Sentetik fiberler, farklı şekillerde düz, kıvrımlı, kompleks bitişte veya dairesel-üçgensel en kesitte olabilen ve değişen çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahip takviye elemanlarıdır. Yüzeyi pürüzsüz sentetik fiberler çimento pastası ile aderansı düşük olurken, bu zayıflığı parça sayısını artırarak bertaraf etmektedir. Parça sayısı artarken azalan beton işlenilebilirliği göz önünde bulundurulduğunda lif uzunluğunun, diğer bir ifade ile narinliğinin düşürülmesi, fiberli betonu işlenebilir kılmaktadır. Ancak bu durumda da lifli beton performansı azalmaktadır. Bu sebeple yüzeyi düz sentetik fiberler özellikle püskürtme betonlarda, günümüz teknolojisinde, çok fazla kullanılmamaktadır. Tıpkı çelik fiberlerde olduğu gibi, sentetik fiberlerde de yüzeyin fiziksel veya kimyasal olarak işlenmesi ile fiberli beton özellikleri iyileştirilebilmektedir. Burada dairesel en kesitli fiberler üretim süreçlerinde özel işlemlerden geçirildikten sonra desenli yapıya kavuşturulmaktadır. Bu yüzey işlemi fiberlerin kristal yapısını değiştirdiğinden çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri olumsuz yönde etkilense de fiber ile çimento pastası ile bağ kurabilir hale getirildiğinden dolayı yapılan işlem bir çeşit ürün tasarımıdır. Yüzey işleme sonrasında en sık kullanılan sentetik fiberlerin çekme değerleri en düşük 500 MPa mertebesinde iken, elastisite modülü için herhangi bir kriter bulunmamaktadır (BTS, 2012). Her ne kadar bir kriter bulunmasa da elastisite modülü değeri de 6 GPa ve üzerinde bir değerde iken fiberli betonların daha yüksek performans gösterdiği söylenebilir. Tüm

tasarım süreçlerinde sentetik fiberlerin boy / eşdeğer çap oranı diğer bir ifade ile narinlik oranı, yüzey işlenme şekli ve mekanik özellikleri, fiberli beton özelliklerinin iyileştirilmesindeki önemli parametrelerdir (Brandt, 2015). Benzer şekilde Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi farklı hammaddelerden üretilmiş sentetik lifler de bulunmaktadır.

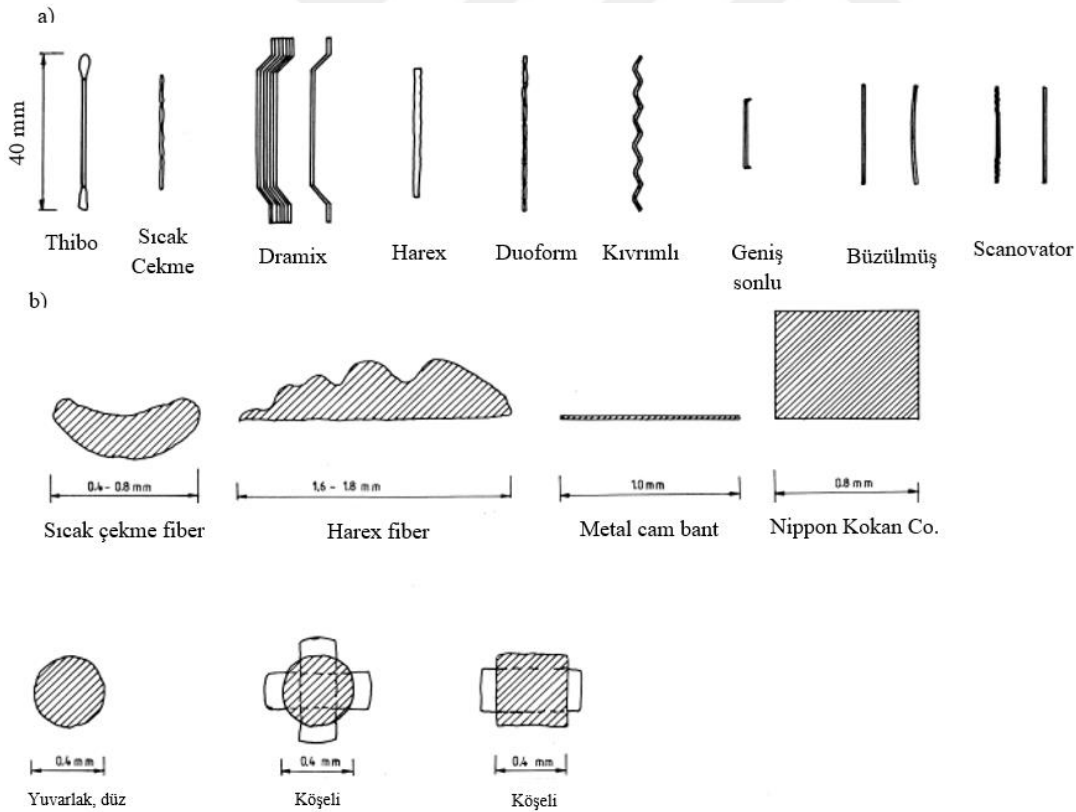
Betonda kısa kesilmiş ve rastgele dağılmış sentetik fiberler, dış yüklerden meydana gelen kesit zorlarına (kesme kuvveti, moment etkileri) karşı direnç oluşturduğundan dolayı meydana gelecek hasarları ve oluşabilecek çatlakların büyümesini engellediği literatürde yer almaktadır. Fiber-çimento pastası ara yüzeyinin kuvvetli olması, sentetik fiberlerin durabilitesinin yüksek olması, yer altındaki agresif ortam koşullarında dahi dramatik çatlakların engellenebilmesi, beton çatladığı durumda bile yük taşıyabilmesi ve neticesinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin modifiye edilmesi vesilesiyle betonun enerji yutma kapasitesi artmaktadır. Bu artırılmış performanslı sentetik fiberler, çatlakların büyümesini ve genişlemesini belirli bir seviyede engellemektedir. Sağlanan etki, fiziksel olarak eğilme performansının artırılması anlamına gelmektedir. Eğilme performansının hangi ölçüde iyileştiği eğilme deneyi ile belirlenirken, eğilme dayanımı ve betonun tokluğu kayıt altına alınmaktadır.

Amerikan Beton Enstitüsü 544. Komitenin çalışmalarına göre hacimsel olarak %0,1 ile %10 aralığında polipropilen sentetik fiber içeren kompozit yapıların mekanik özellikleri, fiber miktarının yanında fiber geometrisi, uzunluğu, elastisite modülü, narinliği, dayanımı, yüzey karakteristikleri, üretim metodu, çimento pastasının veya beton matrisinin içeriği ve bu matrisin dayanımları gibi parametrelerine de bağlıdır (ACI, 2018). Sentetik fiberlerin eklenmesi ile betona sağlanan katkı mekanik değerler ile ölçülebiliyorken bu katkının çevresel etkilerin dışında bir diğer boyutu da döngüsel ekonomiye olan etkisidir.

Konvansiyonel yöntemde çelik hasırlar ile uygulama yapılırken betonun harmanlanması esnasında eklenen sentetik fiberler işçilik, depolama, uygulama/montaj hataları gibi operasyonel maliyetleri de elimine etmektedir. Çelik fiberlerin de sağladığı bu katkının yanında sentetik fiberlerin korozyona uğramaması, iki lif türü arasındaki fark olarak söylenebilmektedir. Çelik fiberlerin depolanması sırasında dahi paslanıyor olması aslında bu alanda zayıflığı anlamına geliyorken aynı anda beton içinde zamanla paslanmaya devam etmesi sebebi ile uzun dönem performansı konusunda risk barındırmaktadır. Bu da bakım veya kırım-yeniden yapım

operasyonlarını diğer bir ifade ile ek maliyetleri doğurmaktadır. Sentetik fiberli beton eğilme performansı ve uygulama isterleri göz önüne alındığında, kullanılacak lif miktarı, özellikle narinlik oranı da göz önüne alınarak optimize edilir ve neticesinde sentetik fiberlerin kullanımı ile daha sürdürülebilir bir çözüm üretilebilmektedir (Afroughsabet ve diğ, 2018; Medina ve diğ, 2015).

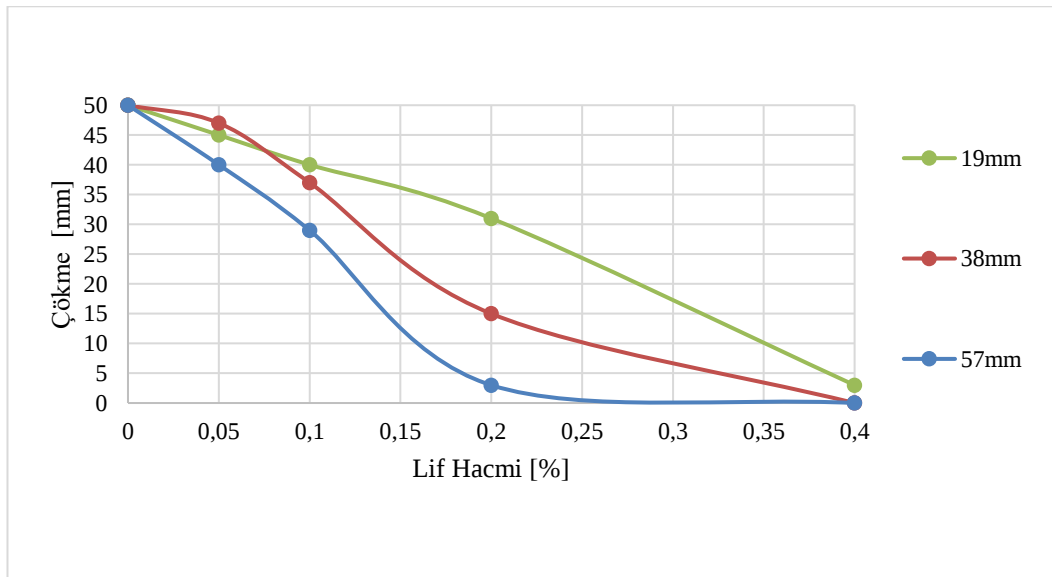
Özetle sentetik fiber donatılı betonların üstünlükleri, betonarme katmanlarına kazandırılan eğilme performanslarındaki artış, çatlakların sınırlandırılması, enerji absorpsiyonlarındaki artış, ani kırılma/göçmenin önlenmesi, geri sekme oranının azaltılması, daha çevreci yapı elemanlarının imalatı, montaj hatalarının elimine edilmesi ve maliyetlerin en aza indirilmesi olarak sıralanabilir. Bu tez çalışmasında da Şekil 2.5'te gösterilen fiberlerin sentetik olanlarının farklı narinlik oranları ile elde edilen performans değişimleri gözlemlenmiş ve optimum fiber uzunluk/çap oranı belirlenmesine odaklanılmış, bahsedilen üstünlükler saha ve laboratuvar çalışmaları ile ortaya konmuştur.



Şekil 2.5 : Bazı kısa kesilmiş fiber örnekleri a) yüzey şekli b) en kesit (Bentur,2007).

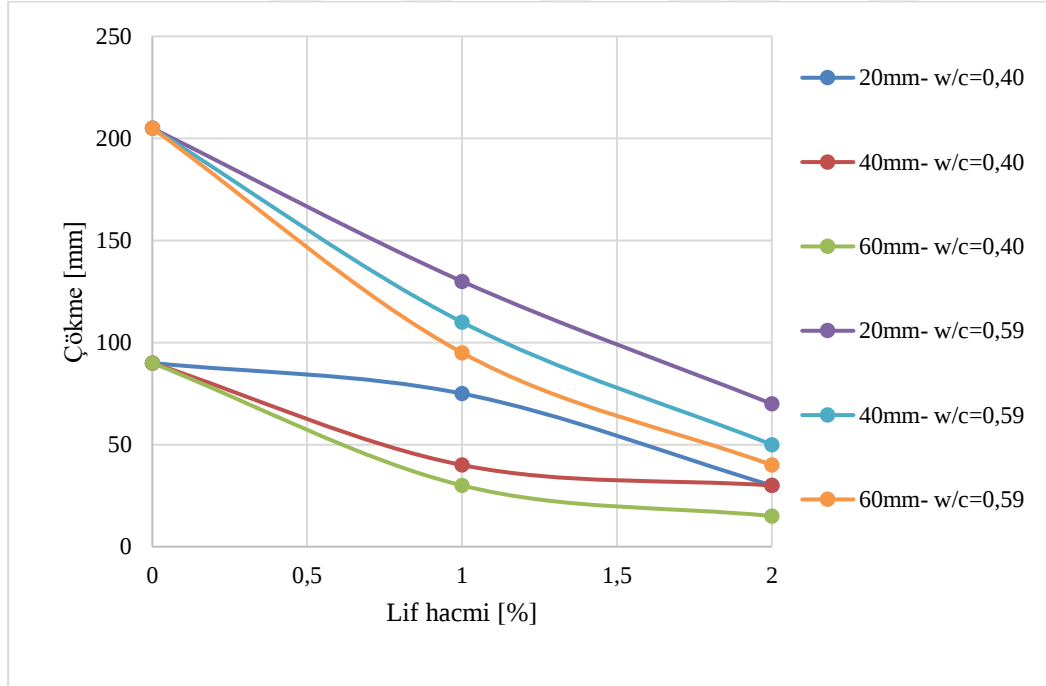
Her ne kadar sentetik fiber miktarının ve narinlik oranının artması ile fiberli betonların eğilme etkileri altında performansları iyileşse de bu artış ile birlikte beton

işlenebilirliği düşebilmekte ve ekipmanlar arasında aktarım durumu olumsuz etkilenebilmektedir. Fiber miktarının aşırı oranda katılması veya çok uzun liflerin karışıma eklenmesi ile betonun akışa karşı direncinin artması ile birlikte sahada uygulama problemleri ile karşılaşılabilir. Şekil 2.6'da görüleceği üzere fibrilize yapıdaki polipropilen liflerin hacimsel olarak %0,1 ve %0,2 oranında, sırası ile 0,9 kg/m³ ve 1,8 kg/m³ oranlarında karışması ile birlikte fiberli betonun çökme değerinin düştüğü, diğer bir ifade ile daha zor işlendiği görülebilmektedir. Bu sonuç, daha fazla fiber içeriği betonun katı parçacıklarının sürtünmesini artırdığı dolayısı ile işleme güçlüğü oluşmaya başladığı şeklinde yorumlanabilir. Aynı çalışmada fiber uzunluğu arttıkça benzer etki ile karşılaşıldığı görülmektedir. Kısa kesilmiş 19 mm uzunluğundaki fiberler, 38 mm ve 57 mm uzunluğunda kesilerek atılan fiberlere göre daha fazla işlenebilir bir konfigürasyon sunarken fiber miktarının artışı ile sonuçlar arasındaki fark daha belirgin hale gelmiştir. %0,1 hacim oranda katılmış ve 19 mm, 38 mm, 57 mm uzunluğunda kesilmiş fiberler sırası ile 47 cm, 45 cm ve 40 cm çökme değerlerine sahip iken, aynı uzunluktaki fiberler %0,2 hacim oranında katıldıklarında sırasıyla 31 cm, 16 cm, 2 cm çökme değerlerine ulaşılmıştır. Buradan fiber uzunluğu (aynı çaptaki fiberler olduğu için fiber narinliği) ve fiber miktarı işlenebilirliği olumsuz etkilerken bu iki parametrenin aynı anda daha fazla etki edebileceği sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 2.6 : Fibrilize polipropilen fiber miktarının ve uzunluğunun betonun işlenebilirliğine etkisi (a) çökme (b) VeBe testleri (Spadea ve Frigione, 1987).

İşlenebilirlik üzerine ulaşılan vargılar Hasaba ve diğ. (1984) çalışmasında da görülmüştür. Şekil 2.7’de yapılan çalışmada paylaşıldığı üzere dikdörtgen en kesitli polipropilen liflerin hacimsel olarak %1, %2 ve %3 oranında, sırası ile 9 kg/m³, 18 kg/m³ ve 27 kg/m³ oranlarında karışması ile birlikte fiberli iki farklı beton reçetesindeki değişim takip edilmiştir. Düşük su/çimento içeren betonun çökme değerinin 20 cm olduğu karışımda 20 mm, 40 mm ve 60 mm uzunluğunda kesilmiş fiberlerin %1 hacimsel oranda katıldığı durumda çökme değeri sırası ile 12 cm, 11 cm ve 9 cm olduğu görülüyorken fiberlerin %2 hacimsel oranda katıldığı durumda çökme değeri sırası ile 8 cm, 5 cm ve 4 cm olduğu, fiberlerin %3 hacimsel oranda katıldığı durumda çökme değeri tüm oranlar için çok düşük olduğu görülmektedir. Diğer bir ifade ile önceki çalışmada olduğu gibi burada da fiber miktarı ve uzunlukları arttıkça (aynı çaptaki fiberler olduğu için fiber narinliği) ve fiber miktarı işlenebilirliği olumsuz etkilerken bu iki parametre aynı anda daha fazla etkiler sonucuna ulaşılabilir ve bu durum lif yüzey geometrisinden bağımsızdır, lif yapısının değişmesi ile karşılaşılan etki değişmektedir.



Şekil 2.7 : Dikdörtgen kesitli fiberlerin lif içeriği ve uzunluğunun çökme üzerindeki etkisi (Hasaba ve diğ, 1984).

Yukarıda betona olan etkilerinin bahsedildiği sentetik fiber donatıların karakteristik özellikleri incelenirken temel olarak üç parametre takip edilmektedir. Söz konusu üç

parametrenin betona etkisi ile oluşan tokluk değerlendirmesi ise göz önünde bulundurulması gereken bir başka husustur.

2.3.1 Çekme dayanımı

TS EN 14889-2 standardına göre çekme dayanımı, “bir fiberin dayanabileceği en büyük çekme kuvvetine karşılık gelen gerilme” olarak tanımlanmıştır. Çekme dayanımı en büyük kuvvetin ortalama en kesit alanına bölünmesi ile hesaplanır. Sentetik fiber donatı rneği şekil 2.8’de gösterilmiştir.



şekil 2.8 : Çalışmada kullanılan sentetik fiber.

2.3.2 Elastisite modülü

TS EN 14889-2 standardına göre Elastisite Modülü “Birim şekil değiştirmeye karşılık gelen çekme gerilmesi eğrisinin başlangıç eğimi” olarak tanımlanmıştır. Bir diğer ifade ile elastisite modülü, malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür.

2.3.3 Narinlik

Narinlik, fiber uzunluğunun eşdeğer çapa oranıdır. Bu değer mikro liflerde çok yüksek iken makro liflerde işlenebilir ve aynı zamanda yüksek performans gösterdiği değer aralığı 50-100 dr (Kalpakjian ve Schmid, 2001). Narinlik oranının etkisi ayrıca kritik fiber uzunluğunun da göz önüne alınması ile belirlenmelidir. Çok kısa fiberler betona katıldığında kompozit yapıya yeterli direnci sağlayamadığında özellikle eğilme etkileri altında düşük performans elde edilmesi ile sonuçlanmaktadır. Fiber-matris ara yüzeyinin yeterli düzeyde enerji yutması için kritik fiber uzunluğu dikkatle

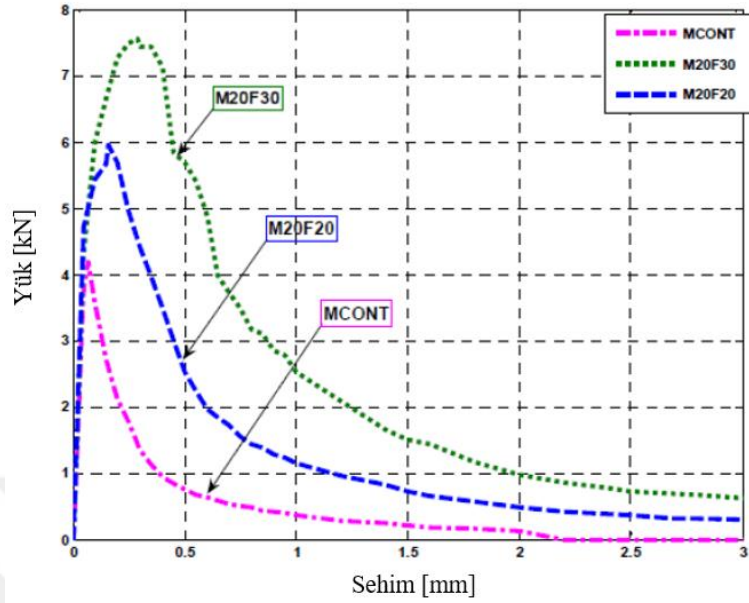
seçilmelidir. Bu uzunluk değeri, fiber en kesit ve yüzey yapısından hareketle belirlenmektedir. Yapılan çalışmada kritik fiber uzunluğunun eşdeğer fiber çapının en az 50 katı olması gerektiği gösterilmiştir. Aynı çalışmada eğilme ve çekme etkileri altında fiber-beton ara yüzey zayıflığını elimine etmek için daha uzun fiber seçimi yapılmıştır.

ACI 544. Komite (2018) raporuna göre daha yüksek narinlik oranı ile fiberlerin daha etkin çalıştığı ve özellikle betonun çatlamasından sonraki yük taşıma yeteneğinin artırıldığı söylenebilir. Bu durum fiberlerin beton içinden sıyrılma performansı ile doğrudan ilişkilendirilmiştir. Raporda, önceki çalışmalarda vurgulanan fiberli betonun işlenebilirlik özelliklerine de vurgu yapılmıştır. Özellikle yüzey karakteristiklerine de bağlı olarak fiberlerin kenetlenmesi ve yumak haline gelmesi durumu, diğer bir ifade ile homojen dağılmamasına değinilmiştir. Narinlik oranının yukarı belirtilen aralığın üzerine çıkması kenetlenme riskini artırmaktadır. Bu sebeple bazı ticari ürünlerde fiberler dağınık halde değil dışında suda çözünen bir polimer sargı ile demet haline getirilmesi ile topaklanma riskleri en aza getirilmektedir. Bazı ticari ürünlerde ise narinlik oranını artırmadan fiberlerin betondan sıyrılmasını önlemek için fiberlerin uç yapıları veya yüzeyleri pürüzlendirilmekte ya da özel şekiller verilmektedir.

Hameed ve diğ. (2009) yaptıkları çalışmada fiberlerin narinlik oranının yük taşıma performansına etkisine odaklanmıştır. Deneysel çalışmada değerlendirme kriteri olarak fiberli betonun yük taşıma kapasitesine ve çatlak sonrası davranışın nasıl değiştiğine odaklanılmışlardır. Metalik fiberlerin kullanıldığı çalışmada 20 mm ve 30 mm uzunluğunda ve sırası ile 105 ve 125 narinlik oranına sahip fiberler bu deneysel çalışmada, aynı miktarda kullanıldığında (20 kg/m^3 – hacimsel oran ile %0,25) prizma numunelerin sonuçları iyileşmiştir.

Şekil 2.9’da görülebileceği üzere yalın beton düşük kırılma yüküne sahip iken fiberli beton narinlik oranının artması ile hem fiberli betonun ulaştığı en büyük kırılma yükü hem de çatlak sonrasındaki davranışı iyileşmiştir. En büyük narinlik oranına sahip fiberde taşınabilen en yüksek yük kapasitesi sağlanmış iken bu değer yalın betona göre %80 fazla; narinlik oranı daha düşük fibere göre ise de %30 mertebesinde fazladır (Hameed ve diğ, 2009). Çelik fiberlerin elastisite modüllerinin ve uzama miktarlarının betondan fazla olmasından dolayı yalın betonun kırılma yükünün de arttığı

görülebiliyorken, sentetik fiberlerden beklenen katkı tepe yükünün artırılması değil, sadece çatlak sonrası davranışın iyileştirilmesidir.



Şekil 2.9 : Yük sehim eğrilerinin karşılaştırılması (Hameed ve diğ, 2009).

2.3.4 Tokluk

Yukarıda belirtilen farklı uygulamalara yönelik proje isterlerini karşılamak amacıyla lif narinlikleri ve dozajları kullanılmaktadır. Benzer şekilde farklı hammaddeler ile bu yükler farklı dozajlarla karşılanabilmektedir. Örnek olarak zemin destekli bir saha betonu 3 kg/m^3 sentetik fiberle tasarlanabilirken metalik fiberlerle bu miktar 15 kg/m^3 olarak seçilmektedir. Tüm bu karşılaştırmalar, uygulamalara özel testlerle ölçülebilmektedir. Moment taşıma kapasitesinin bir ölçüsü kabul edilen bu testler aşağıda listelenmektedir.

- ASTM C1018: Fiber takviyeli betonun eğilme tokluğu ve ilk çatlak mukavemeti için standart test yöntemi (üç nokta yüklemeli kiriş kullanılarak). Standart uygulama dışında bırakılmıştır. Yerini ASTM C1609 almıştır.
- ASTM C 293: Betonun eğilme dayanımı için standart test yöntemi. Test merkez nokta yüklemeli basit kiriş kullanarak yapılmaktadır.
- ASTM C1550: Fiber takviyeli betonun eğilme tokluğu için standart test yöntemi. Test, merkezi yüklü yuvarlak panel kullanılarak yapılmaktadır.
- EN 14488-5: Püskürtülmüş betonun test edilmesi yöntemi. Fiber takviyeli panel numunelerinin enerji yutma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla uygulanmaktadır.

- EN 14651: Metalik lifli beton için test yöntemi. Eğilme çekme mukavemetinin ölçülmesi amacıyla tercih edilmektedir.
- NBN B 15-238: Fiberle güçlendirilmiş beton üzerinde testler. Prizmatik numunelerde eğilme testi olarak da adlandırılmaktadır.

Fiberli betonun eğilme etkisi altında tokluk (enerji absorplama) değerinin belirlenmesi için yukarıda belirtilen Amerikan standartları ve Avrupa standartları kullanılıyorken bu testlerin tamamında prizma şeklinde numuneler hazırlanmaktadır. Çoğunlukla kiriş numuneler kullanılsa da püskürtme betonlar için plak numuneler alınmakta olup ilgili Amerikan standardı ASTM C1550, Avrupa standardı EN 14488-5'dir. Bu standarda göre numuneler sahada veya laboratuvar ortamında hazırlanabilmektedir. Bahsi geçen iki test arasında denklem 2.1'de gösterildiği gibi yaklaşık olarak;

$$\text{Tokluk değeri}_{(\text{ASTM C1550})} * 2,5 = \text{Tokluk değeri}_{(\text{EN 14488-5})} \quad (2.1)$$

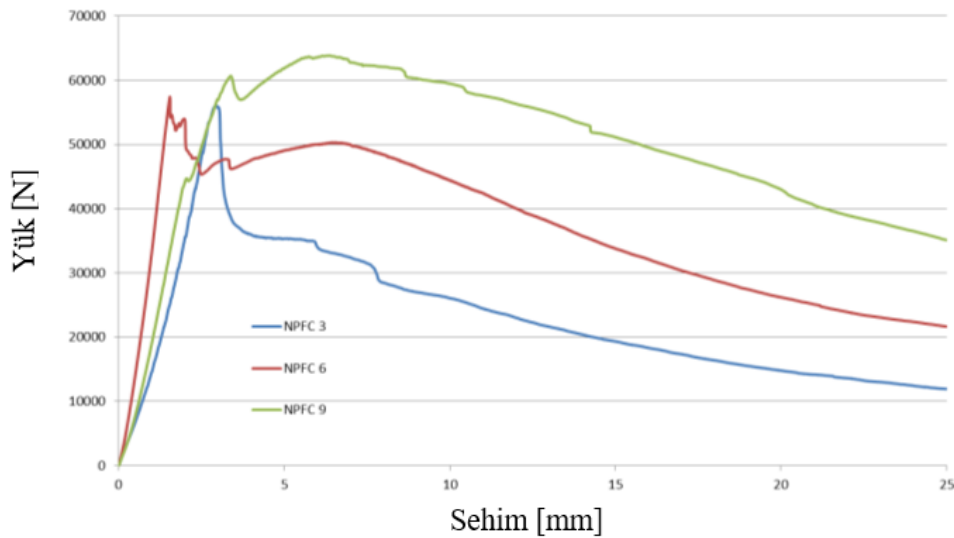
ilişkisi bulunmaktadır. Kiriş numuneleri üzerinde de karşılaştırma ve ilişkilendirme çalışmaları yapılmış fiberlerin saha sonuçlarının daha doğru sonuçlarının panel numuneleri ile alınabileceği gösterilmiştir (Xu ve diğ, 2004).

Sentetik liflerin püskürme beton yöntemi ile transferini madencilik uygulamalarında kullanılabileceği, kayaç sınıflarına göre değişen dozajlarda yeterli performans sağladığı ve 6 kg/m³ dozajda kullanıldığı durumda kayaçların çalışma sahasına düşmesinin önlenildiği gösterilmiştir. Aynı çalışmada EN 14488-5 ve ASTM C1550 test yöntemleri arasında bir korelasyon kurulabileceği, dolayısı ile aynı karışıma sahip lifli betonların denk bir değerlendirmeden geçebildiği vurgulanmıştır (Monteiro ve Andrade, 2021).

Fiberli betonların eğilme dayanımları (eğilme testinde elde edilen en yüksek dayanım değeri) fiber miktarı ve fiberlerin betonla kurduğu bağ kuvveti ile doğrudan ilişkilidir. Daha uzun fiberlerin, diğer bir ifade ile daha yüksek narinlik oranına sahip fiberlerin dayanım artışının sağlaması için önemli olduğu gösterilmiştir (Bothma, 2013). Dayanım artırmak için gerekli ideal bir uygulamada hem fibere ait mekanik özelliklerin yüksek olması hem de uzun fiber kullanılması böylelikle optimum fiber dozajının sağlanması mümkündür. Düşük miktarda fiber içeren beton karışımlarında dikkate değer bir eğilme dayanımı artışı sağlanamamaktadır. Sentetik fiberle yapılan karışımlarda dayanım artışı için 40 mm uzunluğunda en az %1 hacimsel oranda bir

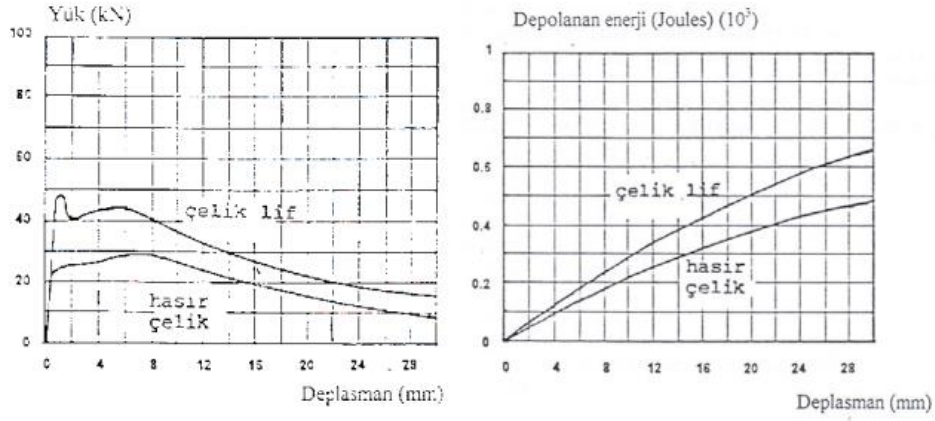
dozaj gerektiği gösterilmiştir. Alhozaimy ve diğ. (1995) polipropilen sentetik fiberi ile %0,1 ve %0,3 sentetik fiber kullandığında eğilme altındaki tokluk artışını yalın betona göre sırası ile 44% ve 386% oranında raporlamıştır.

Şekil 2.10’da lif miktarı ile fiberli betondaki eğilme testi sonucunda elde edilen iyileşme görülmektedir. Değişim özellikler çatlak sonrasında davranışın modifiye edilmesi olarak da belirtilebilir. Beton içerisinde 3 kg/m³ (%0,33 hacimsel oran), 6 kg/m³ (%0,67 hacimsel oran), 9 kg/m³ (%1 hacimsel oran) fiber kullandığında benzer kırılma yüklerine sahip olduğu görülmüş, kırıldıktan sonra sırası ile mavi, kırmızı ve yeşil renkler ile devam eden davranışları vurgulanmıştır. Fiber oranının %1’den az miktarda kullanıldığında betonun kırılma yükünden sonra şekil değiştirme yumuşaması görülmüyorken sadece %1 hacimsel oranda fiber kullanıldığında betonun kırılma yükü aşılabilmektedir (Öztürk, 2018).



Şekil 2.10 : Kare panellerin yük – deplasman eğrisi.

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2013 yılında yayınlanan Teknik Şartnamesine göre “Tokluk, lifli betonun çekme gerilmeleri sonucu çatladıktan sonra da yük taşımaya devam etme yeteneğidir. Fiberli betonun en önemli özelliği olan “tokluk” ya plaka testi sonucunda betonun enerji depolama kapasitesi ile ya da kirişin eğilmede – çekme testi sonucunda betonun arta kalan dayanımı” olarak tanımlanır. Söz konusu gösterim Şekil 2.11’de yer almaktadır.



Şekil 2.11 : KTŞ yük deformasyon – enerji deformasyon eğrileri.

2.4 Sentetik Fiber Donatılı Püskürtme Betonun Tokluk Sınıfının Belirlenmesi ile Alakalı Standartlar

2.4.1 EN 14889-2 polimer lifler – tarifler, özellikler ve uygunluk

Standart, harç ve enjeksiyonda yük taşıyıcı olan veya taşıyıcı olmayan polimer liflerin kullanımına yönelik gerekleri kapsamaktadır. Polimer lifler, fiziksel durumlarına göre Çizelge 2.2’de yer aldığı haliyle üç sınıfa ayrılmaktadır.

Çizelge 2.2 : Polimer lif sınıflandırması.

Sınıf	Tanım	Çap
Ia	Mikro Lifler	< 0,30 mm çapında, tekil lifli
Ib	Mikro Lifler	< 0,30 mm çapında, lifli
II	Makro Lifler	> 0,30 mm çapında

Polimer fiberler düzgün veya çentikli olabilir. Fiber boyutlarında, makro sınıfı için ortalama $\pm 5\%$, mikro sınıfı için ise $\pm 1,5$ mm tolerans bulunmaktadır.

Çekme dayanımı ve elastisite modülü mutlaka belirlenmelidir. Farklı 30 fiberin teste tabi tutulması, ortalama ve standart sapma hesaplamalarında tüm sonuçlara yer verilmesi gerekmektedir. Her bir değer için %15 ve ortalama değer için %7,5 tolerans değeri bulunmaktadır.

Beton dayanımına etkisi incelenirken, 0,5 mm’de CMOD (0,47 mm merkez sehime eşdeğer) arta kalan eğilme dayanımının 1,5 MPa olması ve 3,5 mm’de CMOD (3,02 mm merkez sehime eşdeğer) arta kalan eğilme dayanımının 1 MPa olması gerekmektedir. Fiberlerin birim hacmi (kg/m^3) imalatçı tarafından belirtilmelidir. Bahsi geçen değerler sınır değerler olup CE belgesi alımı esnasında aranmaktadır.

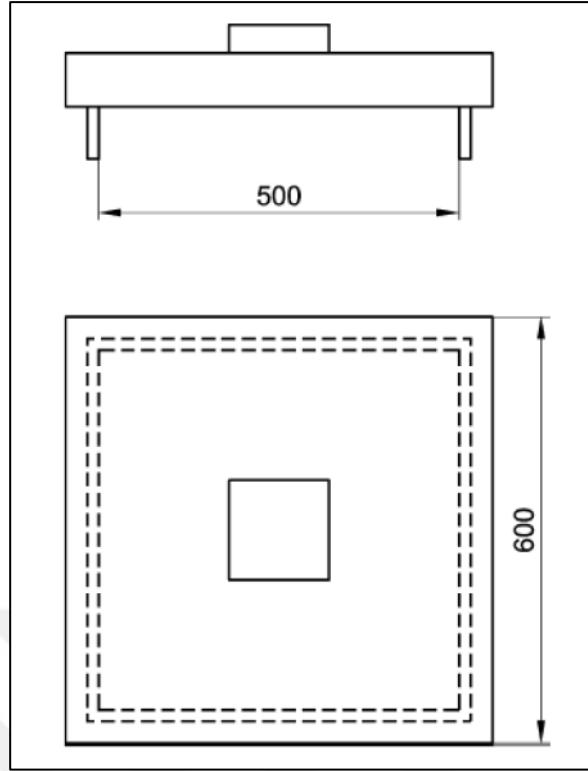
2.4.2 EN 14488-1 taze ve sertleşmiş betondan numune alma

Standart, taze ve sertleşmiş (priz öncesi veya sonrası) püskürtme betondan numune alınması için bir yöntem sunmaktadır. Taze numuneler, hazırlanan karışımdan, uygulama alanındaki karışımdan yahut deney panelinden alınabilir. Sertleşmiş numuneler uygulama alanındaki malzemeden veya bir deney panelinden kesilebilir. Püskürtme uygulamasının neticesi olarak farklı konumlardaki numunelerin farklı özelliklere sahip olabileceğine dikkat edilmelidir. Kalite kontrol amacına ve numunelerin ölçülebilecek özelliklerine bağlı olarak en uygun numune tipi ve konumu belirlenmelidir.

Taze numune alımı esnasında, homojen hale getirilmiş ve EN 12350-1'e uygun olarak karışım tavaşından yahut püskürtme betondan elde edilen numune grubu seçilmelidir. Yerinde püskürtme beton numunesi alınırken kalıp düşey ile 20° olacak şekilde konumlandırılmalı (baş üstü gibi, başka bir yön belirtilmedikçe) ve beton gerçek çalışmadaki gibi aynı donanım, teknik, her bir döküm için tabaka kalınlığı ve uygulama mesafesi ile püskürtülmeli, operatörde aynı olmalıdır. Panel, inşaat çalışmalarında olduğu gibi aynı yöntemi kullanarak nem kaybına karşın hemen korunmalıdır. Numuneler daha sonraki tanımlamalar için (karışım, konum, tarih ve operatör) işaretlenmelidir. Panel, püskürtülmesini takiben, beton dayanımını alana kadar, 18 saat boyunca hareket ettirilmemelidir. Şantiye koşulları sağlanarak en az 7 gün boyunca veya numuneler alınana kadar kürlenme işlemine devam edilmelidir.

2.4.3 EN 14488-5 lif takviyeli plaka numunelerde enerji yutma kapasitesinin tayini

Bu standart, enerji yutma kapasitesinin hesaplanması amacıyla, belirlenen sehime kadar yük uygulanan plaka şeklinde bir numunenin yük/sehim eğrisinin tayini için uygulanacak bir yöntemi kapsar. EN 14488-1'e uygun olarak püskürtme işlemi uygulanan fiber takviyeli bir plaka numuneye, Şekil 2.12'de görüldüğü gibi plaka merkezine yerleştirilmiş rijit çelik blok vasıtasıyla sehim kontrollü yük uygulanır. Yük – sehim eğrisi kaydedilir ve plaka merkezinde en az 30 mm'lik bir sehim elde edilene kadar deneye devam edilir. Yük – sehim eğrisinden, plakadaki sehimin fonksiyonu olarak yutulan enerjiyi verecek şekilde ikinci bir eğri hesaplanır.



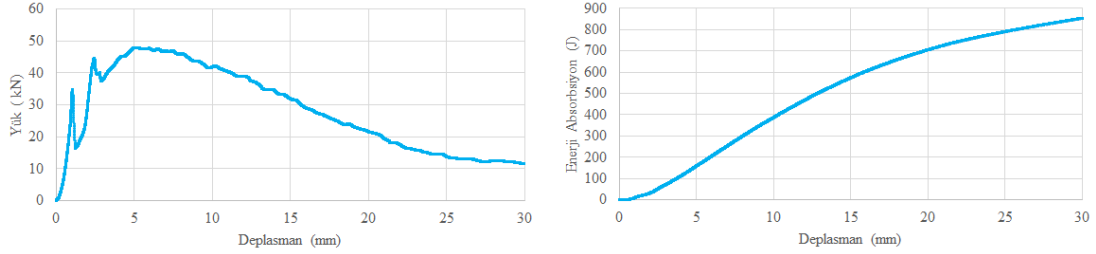
Şekil 2.12 : EN 14488-5 test düzeneği.

Yük uygulama cihazı harç ve alçı ile desteklenecek şekilde 20 ± 1 mm kalınlığında rijit kare mesnete ve plakayı destekleyen 500 ± 2 mm x 500 ± 2 mm iç boyuta sahip bir çerçeveye, 100 ± 1 mm x 100 ± 1 mm temas yüzeyine ve 20 ± 1 mm kalınlığa sahip plaka üst yüzeyi merkezine yerleştirilen rijit çelik kare yükleme bloğuna sahip olmalıdır. Öte yandan numune ile yükleme bloğu ve kare mesnet arasında kullanılacak uygun rijit bir yataklama malzemesi kullanılmalıdır.

EN 14488-1'e uygun bir kalıp içine püskürtülen ve kür işlemine tabi tutulan bir 600 mm x 600 mm boyutlara sahip panelden ve püskürtme işleminden hemen sonra tıraşlanmış 100_0^{+5} mm kalınlığa sahip kare yüzeyli bir numune oluşturulmalıdır. Hazırlanan plaka, deneyden en az üç gün öncesine kadar EN 12390-2'ye uygun koşullar altında kür işlemine tabi tutulmalı ve deney anına kadar nemli tutulmalıdır. Deney normalde 28. günde gerçekleştirilmelidir.

Yük, deney esnasında plakanın kalıptan çıkan düzgün yüzeyi alt kısma gelecek şekilde, püskürtme işleminin yapıldığı üst yüzeye uygulanmalıdır. Deney makinesi, plaka numunenin merkezi üzerinde $(1 \pm 0,1)$ mm/dak'lık sabit yükleme hızını sağlayacak şekilde deformasyon kontrollü olmalıdır. Deney, merkezdeki sehimin 30 mm'yi aşması durumunda tamamlanmalıdır. Yük ve sehim, en az 30 mm'lik bir sehim

elde edilene kadar Şekil 2.13'te gösterildiği gibi veri toplayıcı veya XY yazıcı ile sürekli kaydedilmelidir. Yük-deplasman eğrisi altında kalan alan, fiberli betonun tokluk (enerji absorpsiyon) değerini oluşturmaktadır.



Şekil 2.13 : Yük sehimi – enerji sehimi eğrileri.

2.4.4 EN 14488-7 lifle güçlendirilmiş betonun lif içeriği

Standart, taze veya sertleşmiş (örneğin, priz öncesi veya sonrası) püskürtme betonun lif içeriğinin tayini için bir yöntem sağlar. Çelik fiberler için, her iki püskürtme beton tipine uygulanabilirken polimer fiberler için, sadece taze numune yönteminde kullanımı uygundur.

Taze beton numuneler, yerindeki malzeme veya deney panelindeki temel karışımdan alınabilir. Sertleşmiş numuneler, yerindeki malzeme veya deney panelinden kesilerek alınabilir. Püskürtme işlemi nedeniyle, her bir konumdaki lif içeriğinin farklı olabileceği dikkate alınmalıdır. Kalite kontrol amacına ve şartnameye uygunluğuna bağlı olarak, en uygun numune tipi ve konumu belirlenmelidir. Sertleşmiş numuneler için deney, yapıdan alındığı gibi (tabii), doymun ve etüv kurusu rutubet durumları için gerçekleştirilebilir.

Sertleşmiş püskürtme beton numunesi alımı esnasında yerindeki malzemeden veya deney panelinden EN 14488-1 ve EN 12504-1 gereklerine uygun olarak üç karot numunesi kesilmelidir. Karot çapı, 50 mm ila 100 mm arasında ve karot uzunluğu 75 mm ila 150 mm (tabaka kalınlığının 75 mm'den az olduğu durumda, karot uzunluğu, tabaka kalınlığına eşit olmalıdır) arasında olmalıdır. Her bir karot hacmi (vd), hesaplama veya EN 12390-7'de verilen su içerisinde tartılma yöntemine göre belirlenmelidir. Sertleşmiş beton yoğunluğu, EN 12350-6'ya uygun olarak da belirlenebilir. Tüm liflerin betondan ayrılabilmesi amacıyla beton karot numune, beton basınç dayanımını belirlemek için kullanılan deney makinesi veya diğer uygun cihazlarla ezilerek parçalanmalıdır. Manyetik özelliğe sahip lifler, mıknatıs kullanılarak kolayca çıkarılabilir. Çıplak gözle kolayca görülebilen artık herhangi bir

çimento bağlayıcısından arındırılması amacıyla lifler, mekanik olarak temizlemeli ve daha sonra en yakın 0,1 g ondalık değerine yuvarlatılacak şekilde tartılmalıdır.

Taze püskürtme beton numunesi alımı esnasında yerindeki malzemeden veya deney panelinden mala ve benzer aparatlarla üç karot numunesi kesilerek alınmalıdır. Geriye kalan malzemenin dışında kalan lifler numuneden ayrılmamalı ve numuneye eklenmelidir. Mümkün olması durumunda her numune, püskürtme beton tabakası veya panelinin tam derinliği kadar kesilen tek parça püskürtme betondan oluşmalıdır. Daha sonraki numunelerde, derinlik boyunca lif içeriğindeki herhangi bir farklılık dikkate alınarak temsili numune elde edilmesi sağlanmalıdır. Her bir numune ağırlığı 1 kg ile 2 kg arasında olmalıdır. Her bir numunenin hacmi (V_d), EN 12350-6'da verilen su içindeki kütle ile belirlenmelidir. Her numune kütlesi havada tartılmalı daha sonra su içerisine batırılmalıdır. Daha sonra numunenin ıslak yoğunluğu ve hacmi hesaplanmalıdır. Ölçümlerin beton nihai prizini tamamlamadan önce gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Lifler, püskürtme beton numuneden yıkama yoluyla ayrıştırılmalıdır. Püskürtme beton, çimento ve diğer ince malzemelerin yıkanmasıyla liflerin kütleden ayrıştırılabildiği bir elek veya filtreleme donanımına konulmalıdır. Sentetik liflerle birlikte numune, alkolle ıslatılır ve lifler yüzeye çıkana kadar karıştırılır. Lifler temizlenmeli, kurulanmalı ve daha sonra çelik lifler için en yakın 0,1 g'a, polimer lifler için 0,01 g'a yuvarlatılarak tartılmalıdır. Lif içeriği kg/m^3 biriminde aşağıdaki denklem 2.2 kullanılarak hesaplanır.

$$C_f = \frac{m_f * 1000}{V_d} \quad (2.2)$$

Burada;

C_f : Lif içeriği, kg/m^3 ,

m_f : Numuneden çıkartılan lif kütlesi, g,

V_d : Numune hacmi, m^3 'dür.

2.4.5 EN 14651 metal lifli beton eğilmede çekme dayanımının tayini

Bu test standardı, sentetik ve çelik fiberlerin betondaki performansının en sık ölçüldüğü test standartlarındandır. Test çıktısı f_{t1} , f_{t2} , f_{t3} ve f_{t4} olarak kaydedilir. Bu değerler sırası ile eğilme testinde lifli numunenin 0,5 mm deplasman yaptığı andaki

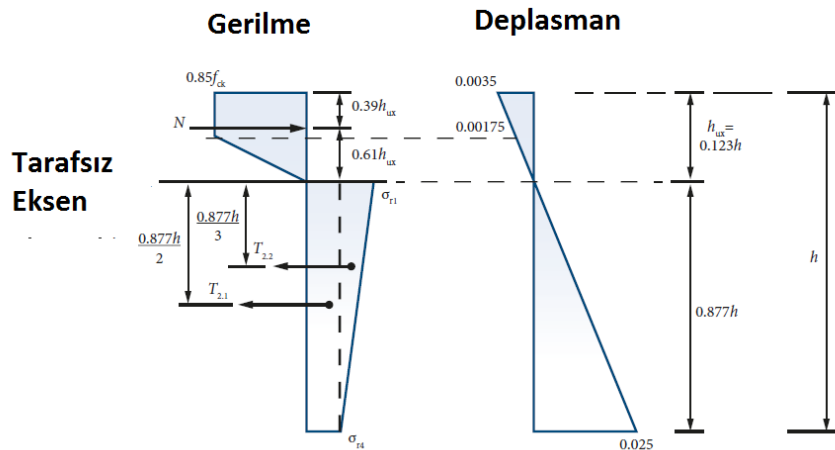
taşıdığı gerilme değeri, MPa; eğilme testinde lifli numunenin 1,5 mm deplasman yaptığı andaki taşıdığı gerilme değeri, MPa; eğilme testinde lifli numunenin 2,5 mm deplasman yaptığı andaki taşıdığı gerilme değeri, MPa; eğilme testinde lifli numunenin 3,5 mm deplasman yaptığı andaki taşıdığı gerilme değeri, MPa olarak belirtilebilir. Bu gerilme değerleri kesit analizlerinde “Technical Report 34”, “Rilem Tc 162-Tdf” gibi uluslararası tasarım rehberlerinde moment kapasitesinin hesabında yer alan f_{r1} ve f_{r4} değerleri lifli betonların moment kapasitesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Sentetik lifler ile kesit tasarımı uluslararası tasarım rehberlerinden “Rilem Tc 162-Tdf”de belirtildiği üzere ortalama eksenel çekme dayanımı birden fazla deplasman için dikkate alınmalıdır. Buna göre lifli betonların eğilme altındaki davranışına bakıldığında sadece bir deplasmandaki taşınan en büyük gerilme dikkate alınması hata payını artıracağından σ_{r1} ve σ_{r4} ile gösterilen gerilme değerleri sırası ile çatlak ağzı açılma deplasmanı (CMOD) değerinin 0,5 mm ve 3,5 mm olduğu anlarda belirlendikten sonra hesaba denklem 2.3 ve 2.4 ile dahil edilir.

$$\sigma_{r1} = 0,45 * f_{R1} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{r4} = 0,37 * f_{R4} \quad (2.4)$$

Taşıma gücü sınır durumunda gerilme bloğu σ_{r1} σ_{r4} gerilmeleri arasında üçgen biçiminde bir dağılım olduğu, ayrıca σ_{r4} gerilmesinin de $\varepsilon=0,025$ uzamasında meydana geldiği kabul edilir. Söz konusu gerilme deplasman durumu Şekil 2.14’te gösterilmektedir.



Şekil 2.14 : Lifle güçlendirilmiş beton gerilme blokları.

Kesitte meydana gelen basınç ve çekme kuvvetleri dengesinde;

$$N = T_{2,1} + T_{2,2} \quad (2.5)$$

kesitte taranmış alanlarda;

$$N = 0,078 h * f_{ck} \quad (2.6)$$

ve takiben

$$T_{2,1} = 0,88h * \sigma_{r4} \quad (2.7)$$

$$T_{2,2} = 0,44h * (\sigma_{r1} - \sigma_{r4}) \quad (2.8)$$

denklemleri yazılabilir. Şekil 2.14'te basınç bloğunun ağırlık merkezinden geçen bileşke kuvvete (N) göre moment alındığında;

$$M_u = \frac{T_{2,1}(0,877h + 0,075h) + T_{2,2}(0,877h + 0,075h)}{\gamma_{2,2}} \quad (2.9)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 2.7 ve denklem 2.8, denklem 2.9'da yerlerine konduğunda taşıma gücü sınır koşuluna göre lifli beton kesitine ait en büyük moment değeri elde edilir. Bu moment değeri denklem 2.10'da gösterilmektedir.

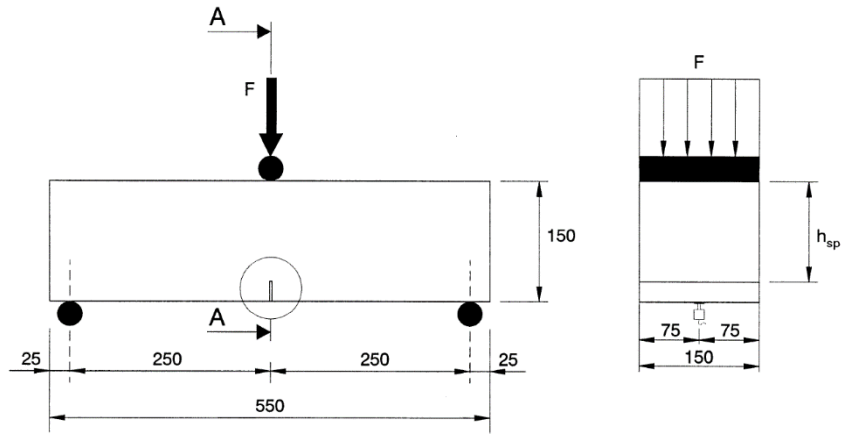
$$M_u = \frac{h^2 * (0,29 \sigma_{r4} + 0,16 \sigma_{r1})}{\gamma_m} \quad (2.10)$$

Hesaplama yöntemi dışında yapılan test yöntemine göz atılırsa, fiber takviyeli olarak tasarlanmış beton numuneleri Şekil 2.15'te gösterildiği gibi 150 mm yüksekliğinde ve 150 mm genişliğinde ve 550 mm veya 600 mm uzunlukta geometriye sahip (test standardında belirtilen ölçüler) prizma kalıplara yerleştirilmektedir. 28 gün kürlenme işlemine tabi tutulan numuneler daha sonra teste tabi tutulmaktadır.



Şekil 2.15 : Fiberli betonların numune kalıplarına alınması.

Şekil 2.16’da gösterilen düzenek ile gerçekleştirilen test esnasında alt noktada yer alan iki mesnet numuneyi dengelemekte, üst noktadan gelen yük ise numuneyi deforme etmektedir. Deneye başlamadan üç gün önce genişliği 5 mm, h_{sp} mesafesi $125 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ olacak şekilde çentik açılmalıdır.



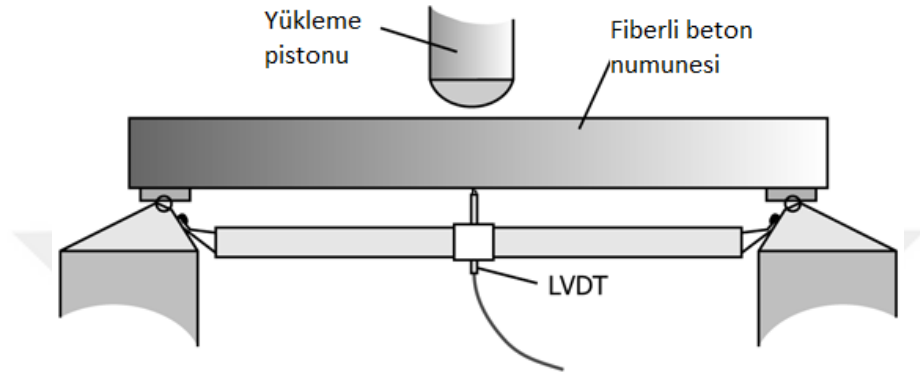
Şekil 2.16 : EN 14651 eğilme testi, numune boyutları, yükleme ve mesnet koşulları.

2.4.6 ASTM C1550 fiber takviyeli betonun eğilme tokluğu

Avrupa’da tercih edilmekte olan EN 14488-5 standardına benzer bir yöntem olan ASTM C1550 Amerikan test standardı, fiberli betonların püskürtülerek uygulanması sonrası performans ölçümü için kullanılan yöntemdir. Mesnetlerin üç noktadan desteklediği ve alt mesnetler haricinde üst noktasından da yükleme yapılan test

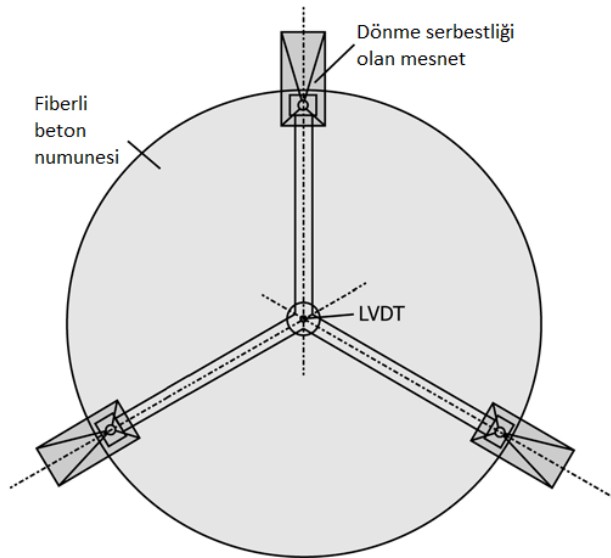
metodunda numunelerin deplasman değeri alt kısma yerleştirilen LVDT vasıtası ile ölçümlenir.

Avrupa standardından farklı olarak numuneler Şekil 2.17’de yer aldığı gibi çapı 800 mm olacak şekilde daha geniş ancak kalınlığı 75 mm olacak şekilde daha incedir. Numuneler de kare değil yuvarlak biçimdedir. Numune altındaki mesnetler dönmeye karşı serbest kabiliyette olmalı, sadece yük aktarmalı, moment aktarmamalıdır.



Şekil 2.17 : ASTM C1550 yuvarlak panel eğilme testi, yükleme ve mesnet koşulları.

Avrupa standardındaki gibi mesnetler tüm çevre boyunca numuneye temas etmemekte, sadece Şekil 2.18’de gösterildiği gibi 3 noktadan temas etmektedir. Yükleme pistonu vasıtasıyla yük yuvarlak biçimli panelin tam orta noktasına uygulanmaktadır.



Şekil 2.18 : Fiberli beton numunesi ve test düzeneği plan görüntüsü.

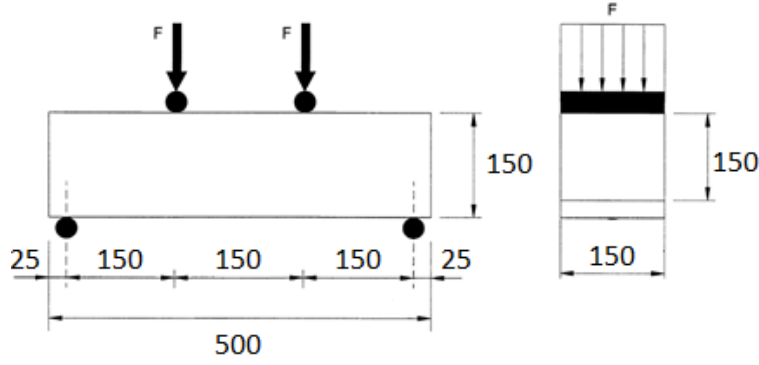
Numuneler, uygulama alanından kürlenme işlemine tabi tutulacağı alana götürülmek üzere dikkatle hareket ettirilmeli, mümkün ise şekil 2.19’da gösterildiği gibi yuvarlanarak ve yavaşça taşınmalıdır. Her ne kadar priz hızlandırıcılar ile püskürtme betonların dayanım kazanma süreleri kısalsa da erken yaşlarında kontrolsüz yüklemeye (taşırken numuneleri sarsma, düşürme, titreşim vb.) maruz kaldığında kesitte kırıklar veya fiber-matris ara yüzeyinde ayrılmalar yaşanabilmektedir.



şekil 2.19 : Püskürtme uygulaması sonrası numunelerin taşınması.

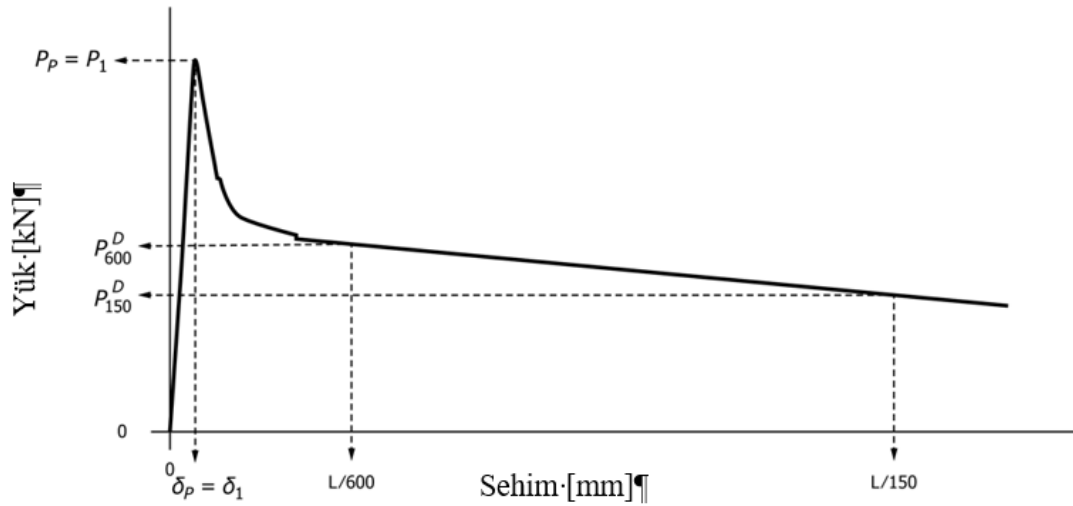
2.4.7 ASTM C1609 fiber takviyeli betonun eğilme performansı

ASTM C1609 test yöntemi Amerikan test yöntemidir ve fiberli betonların yük taşıma performanslarının lldğı, en çok takip edilen test standartlarındandır. Genellikle saha betonları için takip edilse de püskürtme beton numunelerinin testinde de kullanılabilmektedir. Saha ortamında geniş plakalara püskürtülen fiberli betonlardan en az 7 adet 150x150x500 mm ölçülerinde numuneler kesilerek şekil 2.20’de gösterildiği gibi test edilir.



Şekil 2.20 : ASTM C1609 eğilme testi, numune boyutları, yükleme ve mesnet koşulları.

Şekil 2.21’de görüldüğü gibi eğilme performansına sahip olduğu görülen numunelerden elde edilen değerler kayıt edilir. Burada betonun elastik sınırdan sonra kırıldığı yük değeri P_1 kaydedilir ve Şekil 2.20’de mesnet koşulları gösterilen numunenin açıklığı $L=450$ mm değerinin 150 de biri yani 3 mm sehım değerine kadar testin devam etmesi sağlanır ve test sonlandırılır. Tüm eğri altında kalan alan, fiberli betonun tokluk (enerji absorpsiyon) değerini oluşturmaktadır.



Şekil 2.21 : Örnek bir fiber takviyeli beton eğilme testi davranışı ve mühendislik parametreleri.

Test edilen numunelerden elde edilen veriler neticesinde aşağıdaki formül ile performans hesaplanabilir. Denklem 2.11 yardımıyla elde edilen değer boyutsuzdur ve bir oran olarak hesaplanır. Çıkan sonuç örneğin 40 ise fiberli betonun eğilme performansının %40 artırılması anlamına gelmektedir.

$$R_{T,150}^D = \frac{150 \cdot T_{150}^D}{f_1 \cdot b \cdot d^2} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Burada;

$R_{T,150}^D$: Eşdeğer eğilme oranı,

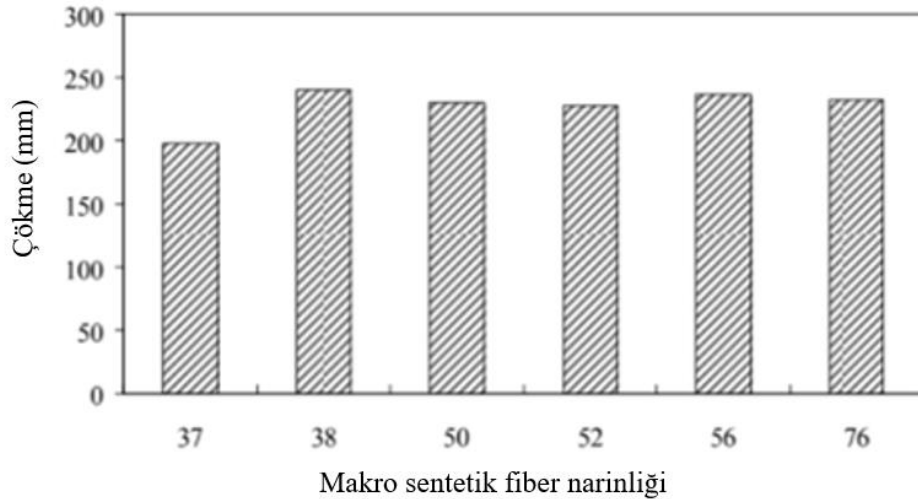
T_{150}^D : Mesnet açıklığının 150’de biri oranı sehim miktarına kadar yutulan enerji,

f_1 : Betonun kırılma yükü,

b, d : Numune en kesiti, sırası ile genişlik ve yüksekliktir.

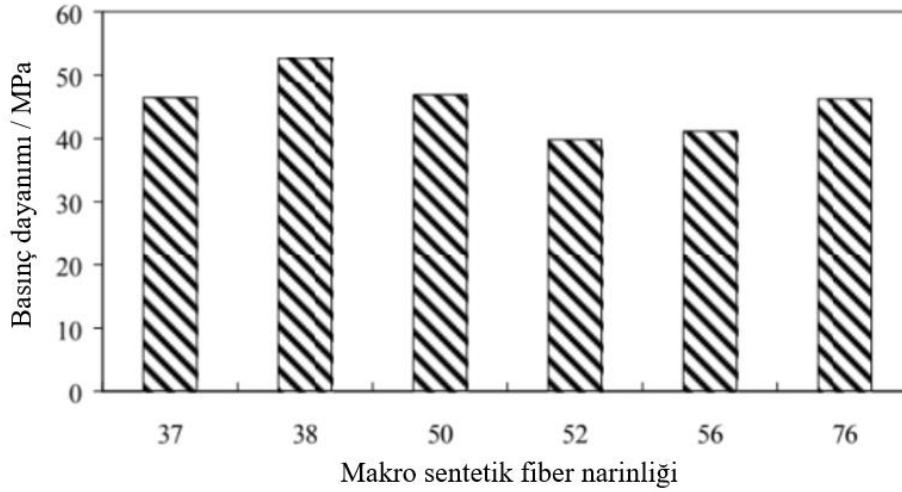
2.5 Değerlendirme

Sentetik fiber donatıların uzunluk ve çap değerlerinin takip edildiği çok sayıda akademik çalışma yer almamaktadır. Buna istinaden ulaşılan veriler değerlendirildiğinde Anshuang ve Yuebo’nun (2013) yayınladığı çalışmada C30 beton sınıfında fiber takviyeli püskürtme betonun işlenebilirliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluğu üzerine çeşitli en-boy oranlarına sahip makro polipropilen fiberlerin etkisi, incelenmiştir. Farklı narinlik değerlerine sahip fiber donatıların çökme sonuçları Şekil 2.22’de verilmektedir.



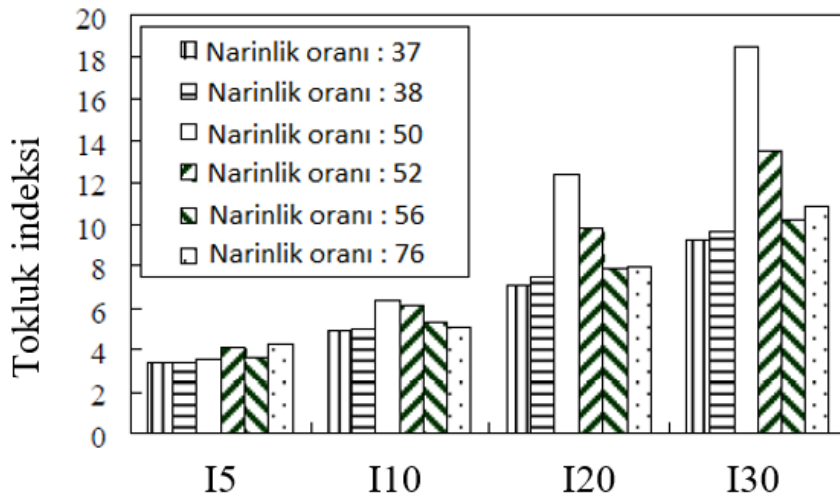
Şekil 2.22 : Farklı narinlik oranlarına sahip fiberlerin çökme değerleri.

Şekil 2.23, fiber donatılı püskürtme beton için makro fiberlerin en boy oranına karşı basınç dayanımı diyagramını göstermektedir. En boy oranı 37 ila 76 aralığındayken, basınç dayanımı 39.8 MPa'dan 52.7 MPa'a değişti, bu da en boy oranının fiber donatılı püskürtme beton basınç dayanımını bir dereceye kadar etkilediğini göstermektedir.



Şekil 2.23 : Farklı narinlik oranlarına sahip fiberlerin basınç dayanım değerleri.

Şekil 2.24’te yer alan eğilme tokluğu grafiği incelendiğinde, makro sentetik elyaflarla karıştırılmış fiber donatılı püskürtme betonun eğilme tokluğu üzerindeki en-boy oranının etkisi görülmektedir. Sonuçlar, liflerin en boy oranının fiber donatılı püskürtme betonun eğilme tokluğu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. En-boy oranının artmasıyla, eğilme tokluğu başlangıçta artan ve sonra azalan gözle görülür bir eğilim sergilemektedir. 50 en-boy oranına sahip fiberlerle güçlendirilmiş püskürtme beton, diğer püskürtme beton serilerine göre çok daha yüksek eğilme tokluğu sergilemiştir. 0,05 mm/dak, 0,10 mm/dak, 0,20 mm/dak ve 0,30 mm/dak yükleme hızlarında tamamlanan test sonuçları aşağıda yer almaktadır.

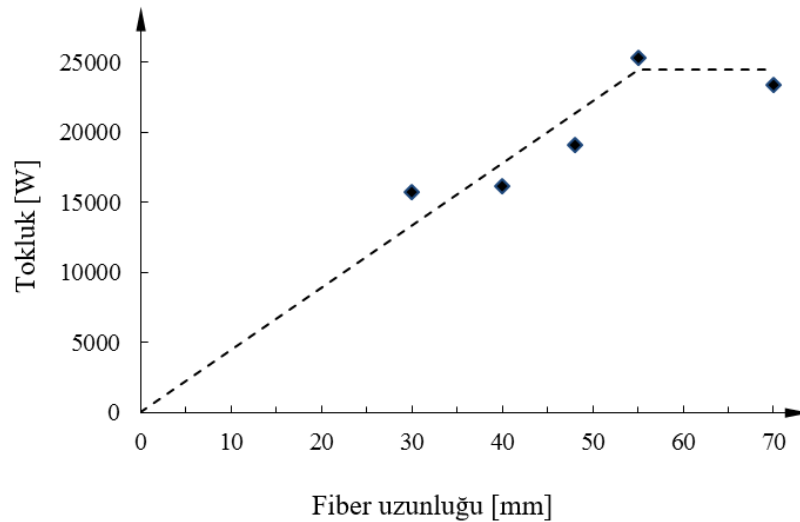


Şekil 2.24 : Eğilme tokluğu – narinlik – yükleme hızı.

Anshuang ve Yuebo’nun (2013) çalışmasının sonuçları değerlendirildiğinde 37 ila 76 aralığındaki en boy oranının çökme üzerinde görünür bir etki sergileyemediği

görülmüştür. Öte yandan en-boy oranının artmasıyla basınç dayanımı ve tokluk başlangıçta artmış, daha sonra azalmıştır. En boy oranı 50 olan makro sentetik lifler, fiber donatılı püskürtme beton üzerinde optimal güçlendirme ve sertleştirme etkisi sergilemiştir. Ancak tokluk testinin ASTM C1609 standardına göre yapılması bir diğer ifadeyle numunelerin prizma şeklinde olması ve elde edilen verilerin enerji absorpsiyon sınıflamasına göre düzenlenememesi, söz konusu çalışmayı bu tezden farklı tutmaktadır. Narinlik oranı ile kompozit özellikleri arasında bir ilişki kurulamamış olması, seçilen makro sentetik polipropilen fiberin, fibrilize yapıda olması sebebi ile narinliğin artmasına bağlı olarak kompozitte matris ile kurduğu bağın azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sebeple fiber yapısına bağlı olarak farklı narinlik oranlarının optimum olacağı sonucuna varılabilir.

Bir diğer çalışmada, K. P. Juhász ve V. Kis (2017) fiberlerin uzunluğu ile fiberli beton kompozit yapıdaki mekanik performansın nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Çelik fiber ve sentetik fiberlerin karşılaştırıldığı bu çalışmada lif uzunluğunun (buna bağlı olarak narinlik oranın) değişimi ile sonuçların iyileşme gösterdiği ancak optimum bir seviyede performansın bir vadiye oturduğu Şekil 2.25'te görülmektedir. Çelik fiberlerde uzunluğun artması ile birlikte sert yapısı sebebi ile boşlukların oluşmaya başladığı ancak sentetik fiberlerin agregalar etrafında bükülebilmelerinden dolayı boşluk oluşturmadığı ve fiberli betonun performansının fiber boyu arttıkça daha az etkilendiği tartışılmış ve narinliğin genel davranışı nasıl değiştirdiği üzerine boyut kazandırılmıştır.



Şekil 2.25 : Fiber uzunluğunun beton üzerindeki etkisi.

Prizma numuneler üzerinde yapılan her iki çalışma ayrı ayrı incelendiğinde, fiber donatı narinlik oranının beton performansına etki ettiği görülmektedir. Öte yandan söz konusu incelemenin püskürtme beton üzerinden yapılması ve narinliğin betonun tokluk indeksine etkisinin incelenmesi bu tez kapsamında ele alınmaktadır.



3. YER ALTI MADENCİLİĞİNDE FİBER DONATI KULLANIMI

3.1 Giriş

Yer altı madenciliğinde fiber donatı kullanımının değerlendirilmesi öncesinde kaya kütlesi kavramının bir bütün olarak ele alınması, kayaç, sağlam kaya ve süreksizliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu birimlerin fiziksel ve mekanik özellikleri birbirinden farklı olması sebebiyle, kütlenin genel davranışını incelenmesi esnasında kayacın Q çizelgesine göre araştırması yapılmalıdır.

3.2 Kaya Kütlesi Sınıflandırma Sistemleri

Kaya sınıflandırma sistemleri oluşturulurken kayanın temelde iki mekanik özelliği ele alınır. Bunlardan ilki basınç dayanımı σ_c iken ikincisi elastisite modülü E_t 'dir. Kaya sınıflandırmalarının amacı kaya kütlelerinin birbirine göre ne kadar sağlam olduklarının, deformasyon özelliklerinin karşılaştırılmasının sağlanabilmesidir (Karpuz ve Hindistan, 2006). Yıllar içerisinde geliştirilen başlıca sınıflandırma sistemleri Çizelge 3.1'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1 : Başlıca sınıflandırma sistemleri.

Sınıflandırma Sistemi Adı	Geliştiren(ler)	Geliştirildiği Ülke	Uygulama Alanları
Kaya yükü	Terzaghi, 1946	A.B.D.	Çelik destekli tüneller
Desteksiz durma süresi	Lauffer, 1958	Avustralya	Tünelcilik
NATM (Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi)	Rabcewicz, 1963	Avustralya	Tünelcilik
RQD	Deere vd., 1967	A.B.D.	Karot loglama, tünelcilik
RSR Wickham vd., 1972	Wickham vd., 1972	A.B.D.	Tünelcilik
RMR	Bieniawski, 1973	Güney Afrika	Tüneller, madenler, şevler, temeller
Q Sistemi	Barton, vd. 1974	Norveç	Tüneller, madenler

3.3 Q Kaya Sınıflaması

Q veya NGI (Norveç Geoteknik Enstitüsü) sistemi olarak adlandırılan sistem, 1970'lerde Barton ve diğ. tarafından tünel tahkimatı için geliştirilmiştir. Kaya tünellilik kalitesi olarak da adlandırılan yaygın adıyla Q sistemi, kayanın birbirinden farklı 6 parametresi aracılığı ile hesaplanmaktadır. Hesaplama, denklem (3.1) bağıntısı ile tanımlanmaktadır (Barton, 1977).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (3.1)$$

Bu denklemde;

RQD : Kaya kalitesi,

J_n : Eklem takım sayısı,

J_r : Eklem pürüzlülük sayısı,

J_a : Eklem alterasyon sayısı,

J_w : Eklem suyu indirgeme sayısı,

SRF: Gerilme indirgeme faktörüdür.

Bu parametreler çiftli olarak literatürde;

$\frac{RQD}{J_n}$: Kaya kütlelerinin yapısı ve birleşme dereceleri,

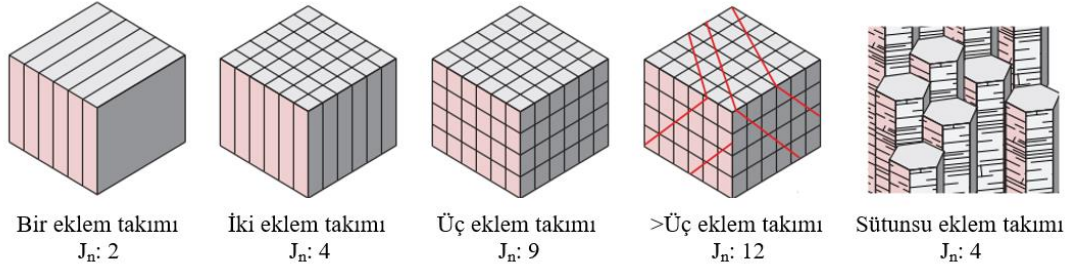
$\frac{J_r}{J_a}$: Süreksizlik yüzeyleri arası ortak sürtünme direnci,

$\frac{J_w}{SRF}$: Aktif gerilme koşulları olarak ifade edilir.

Q değerinin hesaplanması ile kullanılacak destekleme tipleri konusunda öneriler yapılabilmektedir. Bu sistem geçmiş dönemde açılan 1000'i aşkın tünele ait verilerin değerlendirilmesi vesilesiyle geliştirilmiştir. Elde edilen Q değerlerinin aralığı (0.001-1000) çok sıkışabilir zemin koşulundan, eklem yapısı olmayan sağlam kayaya kadar pek çok farklı kaya niteliği tanımlarını kapsar.

Eklem takım sayısı belirlenirken kullanılan J_n parametresi genellikle yapraklanma, şiştözite ve tabakalanma durumlarından etkilenmektedir. Bu koşullardan belirgin ve birbirine paralel şekilde gelişenler bir eklem takımı olarak kabul edilebilmektedir. Ancak, alınan karotlarda çatlakların yer yer olması veya eklem sayısının az olması

durumunda bu eklem yapıları gelişigüzel eklemler olarak değerlendirilmelidir. Eklem desenleri Şekil 3.1’de yer almaktadır. Q sınıflandırma sisteminde eklem takım sayısı (J_n) değeri sınıflandırması Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Eklem desenleri.

Çizelge 3.2 : Eklem takım sayısı (J_n) (Kaya, 2002).

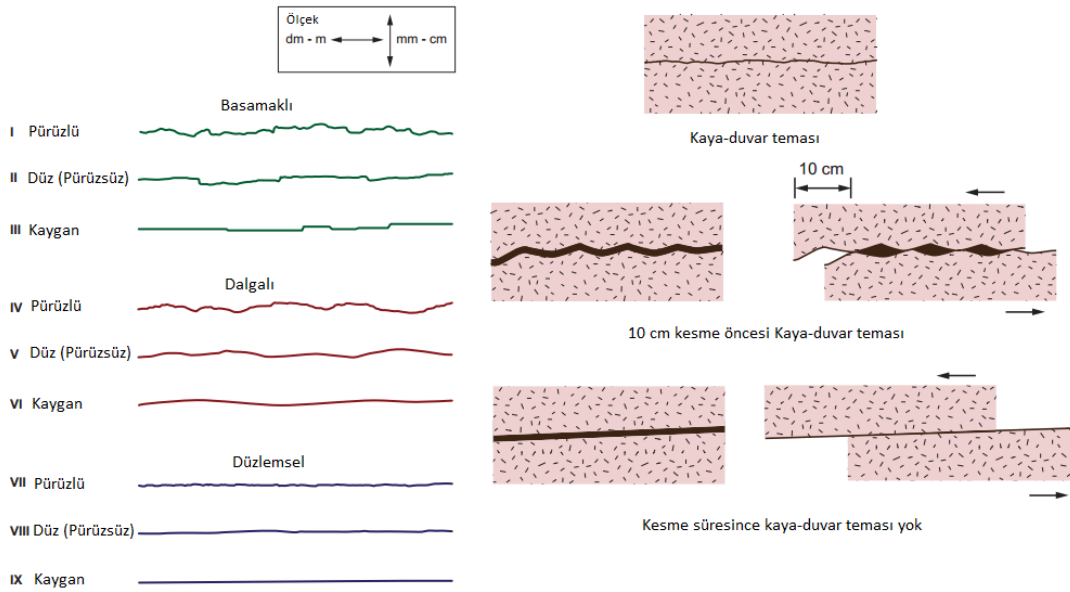
	Tanım	Değerlendirme	Not
A	Masif, eklem çok az veya hiç yok	0,5 - 1	i-Kesişme olan tüneller için $3 \times J_n$ değeri kullanılır.
B	Bir eklem takımı	2	
C	Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	3	
D	İki eklem takımı	4	
E	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	6	ii-Giriş ve çıkış portallarında $2 \times J_n$ kullanılmalıdır.
F	Üç eklem takımı	9	
G	Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	12	
H	Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok sayıda eklemler, küp şeker görünümünde	15	
J	Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20	

Q sınıflandırma sisteminde Eklem Pürüzlülük Sayısı (J_r) değeri sınıflandırması Çizelge 3.3’te verilmiştir. Eklem pürüzlülüğü, eklem yüzeylerinin dalgalı, düzlemsel, pürüzlü veya pürüzsüz olup olmadığına bağlıdır.

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi pürüzlü, pürüzsüz ve kaygan kenarlı terimleri, santimetre veya milimetre ölçeğindeki küçük yapıları ifade eder. Pürüzlülük ancak eklem yüzeyi boyunca bir parmak hareket ettirilerek değerlendirilebilir. Büyük ölçekli pürüzlülük, dm ile m ölçeğinde ölçülür ve büyük ölçekli pürüzlülük yüzeyinin belirlenebilmesi için bağlantı yüzeyine 1 m uzunluğunda bir cetvel yerleştirilerek ölçülür. Kademeli, dalgalı ve düzlemsel terimleri büyük ölçekli pürüzlülük için kullanılır. Büyük ölçekli pürüzlülük, blok boyutuna ve ayrıca olası kayma yönüne göre dikkate alınmalıdır.

Çizelge 3.3 : Eklem pürüzlülük sayısı (Jr) (NGI, 2015).

Tanım	Değerlendirme
a) Kaya-duvar teması ve b) 10 cm kesme hareketinden önce kaya-duvar teması	
A Süreksiz eklemler	4
B Pürüzlü ya da düzensiz, dalgalı	3
C Düz, dalgalı	2
D Kaygan, dalgalı	1,5
E Pürüzlü veya düzensiz düzlemsel	1,5
F Düz, düzlemsel	1
G Kaygan, düzlemsel	0,5
c) Kesmeden sonra kaya-duvar teması yok	
Not i) Açıklama, küçük ölçekli özellikler ve orta ölçekli özellikler anlamına gelir, sırasıyla	
H Kaya-duvar kontaklarını önleyebilecek kalınlıktaki kil mineralleri içeren zon	1
Not ii) İlgili eklem takımının ortalama aralığı 3 m'den büyükse 1 ekleyin (yer altı açıklığının boyutuna bağlı olarak)	
Not iii) Lineasyonların tahmini kayma yönünde yönlendirilmiş olması koşuluyla, lineasyonlara sahip düzlemsel kaygan kenarlı birleşimler için $J_r = 0,5$ kullanılabilir.	



Şekil 3.2 : Farklı J_r değerlerine sahip eklem – duvar yüzeyleri örnekleri (NGI, 2015).

Eklem pürüzlülüğüne ek olarak eklem dolgusu eklem sürtünmesi için önemlidir. Eklem dolgusu düşünüldüğünde iki faktör önemlidir; kalınlık ve güç. Bu faktörler mineral bileşimine bağlıdır. Bir eklem alterasyon numarasının belirlenmesinde, eklem dolgusu, eklem düzlemi boyunca kesildiğinde kaya duvar temasının kalınlığına ve derecesine göre üç kategoriye (“a”, “b” ve “c”) ayrılır. Q sınıflandırma sisteminde Eklem alterasyon sayısı (J_a) değeri sınıflandırması Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Eklem alterasyon sayısı (J_a) (NGI, 2015).

Tanım		Değerlendirme	
Kaya-duvar kontağı (mineral dolgu yok, sadece kaplamalar)		Φ _r (Yaklaşık)	Değer
A	Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamaz, geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars veya epidot)	-	0,75
B	Altere olmamış eklem yüzeyleri, sadece yüzeysel paslanma	25-35	1
C	Hafif altere olmuş eklem yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları; kumlu parçacıklar, kil içermeyen parçalanmış kaya vb.	25-30	2
D	Siltli veya kumlu kil kaplamaları, düşük kil oranı (yumuşamayan)	20-25	3
E	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral kaplamalı (kaolinit, mika gibi). Ayrıca klorit, talk alçıtaşı, grafit vb. ve az miktarda şişen killer	8-16	4
b)	10 cm kesme öncesi kaya-duvar teması (ince mineral dolgular)		
F	Kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları vb.	25-30	4
G	Aşırı konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolguları (sürekli, ancak kalınlık 5mm'den az)	16-24	6
H	Orta ve düşük derecede aşırı konsolide olmuş, yumuşayan kil mineral dolgulu (sürekli, ancak kalınlık 5 mm'den az)	12-16	8
J	Şişen kil dolgulu (örn. Montmorillonit) (sürekli, ancak kalınlık 5 mm'den az) J _a 'nın değeri, şişen kil boyutundaki parçacıkların yüzdesine bağlıdır.	6-12	8-12
c)	Kesmede kaya-duvar teması yok (kalın mineral dolgular)		
K	Dağılmış veya ezilmiş kaya ve kil zonları veya bantları, güçlü bir şekilde aşırı konsolide.	16-24	6
L	Kil, parçalanmış veya ezilmiş kaya zonları veya bantları. Orta veya düşük aşırı konsolidasyon veya yumuşayan dolgular.	12-16	8
M	Kil, parçalanmış veya ezilmiş kaya zonları veya bantları. Şişme kil. J _a , şişen kil boyutundaki parçacıkların yüzdesine bağlıdır.	6-12	8-12
N	Kalın, sürekli zonlar veya kil bantları. Güçlü bir şekilde aşırı konsolide.	12-16	10
O	Kalın, sürekli zonlar veya kil bantları. Orta ila düşük aşırı konsolidasyon.	12-16	13
P	Kil içeren kalın, sürekli zonlar veya bantlar. Şişme kil. J _a , şişen kil boyutundaki parçacıkların yüzdesine bağlıdır.	6-12	13-20

Eklem suyu mineral dolguyu yumuşatabilir veya yıkayabilir ve böylece eklem düzlemlerindeki sürtünmeyi azaltabilir. Su basıncı, eklem duvarlarındaki normal gerilmeyi azaltabilir ve blokların daha kolay kaymasına neden olabilir.

Eklem suyu indirgeme faktörünün belirlenmesi, bir yer altı açıklığındaki içe akışa ve su basıncına dayalıdır, bkz. Çizelge 3.5. En düşük J_w değerleri (J_w< 0.2), büyük stabilite problemlerini temsil eder.

Çizelge 3.5 : Eklem suyu indirgeme faktörü (J_w) (NGI, 2015).

	Tanım	Değerlendirme	
		Değer	Su basıncı (kg/cm ²)
A	Kuru kazılar veya su gelişi 5 lt/dak'dan az	1	< 1,0
B	Orta derece su gelişi veya basıncı, genellikle eklem doldularının yıkanması (5 lt/dak yerel)	0,66	1 - 2,5
C	Dolgunuz, dayanımlı ve eklemli kayada çok su gelişi veya yüksek su basıncı	0,5	2,5 - 10,0
D	Çok miktarda su gelişi veya yüksek su basıncı ile eklem dolgularının fazlaca yıkanması	0,33	2,5 - 10,0
E	Patlatma ile çok fazla su gelişi, zamanla azalma	0,2 - 0,1	> 10,0
F	Zamanla azalmayan çok fazla su gelişi veya basıncı	0,1 - 0,05	> 10,0

Genel olarak SRF (gerilme indirgeme faktörü), bir yer altı açıklığı etrafındaki gerilme ve kaya mukavemeti arasındaki ilişkiyi tanımlar. Gerilmelerin etkileri genellikle bir yer altı açıklığında kavlaklaşma, dilimlenme, deformasyon, sıkışma, genleşme ve blok gevşemesi olarak gözlemlenebilir. Bununla birlikte, stres fenomenlerinin görünür hale gelmesi için biraz zaman geçebilir.

Gerilme durumu Çizelge 3.6'da yer aldığı haliyle dört kategoride sınıflandırılmıştır.

- Çevredeki kaya kütleindeki gerilmeleri aktarabilen veya aktaramayan yer altı açıklığını kesen zayıflık bölgeleri.
- Yüksek gerilmeler veya gerilme eksikliği nedeniyle stabilite sorunları olan ana kaya.
- Orta veya yüksek kaya gerilmelerinin etkisi altında zayıf kayanın plastik deformasyonu ile kaya sıkıştırma.
- Şişen kaya; suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme aktivitesi.

Çizelge 3.6 : Gerilme azaltma faktörü (SRF) (NGI, 2015).

Tanım		Değerlendirme
a) Yer altı açıklığını kesen, kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek zayıf zonlar.		
A	Kil veya kimyasal olarak ayrılmış, çok gevşek çevre kaya (herhangi bir derinlik) veya yetersiz (zayıf) kaya (herhangi bir derinlik) içeren kısa bir bölüm içinde birden fazla zayıf bölge oluşumu. Sıkışma için bkz. L ve M.	10,0
B	Gevşek çevreleyen kaya (herhangi bir derinlik) ile zayıf kilsiz kayada kısa bir bölüm içinde çoklu kesme bölgeleri.	7,5
C	Kil içeren ya da içermeyen tekil zayıflık zonları veya kimyasal olarak parçalanmış kaya (derinlik ≤ 50 m).	5,0
D	Gevşek, açık eklemler, yoğun eklemler veya “küp şeker” vb. (herhangi bir derinlik).	5,0
E	Kil içeren ya da içermeyen tekil zayıflık zonları veya kimyasal olarak parçalanmış kaya (derinlik > 50 m).	2,5
Not: i) Zayıf bölgeler yalnızca yer altı açıklığını etkiliyorsa ancak kesişmiyorsa, bu SRF değerlerini %25-50 azaltın.		
b) Sağlam, ağırlıklı olarak masif kaya, gerilme problemleri.		
F	Düşük stres, yüzeye yakın, açık eklemler.	$\sigma_c/\sigma_1 > 200$ $\sigma_\theta/\sigma_c < 0,01$ 2,5
G	Orta stres, uygun stres koşulu.	$200 - 10$ $0,01 - 0,3$ 1
H	Yüksek stres, çok sıkı yapı. Genellikle stabilite için uygundur. Eklem/zayıflık düzlemlerine kıyasla gerilimlerin yönüne bağlı olarak stabilite açısından da elverişsiz olabilir*.	$10 - 5$ $0,3 - 0,4$ 0,5 - 2,0 ya da 2 - 5*
J	Masif kayada > 1 saat sonra orta derecede kavlaklanma ve/veya dilimlenme.	$5 - 3$ $0,5 - 0,65$ 5 - 50
K	Masif kayada birkaç dakika sonra kabarma veya kaya patlaması.	$3 - 2$ $0,65 - 1$ 50 - 200
L	Masif kayada ağır kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon.	< 2 > 1 200 - 400
Not: ii) Güçlü anizotropik salt stres alanı için (ölçüldüyse): $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ olduğunda, σ_c 'yi 0,75 σ_c 'ye düşürün. $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ olduğunda, σ_c 'yi 0,5 σ_c 'ye düşürün, burada σ_c = serbest sıkıştırma mukavemeti, σ_1 ve σ_3 ana ve küçük ana gerilimlerdir ve σ_θ = maksimum teğetsel stres (elastik teoriden tahmin edilir).		
iii) Yüzeyin altındaki taç derinliği, açıklıktan az olduğunda; bu gibi durumlar için SRF'nin 2,5'ten 5'e yükseltilmesi önerilir (bkz. F).		
c) Sıkışan kaya, yüksek basınç altında sağlam olmayan kayanın plastik deformasyon.		
M	Hafif miktarda sıkışan kaya basıncı.	σ_θ/σ_c 1-5 5 - 10
N	Yüksek miktarda sıkışan kaya basıncı.	> 5 10 - 20
Not: iv) Sıkışan kaya koşullarının tespiti ilgili literatüre göre yapılmalıdır.		
d) Şişen kaya; Suyun varlığına bağlı kimyasal şişme.		
P	Orta miktarda şişen kaya basıncı.	5 - 10
R	Yüksek miktarda şişen kaya basıncı.	10 - 20

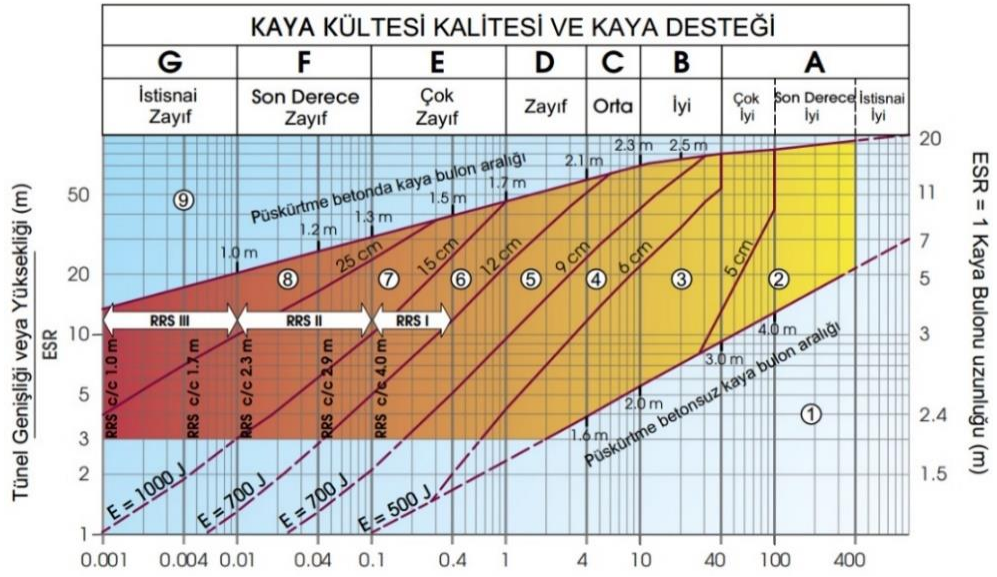
Yer altı açıklıklarının duyarlılığı ve destek gereksinimleri için, Q sınıflandırma sisteminde D_e adı verilen eşdeğer boyut parametresi kullanılmaktadır. Bu parametre denklem 3.2 yardımı ile hesaplanır. Denklemdeki ESR (kazı destek oranı) değeri yer altı açıklığının duraylı kalabilmesi için gerekli olan bir güvenlik katsayısıdır. Barton ve diğ. tarafından 1974 yılında geliştirilen değer üzerinden 1994'te güncellenmiş ESR değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

$$D_e = \frac{\text{Tünel Çapı (m)}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} \quad (3.2)$$

Çizelge 3.7 : ESR değerleri (NGI, 2015).

	Kazı Türü	ESR
A	Geçici maden kazıları	3,0-5,0
B	Dikey shaftlar: i) dairesel bölümler. ii) dikdörtgen/kare kesit. * Amaca bağlı. Verilen değerlerden daha düşük olabilir.	2,5-2,0
C	Kalıcı maden açıklıkları, hidroelektrik için su tünelleri (yüksek basınçlı cebri borular hariç), su tedarik tünelleri, pilot tüneller, büyük açıklıklar için başlıklar.	1,6
D	Küçük yol ve demiryolu tünelleri, dalgalanma odaları, erişim tünelleri, kanalizasyon tünelleri vb.	1,3
E	Elektrik santralleri, depo odaları, su arıtma tesisleri, ana yol ve demiryolu tünelleri, sivil savunma odaları, portallar, kavşaklar vb.	1
F	Yer altı nükleer santralleri, demiryolları istasyonları, spor ve kamu tesisleri, fabrikalar vb.	0,8
G	Uzun ömürlü, ≈ 100 yıl veya bakım erişimi olmayan çok önemli mağaralar ve yer altı açıklıkları.	0,5

Şekil 3.3'te eş boyut ve Q değerlerine bağlı destek kategorileri abağı görülmektedir. Abak içerisinde aynı zamanda 500, 700 ve 1000 Joule enerji yutma kapasitelerinin gösterildiği sınır değerler yer almaktadır.



Şekil 3.3 : Eş boyut ve Q değerlerine bağlı destek kategorileri (NGI, 2015).

Şekil 3.3'te tahkimat bölgeleri 1'den 9'a kadar numaralandırılmışlardır ve Çizelge 3.8'de yorumlanmıştır. Aynı zamanda numaralara karşılık gelen tahkimat bilgileri;

- 1- Tahkimat gerekmez,
- 2- Dökülmeleri ve kavlakları önlemek için noktasal kaya bulonu,
- 3- Sistematik kaya bulonu,
- 4- Sistematik kaya bulonu ve 4-10 cm kalınlığında donatısız püskürtme beton,
- 5- Fiber donatılı püskürtme beton 5-9 cm ve kaya bulonu Sfr+B,
- 6- Fiber donatılı püskürtme beton 12-15 cm ve kaya bulonu Sfr+B,
- 7- Fiber donatılı püskürtme beton 9-12 cm ve kaya bulonu Sfr+B,
- 8- Donatılı püskürtme beton >12 cm ve kaya bulonu Sfr+B,
- 9- Özel değerlendirmedir.

Çizelge 3.8 : Barton çizelgesinin yorumlanması.

Q	Sınıf
< 0,01	İstisnai zayıf
0,01 - 0,1	Son derece zayıf
0,1 - 1,0	Çok zayıf
1 - 4	Zayıf
4 - 10	Orta
10 - 40	İyi
40 - 100	Çok iyi
100 - 400	Son derece iyi
> 400	İstisnai iyi

3.4 Değerlendirme

Deneyssel çalışmanın yapılmış olduğu maden sahasında Öztürk ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmalarda ESR değerleri revize edilmiş ve aşağıdaki Çizelge 3.9'da özetlenmiştir. Revize edilen ESR değerlerinin mevcut değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.9 : Yer altı madenciliği için modifiye edilmiş ESR değerleri (Öztürk ve diğ, 2021).

No	Tanımlama	ESR
1	Birincil açıklıklar Madene 24 aydan daha uzun süre hizmet verecek	1,30
2	İkincil açıklıklar Madene 6 ila 24 ay arasında hizmet verecek	1,60
3	Kısa süreli açıklıklar Madene 6 aydan daha kısa süre hizmet verecek	3,00
4	Birincil açıklıklar Q kaya kütlesi değeri 0,1'den daha düşük	1,00
5	Dikey şaftlar	2,00

Yer altı açıklıklarının jeoteknik özellikleri, mevcut Q aralıklarına göre zayıftan son derece zayıfa doğru sınıflandırılır. Bazen, yer altı galerilerinde istisnai zayıf veya orta ila iyi kaya kütleleri de bulunur. Bu nedenle, açıklıkların destek kategorilerinin çoğu 4, 5 ve 6 olarak belirlenmiştir. Bazı durumlarda 7 ve 3'te en kötü ve iyi koşullarda destek kategorileri olarak kullanılmaktadır (Öztürk ve diğ, 2021).

Çizelge 3.10'da görüldüğü üzere fiber donatıların 4, 5, 6 ve 7 numaralı destek kategorilerinde kullanılması uygun olmaktadır. Bu sınıflamalarda 500 ila 1000 Joule arasında değişen enerji absorbsiyon değerleri aranmaktadır.

Bir diğer yaklaşım olarak 2000 yılının başından itibaren bazı ülkelerde çelik fiber yerine makro fiber kullanımı ön plana çıkmıştır. Bu lifler püskürtme betona çelik fiberlerle benzer özellikler kazandırmaktadır. Makro sentetik fiberler, çelik liflerden bir miktar daha sünektir ve görece daha kadar elastiktir. En büyük avantajları ise paslanmaz yapıda olmalarıdır. Bu durum, deniz altı tünelleri gibi aşındırıcı ortamlarda, özellikle püskürtme betonda oluşması muhtemel çatlaklara karşın büyük bir avantajdır (NGI, 2015).

Çizelge 3.10 : Destek elemanlarının özellikleri ve mühendislik özellikleri (Öztürk ve diğ, 2021).

Destek Kategorisi	Püskürtme Beton		Kaya Bulonu		Hasır Çelik	Beton Güçlendirme (cm)
	Kalınlık (cm)	Enerji Absorbsiyon (J)	Uzunluk (m)	Açıklık (m)		
3	6	0	2,4	1,4	-	-
4	9	500	2,4	1,4	-	-
5	12	700	2,4	1,25	-	-
6	15	700	2,4	1,1	-	-
7	15	1000	2,4	1,1	Evet	15

Destek elemanlarının mühendislik özellikleri					
Püskürtme	Kaya Bulonu		Hasır Çelik		
Young Modülü (GPa)	30	Çap (mm)	39	Boyutları	60 mm x 6 mm
Poisson Oranı	0,2	Young Modülü (GPa)	200	Atalet Momenti	6,3 x 10 ⁻¹¹ cm ⁴
Basınç Dayanımı (MPa)	28 - 35 - 40	Çekme Kapasitesi (kN)	100	Young Modülü (GPa)	200
Çekme Dayanımı (MPa)	3			Poisson Oranı	0,2
Enerji Absorbsiyon (Joule)	500 - 700 - 1000			Basınç Dayanımı (MPa)	400
				Çekme Dayanımı (MPa)	400

Fiber donatılı püskürtme betonun yer altı madenciliğindeki önemi göz önünde bulundurulduğunda, kazı destek sınıflandırılmasında fiber donatıların narinlik oranının araştırılması elzemdir. Fiber donatının mekanik özelliklerinin Q sınıflaması içerisinde konumlandırılabilmesi açısından yapılmakta olan bu araştırma tamamlayıcı etkiye sahip olacaktır.



4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Deneysel Çalışmanın Kapsamı

Balıkesir İli, Balya İlçesi sınırları içerisinde Şekil 4.1’de gösterildiği haliyle özel bir madencilik firmasında Kasım 2021 tarihinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda aynı beton reçetesi içerisine farklı narinlik oranlarındaki fiber donatılar test edilmiştir. Tek bir üretici tarafından aynı desen yapısında tedarik edilen fiber donatıların betonun mekanik özelliklerine etkisi bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Denemeler süresince maden işletmesinde yer altı uygulamalarında ihtiyaç duyulmakta olan beton basınç dayanım değerlerinin karşılanabilmesi için C30/37 sınıfında beton kullanılmıştır.



Şekil 4.1 : Deney ziyareti.

4.2 Deneysel Çalışmanın Programı

Sentetik lifli betonun tokluk, eğilme sünekliği, enerji yutma ve yük taşıma kapasiteleri gibi performanslarının belirlenmesi amacıyla her bir fiber tipi için en az dört adet olmak üzere toplam 16 adet TS EN 14488-5 standartlarına uygun 60 cm * 60 cm * 10 cm ölçülerinde plak numunesi ve 32 adet 10 cm * 20 cm ölçülerinde silindir numunesi alımı planlanmıştır.

İlk karışımda fiber donatı olmaksızın beton hazırlanmış ve çökme deneyine tabi tutulmuştur. Fiberli betonun yer altında rahat uygulanabilmesi için maden işletmesinde tecrübe edilen minimum 17 cm çökme değerinin elde edilebileceği optimum reçete

oluşturulmuştur. Fibersiz ilk karışımdan üç adet beton basınç dayanımının takip edileceği 10 cm * 20 cm ebatlarında silindir numunesi alınmıştır.

Devam eden ikinci karışımda 3,5 kg/m³ dozajda MF54 ürün beton karışımına eklenmiş ve bu karışımdan dört adet 60 cm * 60 cm * 10 cm ölçülerinde plak numunesi ve üç adet 10 cm * 20 cm ölçülerinde silindir numunesi alınmıştır. Aynı zamanda birim ağırlık için bir adet ve fiber içeriği tayini için üç adet olmak üzere 10 cm * 20 cm ebatlarında dört silindir numune alınmıştır.

Sonraki üçüncü karışımda 3,5 kg/m³ dozajda MF54+ ürün beton karışımına eklenmiş ve söz konusu karışımdan dört adet 60 cm * 60 cm * 10 cm ölçülerinde plak numunesi ve bunlara ek olarak üç adet 10 cm * 20 cm ölçülerinde silindir numunesi alınmıştır. Öte yandan birim ağırlık için bir adet ve fiber içeriği tayini için üç adet olmak üzere 10 cm * 20 cm ebatlarında dört silindir numune alınmıştır.

Devam eden dördüncü karışımda 3,5 kg/m³ dozajda MF60 ürün beton ile karıştırılmış ve ilgili karışımdan dört adet 60 cm * 60 cm * 10 cm ölçülerinde plak numunesi ve üç adet 10 cm * 20 cm ölçülerinde silindir numunesi alınmıştır. Benzer şekilde birim ağırlık için bir adet ve fiber içeriği tayini için üç adet olmak üzere 10 cm * 20 cm ebatlarında dört silindir numune alınmıştır.

Son olarak beşinci karışımda 3,5 kg/m³ dozajda MF60+ ürün beton karışımına eklenmiş ve söz konusu karışımdan dört adet 60 cm * 60 cm * 10 cm ölçülerinde plak numunesi ve ek olarak üç adet 10 cm * 20 cm ölçülerinde silindir numunesi alınmıştır. Aynı zamanda birim ağırlık için bir adet ve fiber içeriği tayini için üç adet olmak üzere 10 cm * 20 cm ebatlarında dört silindir numune alınmıştır.

Deneyisel çalışmada 16 adet TS EN 14488-5 standartlarına uygun 60 cm * 60 cm * 10 cm ölçülerinde plak numunesi ve 32 adet 10 cm * 20 cm ölçülerinde silindir numunesi alımı yapılmıştır. Numuneleri gösteren tablo Çizelge 4.1’de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.1 : Alınan numunelere ait miktarlar.

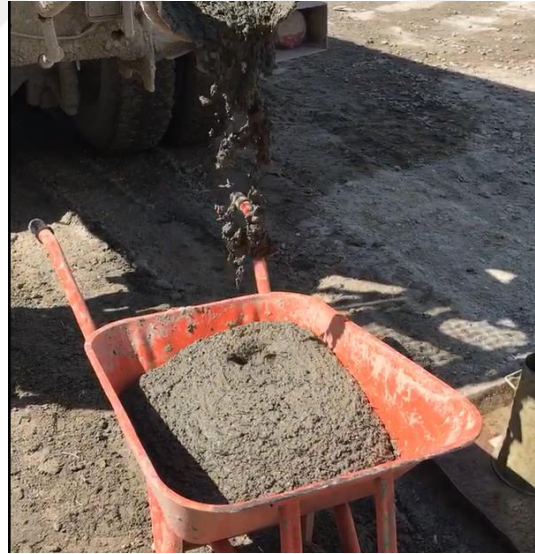
Karışım Numarası	Ürün Adı	Plak Numunesi (Adet)	Silindir Numunesi (Adet)	Fiber İçeriği Tayini (Silindir Numune - Adet)	Birim Ağırlık (Silindir Numune - Adet)
1	Fibersiz	-	3	-	1
2	MF54+	4	3	3	1
3	MF60+	4	3	3	1
4	MF54	4	3	3	1
5	MF60	4	3	3	1

4.3 Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışma süresince Akçansa CEM I 42,5 R - Portland Çimento, 0-5 mm elek aralığında kum – taş tozu ve 5-12 mm elek aralığında agrega kullanılmıştır. Betonun kolayca püskürtülebilir olması maksadıyla betonun çökme değeri 19 cm olacak şekilde düzenlenmiştir. Söz konusu düzenlemenin betonun dayanım değerlerini düşürmemesi maksadıyla su artırılmamış yerine akışkanlaştırıcı kimyasal kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan beton reçetesi Çizelge 4.2’de yer almaktadır. Aynı zamanda üretilen taze betona ait görsel Şekil 4.2’de paylaşılmaktadır.

Çizelge 4.2 : Deneysel çalışmada kullanılan beton reçetesi.

Malzeme	Miktar	Birim	Tür
Çimento	450	kg	Cem I 42,5 R
Su	160	kg	
Kum (0-5)	1173	kg	
Agrega (5-12)	415	kg	Sika ViscoCrete Hi-Tech 33
Akışkanlaştırıcı	3,5	kg	
Yoğunluk	2,20	gr/cm3	
Çökme	19	cm	
Su/Çimento	0,36		



Şekil 4.2 : Taze haldeki sentetik lif takviyeli betonun yaş haldeki görüntüsü.

4.3.1 Çimento

Deneysel çalışma süresince bağlayıcı malzeme olarak sadece çimento seçilmiş olup, Akçansa tarafından üretilen, TS EN 197-1 (2002) ile uyumlu normal Portland çimentosu (CEM I 42,5 R) kullanılmıştır. Çimentonun çimento silosundan kullanılması yani gerçek uygulamaya birebir uygun olmasına hassasiyet gösterilmiş,

tüm çalışma aynı üretim partisinden elde edilen çimentonun beton karışımıyla tamamlanmıştır. Bu sayede, çalışmalar süresince aynı nemde ve aynı kimyasal içerikli hammadde kullanılarak olası değişimlerin malzeme farklılığından meydana gelmesi bertaraf edilmiştir. Çimentonun kimyasal içeriği Çizelge 4.3'te azalan oranlarına göre verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Çimentoya ait içerik ve yüzde oranlar.

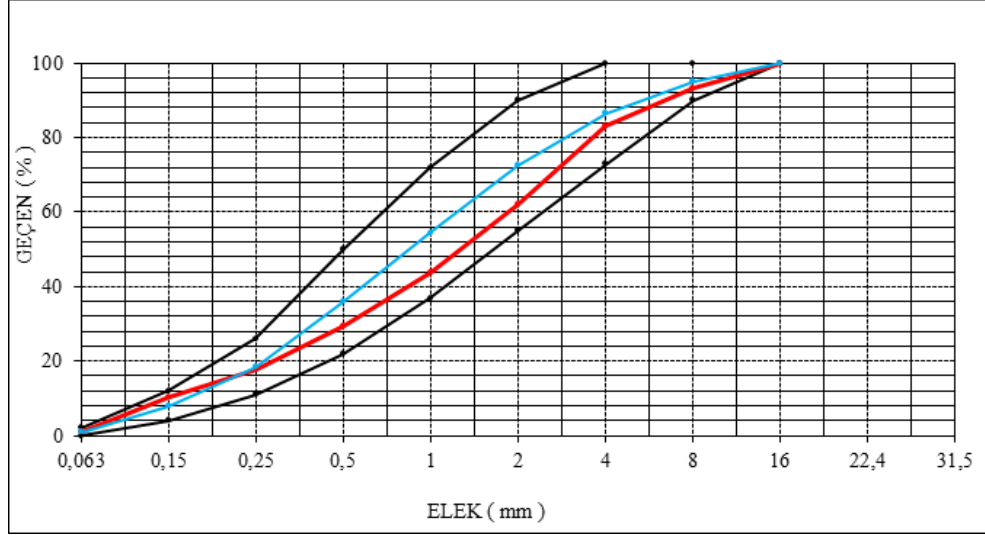
İçerik	Yüzde Oran (%)
CaO	62,91
SiO ₂	19,71
Al ₂ O ₃	5,2
Fe ₂ O ₃	3,73
SO ₃	2,72
MgO	2,54
Kızdırmalık Kaybı	0,96
K ₂ O	0,9
Na ₂ O	0,25

4.3.2 Agrega

Deneyisel çalışma süresince üç çeşit agrega kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla doğal kum, yapay kum ve kırmataştır. En büyük agrega boyutu 12 mm'dir. Agregalara ait elek analizi Çizelge 4.4'te verilmiştir. Ayrıca agregalara ait elek analizi kullanılarak hazırlanan granülometri eğrisi Şekil 4.3'te yer almaktadır.

Çizelge 4.4 : Kullanılan agregaların elek analizi.

Elek (mm)	Agregalar				
	Kum	K.Kum	T.Tozu	1 No	2 No
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10	100,0	100,0	100,0	67,9	0,9
8	100,0	100,0	100,0	31,5	0,0
5,6	98,9	94,4	100,0	8,5	0,0
4	90,5	64,8	94,0	0,6	0,0
2	69,1	63,0	68,7	0,0	0,0
1	51,9	57,4	45,5	0,0	0,0
0,5	34,4	24,8	31,1	0,0	0,0
0,25	17,4	23,2	22,1	0,0	0,0
0,125	6,9	15,2	15,7	0,0	0,0
Karışım (%)	45	0	45	10	0



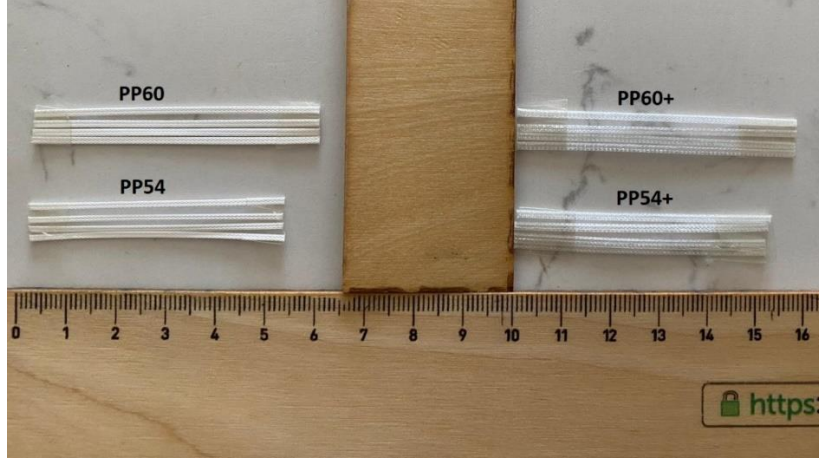
Şekil 4.3 : Granülometri eğrisi.

4.3.3 Kullanılan fiber donatılar

Deney süresince, aynı türde kabartmalı yüzey desenine sahip, farklı uzunluk ve çaplarda, saf polipropilen hammaddesinden imal edilmiş dört makro sentetik fiber donatı tipi kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılan fiber donatılara ait üretici firma tarafından deklare edilen özellikler Çizelge 4.5'te paylaşılmaktadır. Aynı zamanda deneysel çalışmada kullanılan fiber donatıların genel görüntüsü Şekil 4.4'te yer almaktadır.

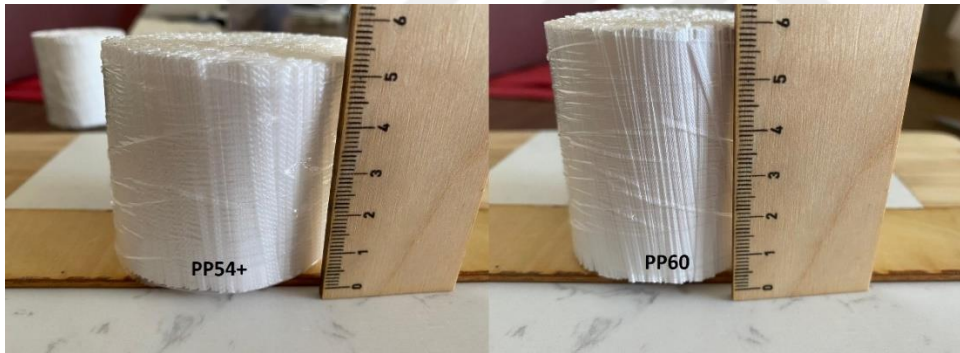
Çizelge 4.5 : Deneyde kullanılan fiberlere ait teknik veriler.

Ürün Adı	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Narinlik Oranı (l/d)	Fiber Adedi (adet/kg)
MF54	54	0,72	550	8,5	75	50.000
MF60	60	0,72	550	8,5	83,3	45.000
MF54+	54	0,95	500	7,8	56,8	28.800
MF60+	60	0,95	500	7,8	63,2	26.000



Şekil 4.4 : Deneysel çalışmada kullanılan fiberler.

Fiber üreticisi firma, homojen dağılımın sağlanabilmesi ve fiberlerin topaklanmasının, önüne geçilebilmesi amacıyla fiberleri yaklaşık 5 – 6 cm aralığında değişen şekillerde öbek haline getirmiştir. Bahsi geçen öbeklere ait görsel Şekil 4.5'te paylaşılmaktadır.



Şekil 4.5 : Deneysel çalışmada kullanılan fiberlerin öbek halinde duruşu.

4.3.4 Kullanılan beton katkıları

4.3.4.1 Akışkanlaştırıcı katkı

Deneysel çalışma süresince betonun çökme seviyesinin 17 cm altına düşmemesi amacıyla ilave su yerine Sika firması tarafından imal edilen Viscocrete HiTech 3621 ürün isimli yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Bahsi geçen kimyasal beton karışımına, Çizelge 4.2'de yer aldığı üzere $3,5 \text{ kg/m}^3$ veyahut bir diğer ifade ile çimento miktarına göre %0,78 oranında eklenmiştir. Çizelge 4.6'da paylaşıldığı şekliyle işletmeden rutin olarak yapılan kimyasal analizlerde kimyasal katkının EN 934-1 standart aranan değerleri karşıladığı görülmüştür.

Çizelge 4.6 : Akışkanlaştırıcı katkıya ait kimyasal analiz sonuçları.

Özellik	Test Metodu	Sonuç	EN 934-1 Standart Değerleri
Homojenlik	Görsel	Homojen.	Homojen. Ayrışma üretici tarafından beyan edilen sınırı aşmamalıdır.
Renk	Görsel	Kahverengi likit.	Üniform ve üreticinin verdiği tarife uygun.
Yoğunluk 20°C, g/cm ³	ISO 758	1,0644	d>1,10 : d±0,03, d<1,10 : d±0,02
Katı Madde Yüzdesi, %	EN 480-8	21,26	T>%20 : 0,95T<X<1,05T T<%20 : 0,90T<X<1,10T
pH, (%10'luk çözelti)	ISO 4316	4,88	Üreticinin beyan ettiği değer ±1 veya üreticinin beyan ettiği aralık içinde.
Suda Çözülebilir Klor Yüzdesi %	EN 480-10	0,0496	Maks. %0,10 veya üreticinin beyan ettiği değer altında.
Alkali Yüzdesi, % (Na ₂ O's ekivalendir)	EN 480-12	0,29	Üreticinin beyan ettiği en yüksek değer altında.
Korozyon Davranışı	EN 480-14	Korozyona etkisi yoktur.	Korozyona etkisi yoktur.

4.3.4.2 Priz hızlandırıcı katkı

Püskürtme beton uygulamasında, basınçlı hava ile beton uygulamasına tabi tutulacak açılı veya eksel yüzeylerde, betonun uygulama sonrasında kendisini bırakması, akması ve veya ihtiyaç duyulan beton kalınlığına kadar rahatlıkla püskürtülebilmesi amacıyla, atımı takip eden kısa süre zarfında beton hidrasyonunu başlatan priz hızlandırıcı katkıları kullanılmaktadır. Deneysel çalışmada bir metre küp beton içerisinde 32 kg veya bir diğer ifade ile çimento miktarına göre %0,71 oranında MBS firması tarafından imal edilen MasterRoc SA 160 ürün isimli priz hızlandırıcı katkı tercih edilmiştir. Bahsi geçen ürüne ait kimyasal analiz değerleri Çizelge 4.7'de paylaşılmaktadır.

Çizelge 4.7 : Priz hızlandırıcı katkıya ait kimyasal analiz sonuçları.

Karakteristik Metot	Değer	Alt Limit	Üst Limit	Standart
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	1,43	1,41	1,47	ISO 758
ph	2,30	2,00	3,00	ISO 4316
Katı Madde Yüzdesi, %	53,71	50,00	55,00	EN 480-8
Klorür İçeriği, %	0,0055		0,10	EN 480-10
Alkali İçeriği, %	0,01		1,00	EN 480-12

4.3.5 Su

Deneysel çalışma kapsamında beton içerisinde kullanılan karışım suyu ve kürleme işlemleri için kullanılan su şehir şebekesinden alınan sudur. Betonun üretilmesi noktasında tercih edilen karma su ilgili Türk Standardı olan TS EN 1008'a uygundur.

4.4 Numunelerin Üretimi

Deneysel çalışma kapsamında fiber donatılar maden işletmesi beton santralinde, Şekil 4.6'da gösterilen fiber dozajlama makinesi yardımıyla karışıma eklenmiş olup, karışım beton mikserine aktarılmadan önce santral bunkerinde yaklaşık 60 saniye boyunca karıştırılmıştır. Bu karışımın amacı fiber donatının beton içerisinde homojen olarak dağılımının korunması olarak açıklanabilir.



Şekil 4.6 : Fiber dozajlama makinesi.

Santralde üretilen betonun içerisinde yer alan bileşenler belirli bir sıralama ile bunkere beslenmekte olup bu sıra kum ve agreganın banda aktarılması, aynı banda fiber donatının beslenmesi, agrega ve fiber karışımının bunkere dökülmesi şeklindedir. Bunkere çimentonun eklenmesi ve en son karışım suyunun bunkere beslenmesi neticesinde elde edilen harmanın 60 saniye boyunca karıştırılması ile beton elde edilmektedir.

Püskürtme beton makinesine kadar sekiz metreküp hacimli beton mikserleri ile taşınacak betondan püskürtme uygulaması öncesinde Şekil 4.7'de gösterildiği gibi fiberli ve fibersiz 10 cm * 20 cm ölçülerinde silindir numuneleri alınmış aynı zamanda betona çökme testi yapılmıştır. Çökme testi için alt sınır değer olan 17 cm seviyesi

aranmıştır. Bu esnada beton içerisinde herhangi bir topaklanma olup olmadığı gözle takip edilmiştir.



Şekil 4.7 : Silindir numune alımı ve çökme testi.

Çökme deneyi ve silindir numunelerin alımı işlemini takiben beton mikseri yaklaşık 25 dakika mesafe kat ederek uygulama noktasına ulaşmıştır. Püskürtme beton uygulamasını yapacak olan makinenin, beton beslemesine tabi tutulan bölgesindeki ızgara yapısı, fiberli beton transferine uygun olmalıdır. Şekil 4.8’de yer aldığı üzere maden işletmesinde yer alan makinelerin mazgal yapısında deney öncesinde revizyon yapılmış olup, fiberlerin herhangi bir tıkanıklığa ya da topaklanmaya maruz kalmadan akışı mümkün kılınmıştır.



Şekil 4.8 : Püskürtme beton makinesi mazgal yapısı.

Şekil 4.9’da gösterildiği düzende her bir fiber tipi için püskürtme beton uygulamasından dört adet panel numunesi alınmıştır. Numunelerin üzerleri püskürtme işlemi tamamlanır tamamlanmaz TS EN 14488-5 standardında bahsedildiği gibi kalınlığı 10 cm olacak şekilde düzeltilmiştir.



Şekil 4.9 : Panel numunesi alımı.

Yerinden 24 saat boyunca hareket ettirilmeyen numuneler daha Şekil 4.10’da gösterildiği gibi kalıptan çıkartılmış ve kürlleme işlemine tabi tutulacakları alana taşınmıştır. Burada suya doymun vaziyette 28 gün boyunca bekletilmiştir.



Şekil 4.10 : Kalıptan çıkartılan plak numuneler.

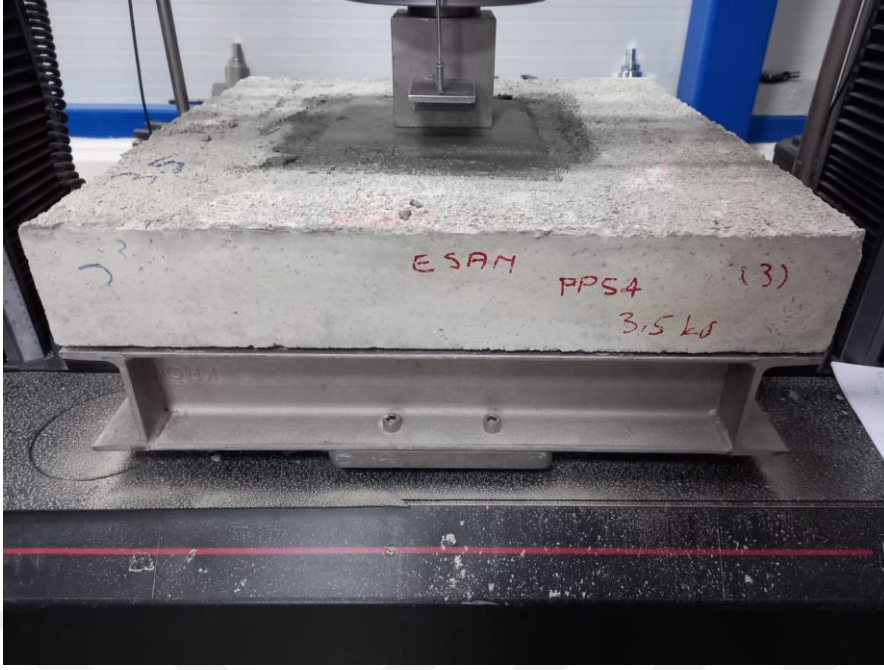
4.5 Numunelerin Hazırlığı

Basınç dayanımının belirlenmesi maksadıyla alınan silindir numunelerin sayısı Çizelge 4.1’de paylaşılmıştır. Silindir kalıplarının üst bölümlerinin açık olması, alt kısmında ise hava deliği olması sebebiyle sertleşmiş betonun üst ve alt yüzeylerinde pürüzlü yapı olması olağandır. Bu sebeple 28 günlük yaşını, kürleme işlemi ile tamamlayan numunelere, deney öncesinde başlık yapılmıştır. Bu süreçte başlıklar, Şekil 4.11’de yer aldığı gibi büyük bir özveri ile hazırlanmış ve dayanım kazanması için üç gün bekletilmiştir.



Şekil 4.11 : Başlık yapılmış silindir numunesi.

Enerji tokluk seviyesinin belirlenmesi maksadıyla alınan 60 cm * 60 cm * 10 cm kare panel numunelerin sayısı Çizelge 4.1’de paylaşılmıştır. Plak kalıplarının üst bölümünün açık olması sebebiyle sertleşmiş betonun üst yüzeyinde pürüzlü yapı görülmektedir. Yükleme hücresinin sabit bir yüzeye yük aktarabilmesi amacıyla 28 günlük yaşını, kürleme işlemi ile tamamlayan numunelere, deney öncesinde çimento esaslı bir harç kullanılarak EN 14488-5 standardında tarif edildiği şekilde başlık yapılmıştır. Şekil 4.12’de gösterildiği gibi dikkatle hazırlanan başlık ve dayanım kazanması maksadıyla üç gün bekletilmiştir.



Şekil 4.12 : Başlık yapılmış panel numunesi.

4.6 Yapılan Beton Deneyleri

Taze ve sertleşmiş beton deneyleri olmak üzere iki grupta çalışmalar yapılmıştır. Her bir deneye ait sonuçlar ilgili başlıkların altında toplanmıştır.

4.6.1 Taze beton deneyleri

Taze (yaş) beton deneyleri birim ağırlık, çökme ve fiber içeriği tayini olarak tamamlanmıştır. Hava içeriği, yayılma gibi testler maden işletmesinde ekipman olmaması sebebiyle yapılamamıştır. Tüm deneylerde hava sıcaklığı 15°C olarak ölçülmüştür. Taze beton deneylerinin tamamı Balıkesir İli, Balya İlçesi sınırlarında yer alan özel maden işletmesinde gerçekleştirilmiştir.

4.6.1.1 Birim ağırlık deneyi

Birim ağırlık deneyi için, ağırlığı bilinen silindir kap alınmıştır. Bu büyüklükte kap kullanılmasının nedeni, işletmede tedarik konusunda hızlı olunabilmesi ve hali hazırda basınç dayanımı için kullanılan kaplar ile aynı olmasıdır. Deneyin amacı, teorik olarak beton santralinde takip edilen birim ağırlığı bu deney sonuçları ile karşılaştırmak ve doğruluğunu teyit edebilmektir.

4.6.1.2 Çökme deneyi

Yer altı püskürtme beton uygulamalarında tasarlanan betonların belirli bir işlenebilirlik seviyesinde olması beklenir. Türk Standartları'nda (TS EN 12350) yer aldığı üzere, standart koninin dar ağzı yukarıda olacak düzende yerleştirilmesini takiben içerisine üçte biri mertebesine kadar taze beton doldurulmuş ve 25 kere şişlenmiştir. Aynı işlem geri kalan her üçte birlik seviye için tekrarlanmıştır. Koni dolduktan sonra, deney tepsisinin temizliğinden emin olunmuştur. Son aşama olarak Şekil 4.13'te gösterildiği gibi çökme konisi kaldırılarak betonun ağırlığı altında ne kadar yayıldığı not edilmiştir. Her beton serisinin çökme deneyi aynı kişi tarafından, titizlikle yapılmış bu şekilde ölçülen değerler daha doğru karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.13 : Çökme deneyi.

4.6.1.3 Fiber içeriği tayini

Beton karışımı içerisinde yer alan fiber donatıların homojen olarak dağılımının takip edilebilmesi, karışıma eklenmiş fiber dozajının fiili olarak tespit edilebilmesi amacıyla EN 14488-7 standardına uygun olarak fiber içeriği tayini testi yapılmıştır. Hacim ve ağırlık verilerinin takip edilebilmesi amacıyla 10 cm * 20 cm ebatlarında olan silindir numune kapları deney kapsamında tercih edilmiştir. Şekil 4.14'te gösterildiği şekilde fiber kaybı olmayacak şekilde yaş beton numunesinden fiber donatı ayıklanmış ve ağırlığı gram cinsinde kayıt altına alınmıştır.



Şekil 4.14 : Fiber içeriği tayini.

4.6.2 Sertleşmiş beton deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri basınç dayanımı tayini ve enerji tokluk seviyesi tayini olarak tamamlanmıştır. Sertleşmiş beton deneylerinin tamamı sentetik fiber donatı üretici firmanın beton laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4.6.2.1 Basınç dayanımı tayini

Tüm fiber tiplerindeki deneyler boyunca yükleme hızı sabit alınmıştır (0,5 kN/s) ve 10 cm çapında, 20 cm yüksekliğindeki silindir beton numuneleri kullanılarak deney TS EN 12390 'de tarif edildiği gibi yapılmıştır. Silindir numuneler, basınç dayanımlarının 90% mertebesine kadar yüklenmiş, böylelikle belirli aralıklarda okunan değerlerle σ - ϵ eğrisi tamamına yakını belirlenmiştir. Okumalar ekstansometre ile yapılmış olup, bu değerler her bir 10 kN'luk aralıklara tekabül etmektedir. Hesapta dikkat edilen bir nokta vardır ki o da ekstansometre ile okunan değerlerin “2 Δl ” olmasıdır. Eksenel basınç altındaki elemanın iki yüzeyinden de şekil değiştirmesi buna sebeptir. Basınç dayanımı sonuçları ondalık kısmı tam olacak şekilde yuvarlatılmıştır. Basınç dayanımı, σ_c , MPa biriminde aşağıdaki denklem 4.1 elde edilmiştir. Basınç dayanımına tabi tutulan numune Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S_c} \quad (4.1)$$

Burada;

σ_c : Basınç dayanımı [MPa],

F_c : Kırılmada ki en büyük yük [N],

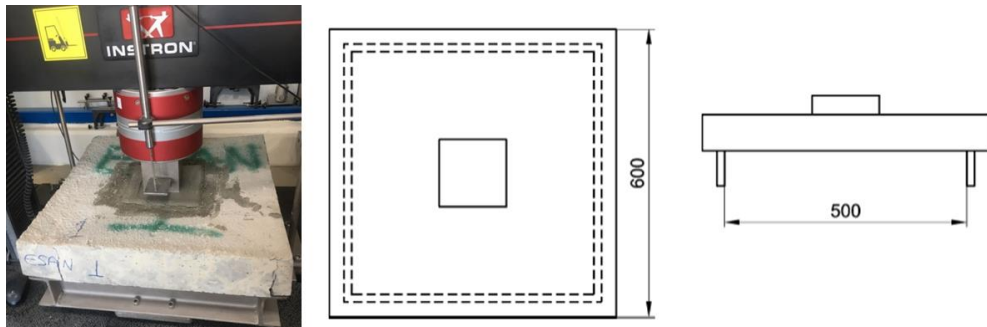
S_c : Beton numunesinin deneydeki basınç etkisine direnen kesit alanı mm^2 'dir.



Şekil 4.15 : Basınç deneyine tabi tutulan numune.

4.6.2.2 Enerji tokluk seviyesi tayini

Sentetik fiber takviyeli betonlara ait yük-deplasman davranışları üzerindeki etkileri beşinci bölümde incelenecektir. Öte yandan tüm tokluk deneyleri Şekil 4.16'da yer verilen INSTRON 5500R kapalı çevrimli deplasman kontrollü 100 kN kapasiteli deney makinesinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yük gelecek yüzeylerine pürüzsüz bir alan oluşturmak maksadıyla deneyden üç gün önce çimento esaslı bir harç uygulanmıştır.



Şekil 4.16 : Enerji tokluk deneyi test cihazı.

Kare şekilli numunenin püskürtme beton uygulanan yüzeyi yüke, kalıp içerisinde kalan bölümü ise plak numunenin oturduğu ayaklara temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Yük, yükleme hücresi vasıtasıyla numunenin tam orta noktasına uygulanmış olup, deney esnasında, aynı anda yük hücresinden yük değeri, LVDT yardımıyla ise yer değiştirme değeri ölçülmüştür.

TS EN 14488-1'e uygun bir kalıp içerisine püskürtülen 600 mm x 600 mm boyutlara sahip panel numunesinin üzeri püskürtme işleminden hemen sonra 100 mm kalınlığa sahip olacak şekilde tıraşlanmış ve kare yüzeyli bir numune oluşturulmuştur. Hazırlanan plaka, deneyden en az 3 gün öncesine kadar EN 12390-2'ye uygun koşullar altında kür işlemine tabi tutulmuş ve deney anına kadar nemli olması sağlanmıştır. 28. günde yapılan deneye ait görsel Şekil 4.17'de yer almaktadır.



Şekil 4.17 : Enerji tokluk seviyesi testine tabi tutulan numune.

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Geçici ve/veya kalıcı tahkimat olarak kullanılan fiber donatılı püskürtme betonda, saf polipropilen hammaddesinden imal edilen sentetiğin tercih edilmesi ile çelik fiber ya da demir donatı da karşılaştırılması muhtemel korozyon etkisinin önüne geçilebildiği gözlemlenmiştir. Öte yandan karışımda yer alan fiber donatıların betonun işlenilebilirliğini birim kilogram başına ihmal edilmemesi gereken ölçülerde değiştirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Çökme testi sonuçları gösteriyor ki betonun içerisine sentetik fiber donatı eklenmesi halinde değerlerde düşme meydana gelmektedir. Fiberin uzunluğunun çökme üzerinde etkisi gözlemlenebilirken çapındaki değişikliklerden dikkat çeken bir farklılık takip edilmemiştir. Bu durum uzun fiberlerin daha geniş yüzey alanına sahip olması şeklinde açıklanabilir. Öte yandan çapın artması ile azalan fiber sayısı tıpkı uzunluk gibi çökme testine etki etmiştir.

5.1 Taze Beton Deneyleri

Taze beton deneyleri üç başlık altında yer almaktadır. Birim ağırlık, çökme ve fiber içeriği tayini deneyleri titizlikle tamamlanmış ve sonuçlar paylaşılmıştır.

5.1.1 Birim ağırlık deneyi

Her bir fiber tipi için alınmış olan ve boş numune kap ağırlığı bilinen silindir numuneleri Şekil 5.1’de görüleceği üzere numune kabı ile tartışmış ve elde edilen sonuç kayıt altına alınmıştır. Net beton ağırlığı hesaplanan silindir, hacmine bölünerek hesaplanan ve Çizelge 5.1’de yer verilen yoğunluk değerlerinden görüleceği üzere fiber donatının beton yoğunluğuna etkisi olmadığı görülmüştür.

Çizelge 5.1 : Birim ağırlık deney sonuçları.

Numune Adı	Beton Ağırlığı (g)	Beton Yoğunluğu (gr/cm ³)
Fibersiz	3533,16	2,25
MF54+	3481,52	2,22
MF54	3405,93	2,17
MF60+	3455,44	2,20
MF60	3511,27	2,24



Şekil 5.1 : Silindir numunenin birim ağırlık deneyine tabi tutulması.

5.1.2 Çökme deneyi

Dördüncü bölüm içerisinde bahsedildiği üzere yer altı püskürtme beton uygulamalarında tasarlanan betonların belirli bir işlenebilirlik seviyesinde olması beklenir. Fibersiz ve farklı tipte fiberlerle yapılan çökme deneyine ait sonuçlar Çizelge 5.2’de paylaşılmıştır. Fibersiz beton ile yapılan çökme deneyinde, fiberli olanlara istinaden daha yüksek bir değer görülmektedir.

Çizelge 5.2 : Çökme deneyi sonuçları.

Numune Adı	Çökme (cm)
Fibersiz	21,5
MF54+	19,00
MF54	18,50
MF60+	19,50
MF60	19,00

5.1.3 Fiber içeriği tayini

Büyük bir hassasiyet ve özveri ile tamamlanan fiber içeriği tayini deneyinde her bir fiber türü için ayrı ayrı alınan üçer adet numunenin sonuçları bu bölüm kapsamında değerlendirilmektedir. Deney esnasında kurutulan ve tartılan fiber donatıya ait görsel Şekil 5.2’de verilmektedir.



Şekil 5.2 : Fiber içeriği tayini – kurutma ve tartma.

Çizelge 5.3'te yer aldığı üzere metreküpte 3,5 kg olarak beslemesi yapılan MF54+ ürününün ortalamada söz konusu rakamı karşıladığı görülmektedir. Hiçbir değer 3,5 kg/m³ dozaj değerinin altında kalmaması ve en yüksek 3,57 kg/m³ olarak hesaplanması, tüm deneylerin doğruluğuna olan güveni artırmaktadır.

Çizelge 5.3 : MF54+ fiber içeriği tayini.

Numune Adı	Fiber Ağırlığı (g)	Hesaplanan Miktar (kg/m ³)
No 1	5,53	3,52
No 2	5,50	3,50
No 3	5,60	3,57
Ortalama	5,54	3,53

Metreküpte 3,5 kg olarak beslemesi yapılan MF54 ürününün ortalamada verilen rakamı karşıladığı Çizelge 5.4'te görülmektedir. Sadece bir değer 3,5 kg/m³ dozaj değerinin altında kalması ve en yüksek 3,57 kg/m³ olarak hesaplanması, ortalamada 3,51 kg/m³ rakamının hesaplanması tüm deney sonuçlarının güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.4 : MF54 fiber içeriği tayini.

Numune Adı	Fiber Ağırlığı (g)	Hesaplanan Miktar (kg/m ³)
No 1	5,35	3,41
No 2	5,60	3,57
No 3	5,59	3,56
Ortalama	5,51	3,51

Çizelge 5.5'te yer verildiği haliyle ve uygulama esnasında metreküpte 3,5 kg olarak beslemesi yapılan MF60+ ürününün ortalamada söz konusu rakamı karşıladığı görülmektedir. Sadece bir değer 3,5 kg/m³ dozaj değerinin altında kalması ve en

yüksek 3,55 kg/m³ olarak hesaplanması, sonuçların olumlu olduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 5.5 : MF60+ fiber içeriği tayini.

Numune Adı	Fiber Ağırlığı (g)	Hesaplanan Miktar
		(kg/m ³)
No 1	5,57	3,55
No 2	5,58	3,55
No 3	5,43	3,46
Ortalama	5,53	3,52

Çizelge 5.6’da yer aldığı üzere metreküpte 3,5 kg olarak beslemesi yapılan MF60 ürününün ortalamada söz konusu rakamı karşıladığı görülmektedir. Hiçbir değerin 3,5 kg/m³ dozaj değerinin altında kalmaması ve ortalama 3,55 kg/m³ olarak hesaplanması, tüm deney sonuçlarını güvenilir kılmaktadır.

Çizelge 5.6 : MF60 fiber içeriği tayini.

Numune Adı	Fiber Ağırlığı (g)	Hesaplanan Miktar
		(kg/m ³)
No 1	5,53	3,52
No 2	5,59	3,56
No 3	5,60	3,57
Ortalama	5,57	3,55

5.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri iki başlık altında yer almaktadır. Birim ağırlık, çökme ve fiber içeriği tayini deneyleri özveri ile tamamlanmış ve sonuçlandırılmıştır.

5.2.1 Basınç dayanımı tayini

Silindir numunelerle TS EN 12390 standardına uygun olarak tamamlanan deneye ait sonuçlar Çizelge 5.7’de paylaşılmaktadır. Fiber donatı olmaksızın yapılan teste ait sonuçlara göz atıldığında ortalama 39,75 MPa değerine ulaşıldığı görülmektedir. Farklı türlerde sentetik fiber donatı ile fibersiz beton dayanım sonuçları karşılaştırıldığında fiber donatının beton basınç değerine etki etmediği söylenebilir.

Çizelge 5.7 : Beton basınç sonuçları.

Açıklama	Fibersiz	MF54+	MF60+	MF54	MF60
		(Silindir Numune - MPa)			
Numune 1	40,16	38,73	41,15	37,85	38,61
Numune 2	39,61	37,98	38,10	39,56	38,10
Numune 3	39,49	40,27	38,79	38,60	37,95
Ortalama	39,75	38,99	39,35	38,67	38,22

5.2.2 Enerji tokluk seviyesi tayini

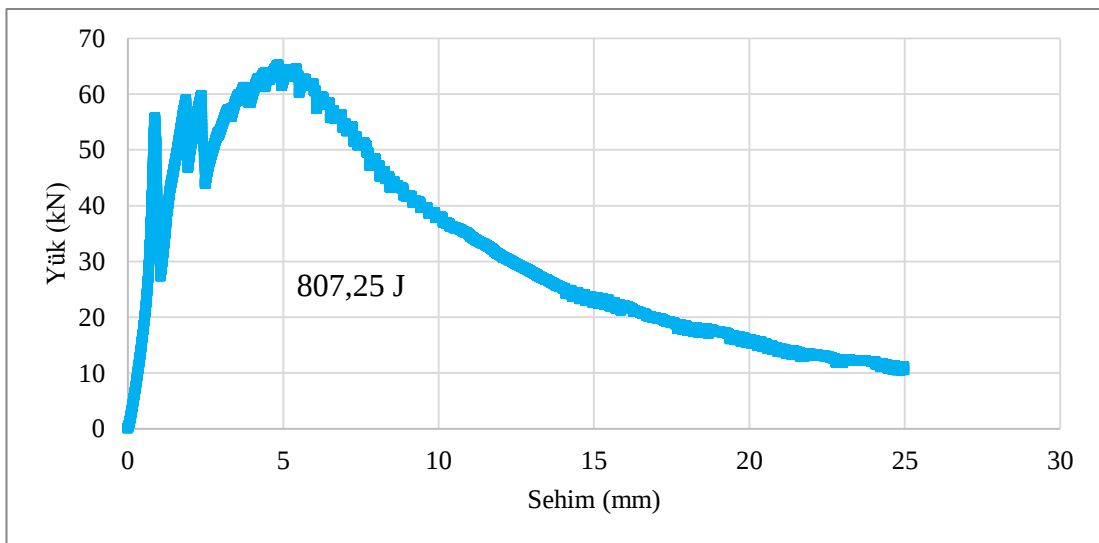
5.2.2.1 MF54+ plak numuneleri enerji tokluk seviyesi

Birim metreküp beton içerisine 3,5 kg MF54+ makro sentetik fiber donatının beslenmesi ile alınan numunelere ait tokluk sonuçları Çizelge 5.8’de verilmektedir. Çizelgede ilk kırılım yükü (kN), maksimum tepe yük (kN) ve enerji tokluk değerini gösteren Joule sonucu yer almaktadır. İlk kırılım yükü ortalama olarak 45,48 kN, maksimum tepe yükü ise 65,27 kN olarak ölçülmüş olup ve enerji tokluk değeri 769,87 J olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.8 : MF54+ enerji tokluk testi sonucu.

Açıklama	İlk Kırılım Yüğü (kN)	Maksimum Tepe Yüğü (kN)	Joule
M1	55,75	65,25	807,24
M2	36,56	57,37	733,90
M3	47,45	78,47	880,52
M4	42,14	59,99	657,82
Maksimum	55,75	78,47	880,52
Medyan	44,80	62,62	770,57
Standart Sapma	8,17	9,39	95,72
Ortalama	45,48	65,27	769,87
Minimum	36,56	57,37	657,82

Şekil 5.3’te 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.4’te 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde beş adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.

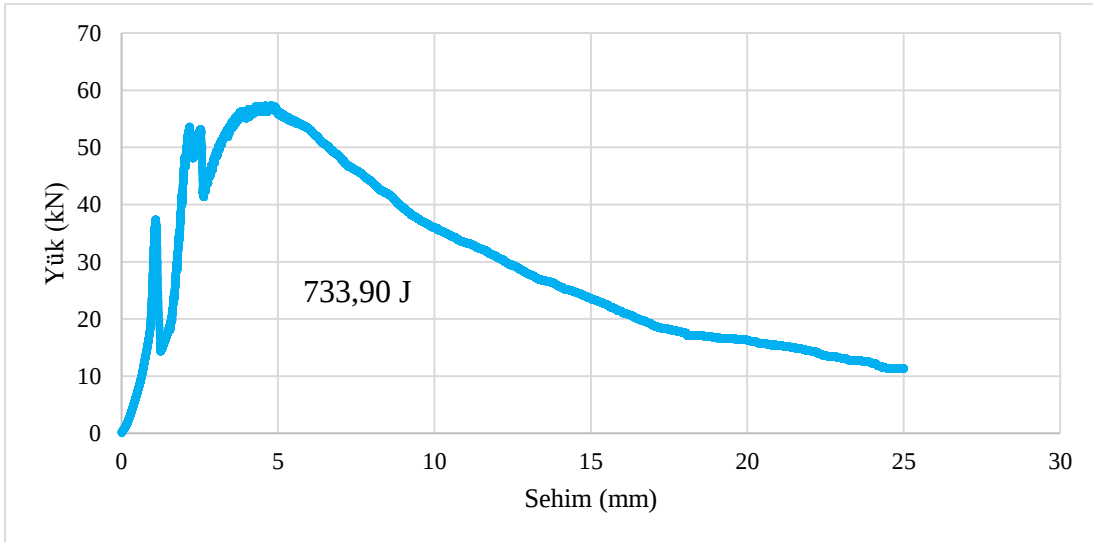


Şekil 5.3 : MF54+ 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.4 : MF54+ 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.5'te 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.6'da 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde dört adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.

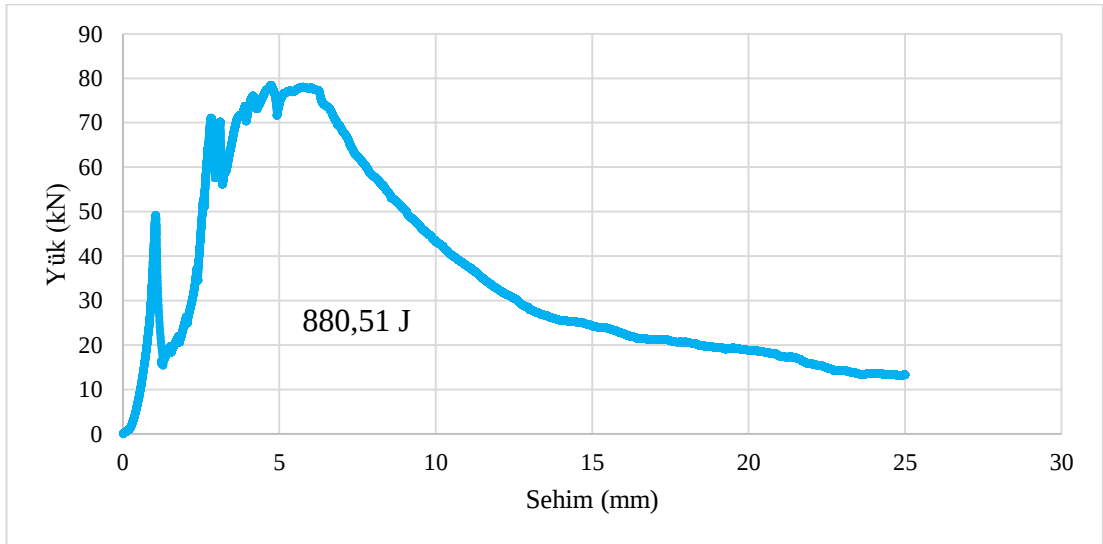


Şekil 5.5 : MF54+ 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.6 : MF54+ 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.7’de 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.8’de 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde altı adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.

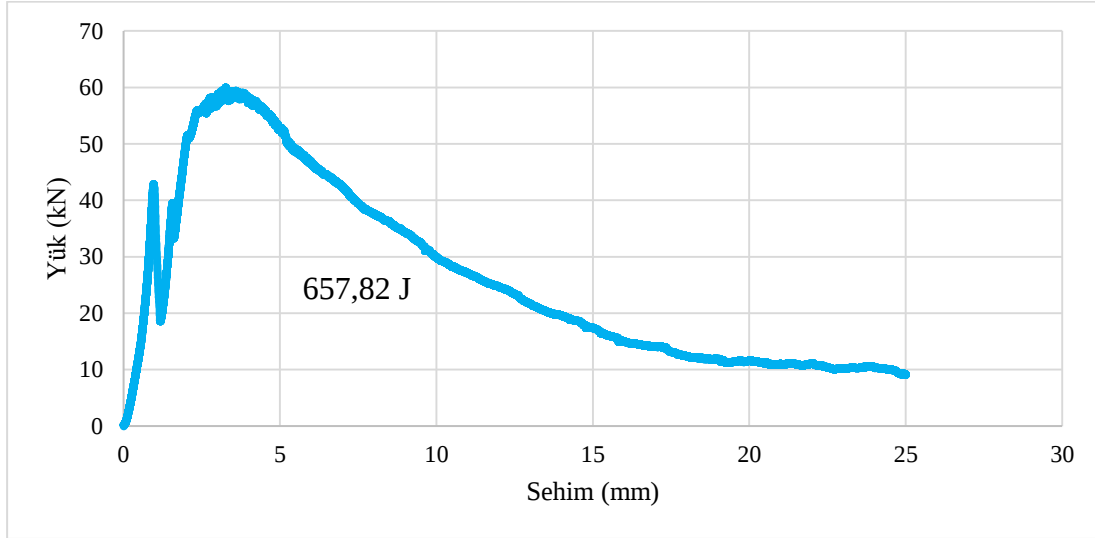


Şekil 5.7 : MF54+ 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.8 : MF54+ 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.9’da 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.10’da 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde beş adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.



Şekil 5.9 : MF54+ 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.10 : MF54+ 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

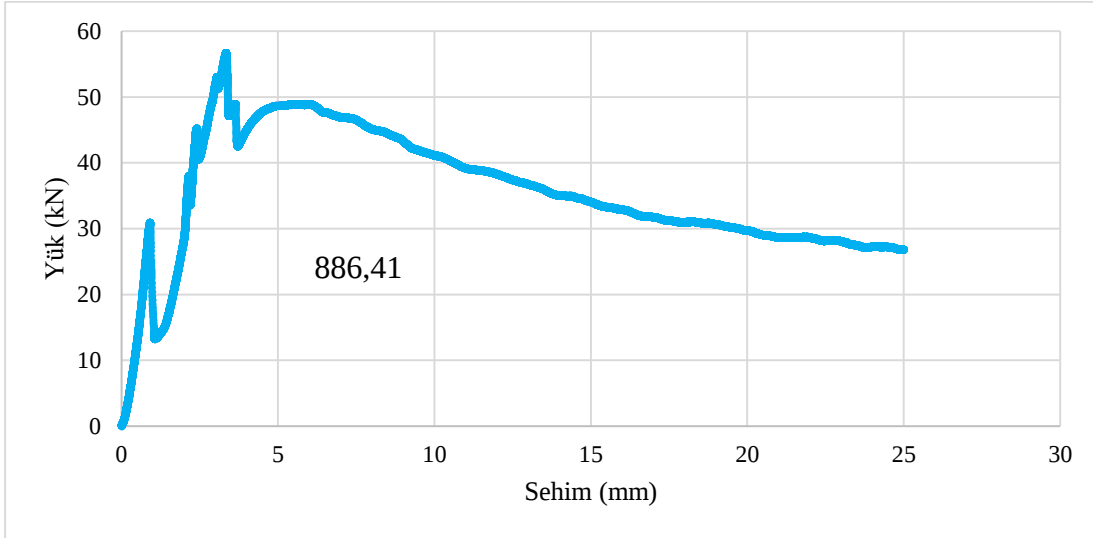
5.2.2.2 MF54 plak numuneleri enerji tokluk seviyesi

Önceki çalışma grubuna benzer şekilde bir metreküp beton içerisine 3,5 kg MF54 makro sentetik fiber donatının beslenmesi ile alınan numunelere ait tokluk sonuçları Çizelge 5.9’da yer almaktadır. Çizelgede ilk kırılım yükü (kN), maksimum tepe yük (kN) ve enerji tokluk değerini gösteren Joule sonucu yer almaktadır. İlk kırılım yükü ortalama olarak 37,34 kN, maksimum tepe yükü ise 54,33 kN olarak ölçülmüş olup ve enerji tokluk değeri 842,03 J olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.9 : MF54 enerji tokluk testi sonucu.

Açıklama	İlk Kırılım Yüğü (kN)	Maksimum Tepe Yüğü (kN)	Joule
M1	30,87	56,71	886,41
M2	41,70	58,08	815,21
M3	38,77	55,47	846,26
M4	38,00	47,06	820,24
Maksimum	41,70	58,08	886,41
Medyan	38,39	56,09	833,25
Standart Sapma	4,60	4,96	32,57
Ortalama	37,34	54,33	842,03
Minimum	30,87	47,06	815,21

Şekil 5.11’de 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.12’de 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde altı adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.

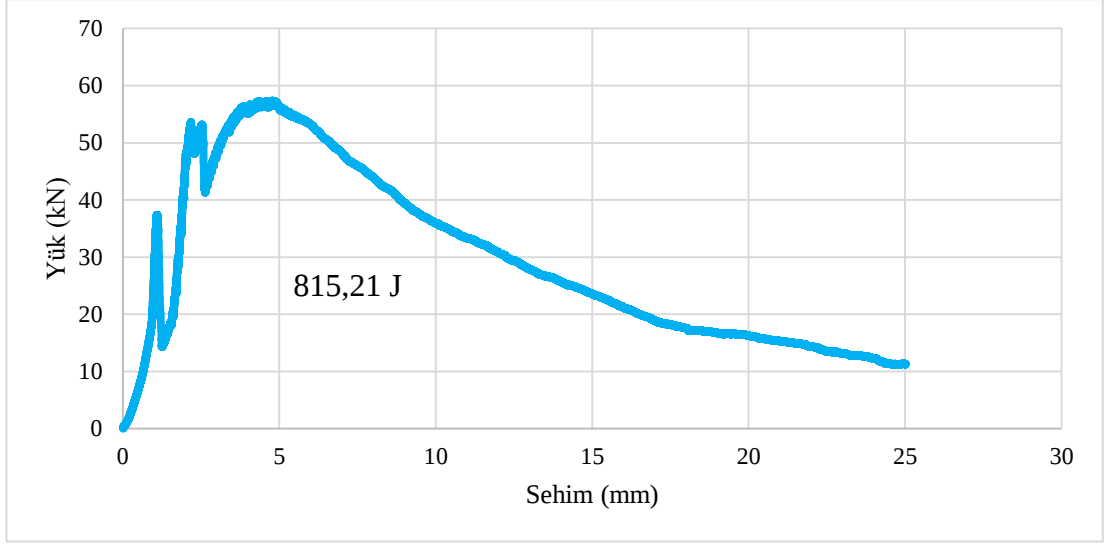


Şekil 5.11 : MF54 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.12 : MF54 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.13’te 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.14’te 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde beş adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.

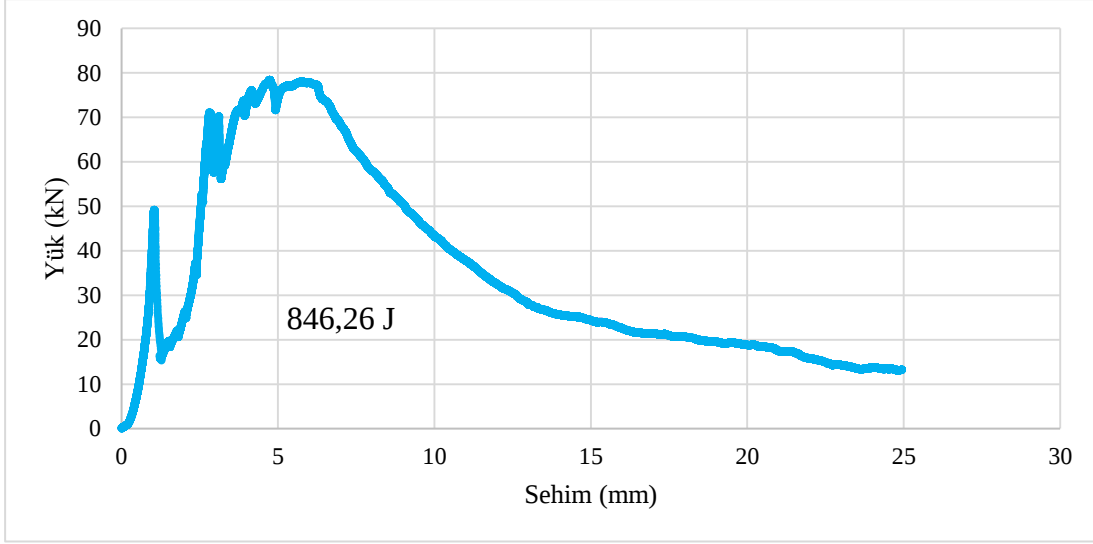


Şekil 5.13 : MF54 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.14 : MF54 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.15’te 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.16’da 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde yedi adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği takip edilmiştir.

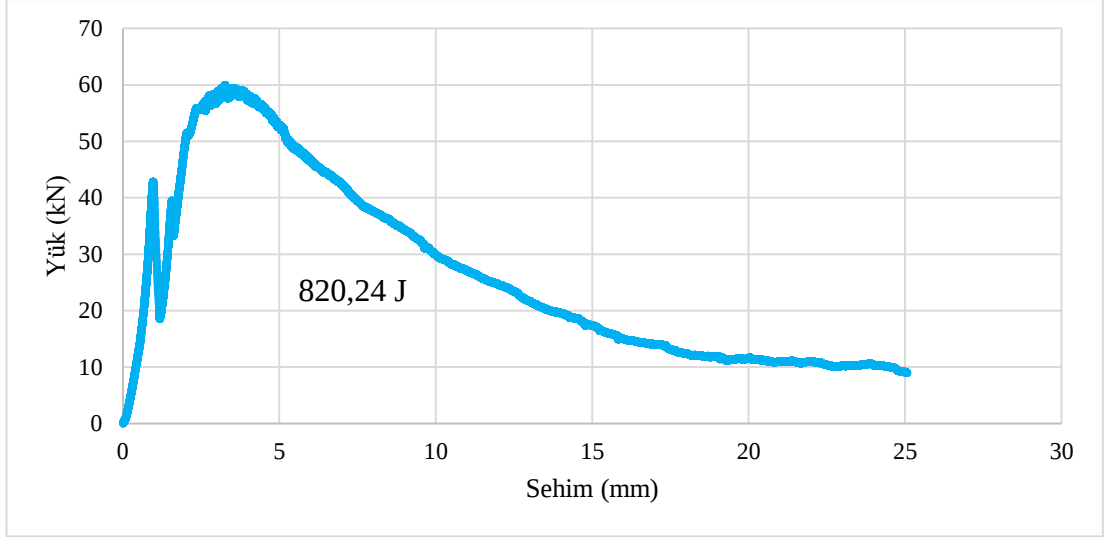


Şekil 5.15 : MF54 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.16 : MF54 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.17’de 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.18’de 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde altı adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.



Şekil 5.17 : MF54 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.18 : MF54 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

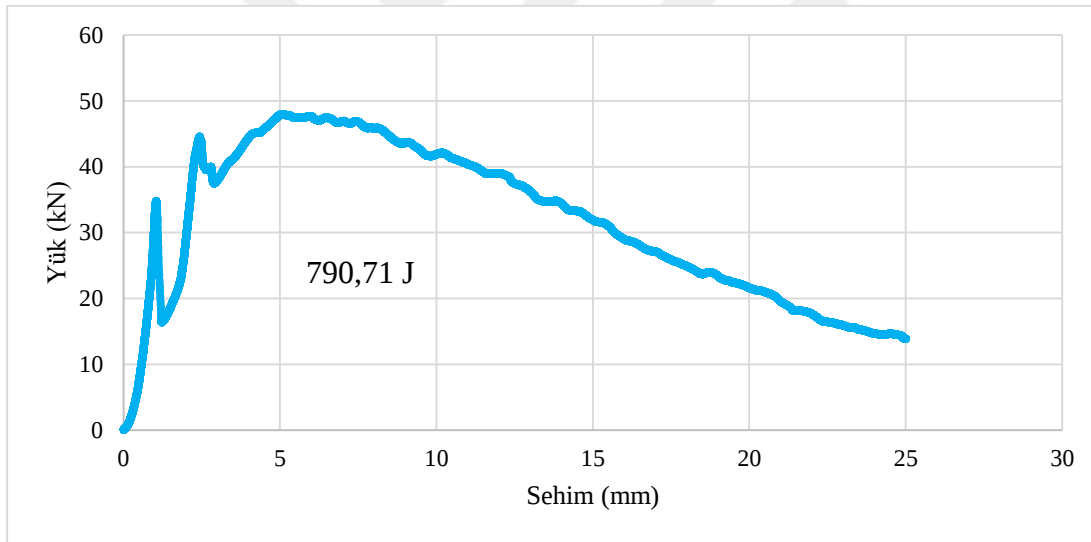
5.2.2.3 MF60+ plak numuneleri enerji tokluk seviyesi

Bir önceki çalışma grubuna benzer şekilde bir metreküp beton içerisine 3,5 kg MF60+ makro sentetik fiber donatının beslenmesi ile alınan numunelere ait tokluk sonuçları Çizelge 5.10’da yer almaktadır. Çizelgede ilk kırılım yükü (kN), maksimum tepe yük (kN) ve enerji tokluk değerini gösteren Joule sonucu yer almaktadır. İlk kırılım yükü ortalama olarak 40,54 kN, maksimum tepe yükü ise 54,52 kN olarak ölçülmüş olup ve enerji tokluk değeri 811,20 J olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.10 : MF60+ enerji tokluk testi sonucu.

Açıklama	İlk Kırılma Yüğü (kN)	Maksimum Tepe Yüğü (kN)	Joule
P1	34,7	47,99	790,71
P2	50,98	54,02	757,74
P3	34,87	63,1	883,53
P4	41,59	52,95	812,82
Maksimum	50,98	63,10	883,53
Medyan	38,23	53,49	801,77
Standart Sapma	7,67	6,30	53,27
Ortalama	40,54	54,52	811,20
Minimum	34,70	47,99	757,74

Şekil 5.19’da 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.20’de 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde dört adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.

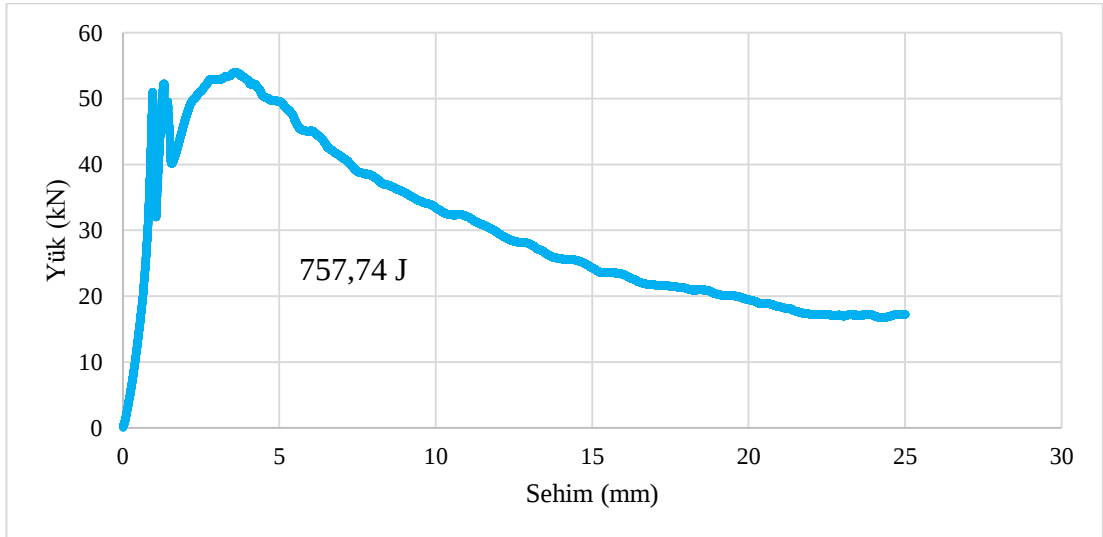


Şekil 5.19 : MF60+ 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.20 : MF60+ 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.21’de 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.22’de 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde beş adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği takip edilmiştir.

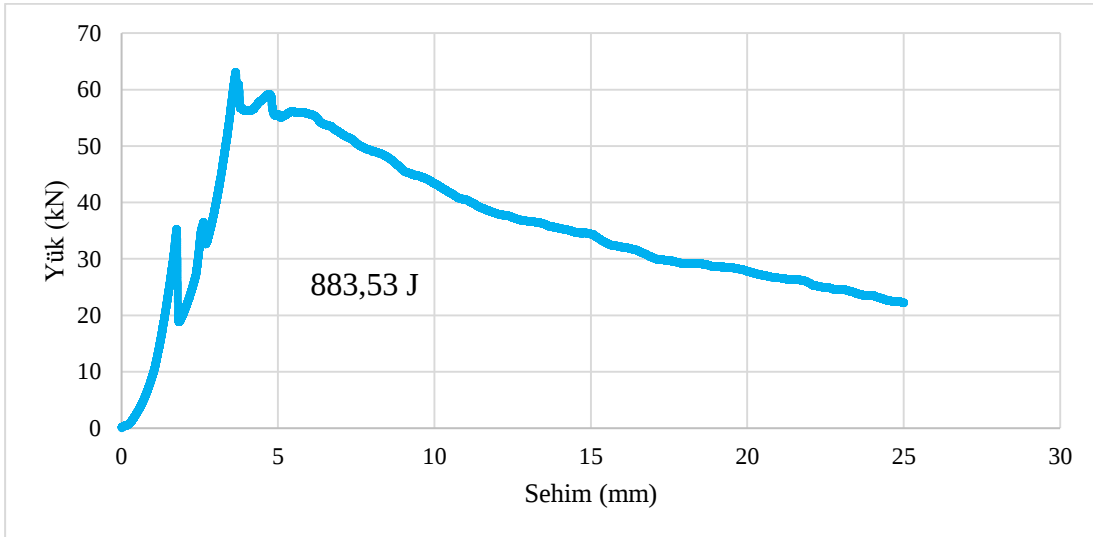


Şekil 5.21 : MF60+ 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.22 : MF60+ 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.23'te 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.24'te 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde beş adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.

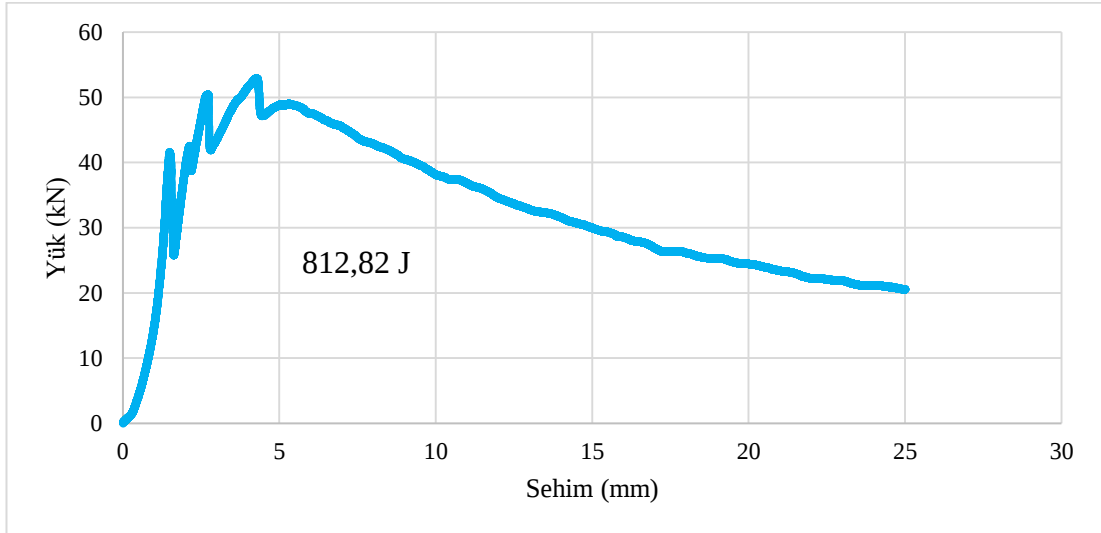


Şekil 5.23 : MF60+ 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.24 : MF60+ 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.25'te 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.26'da 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde beş adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.



Şekil 5.25 : MF60+ 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.26 : MF60+ 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

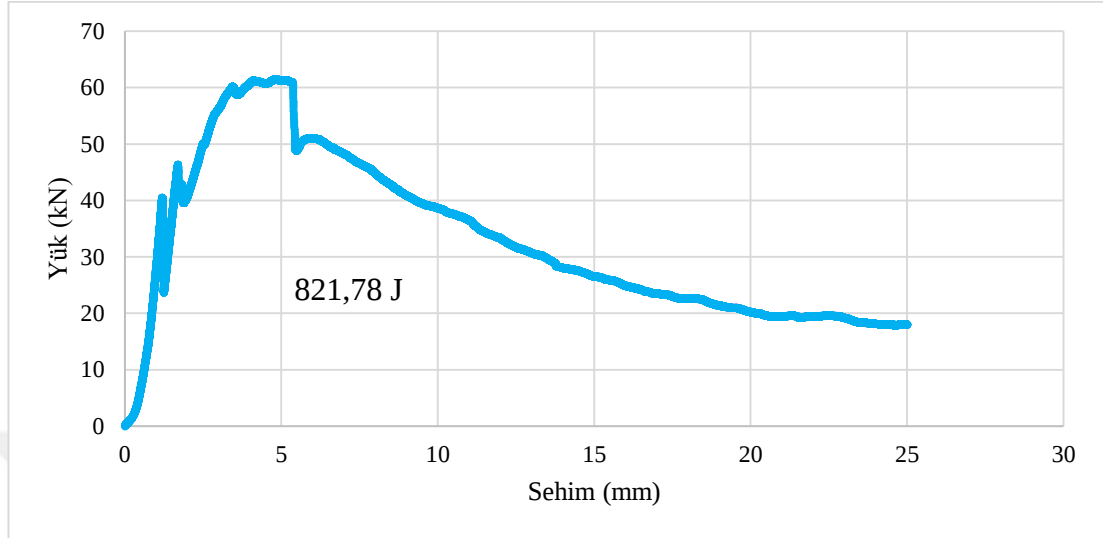
5.2.2.4 MF60 plak numuneleri enerji tokluk seviyesi

Önceki çalışma grubuna benzer şekilde bir metreküp beton içerisine 3,5 kg MF60 makro sentetik fiber donatının beslenmesi ile alınan numunelere ait tokluk sonuçları Çizelge 5.11’de yer almaktadır. Çizelgede ilk kırılım yükü (kN), maksimum tepe yük (kN) ve enerji tokluk değerini gösteren Joule sonucu yer almaktadır. İlk kırılım yükü ortalama olarak 46,67 kN, maksimum tepe yükü ise 64,00 kN olarak ölçülmüş olup ve enerji tokluk değeri 904,11 J olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.11 : MF60 enerji tokluk testi sonucu.

Açıklama	İlk Kırılım Yükü (kN)	Maksimum Tepe Yük (kN)	Joule
P1	39,89	61,5	821,78
P2	56,93	73,96	1011,85
P3	47,9	61,43	921,82
P4	41,95	59,12	860,97
Maksimum	56,93	73,96	1011,85
Medyan	44,93	61,47	891,40
Standart Sapma	7,64	6,73	82,79
Ortalama	46,67	64,00	904,11
Minimum	39,89	59,12	821,78

Şekil 5.27’de 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.28’de 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde sekiz adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.

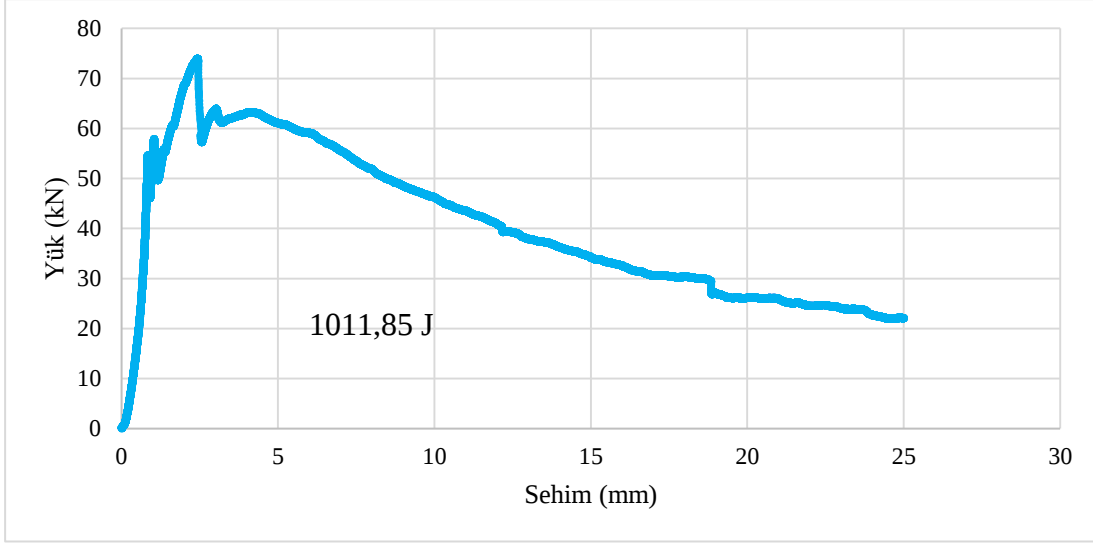


Şekil 5.27 : MF60 1 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.28 : MF60 1 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.29’da 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.30’da 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde yedi adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.

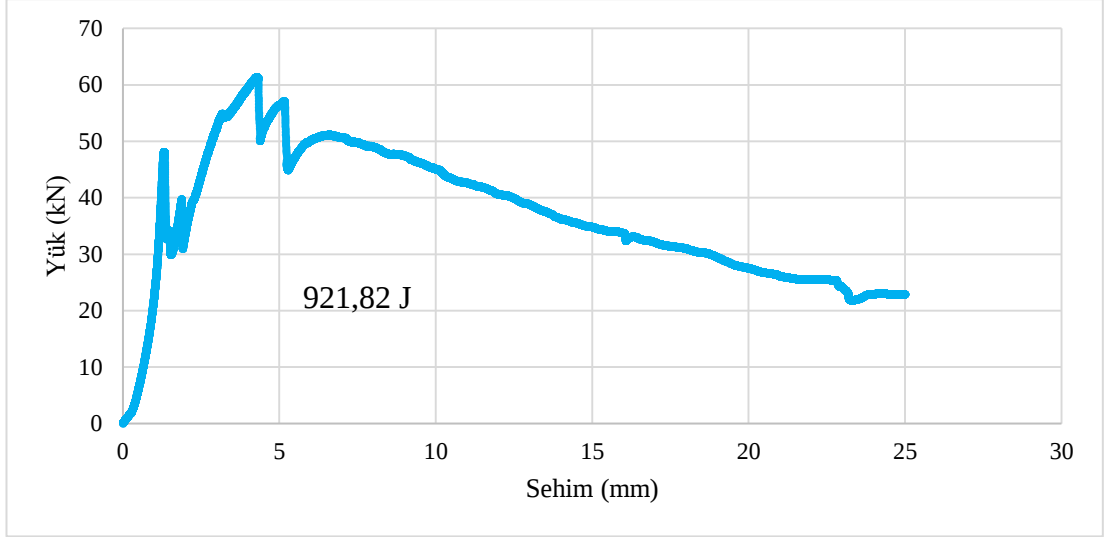


Şekil 5.29 : MF60 2 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.30 : MF60 2 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.31’de 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.32’de 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde altı adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği takip edilmiştir.

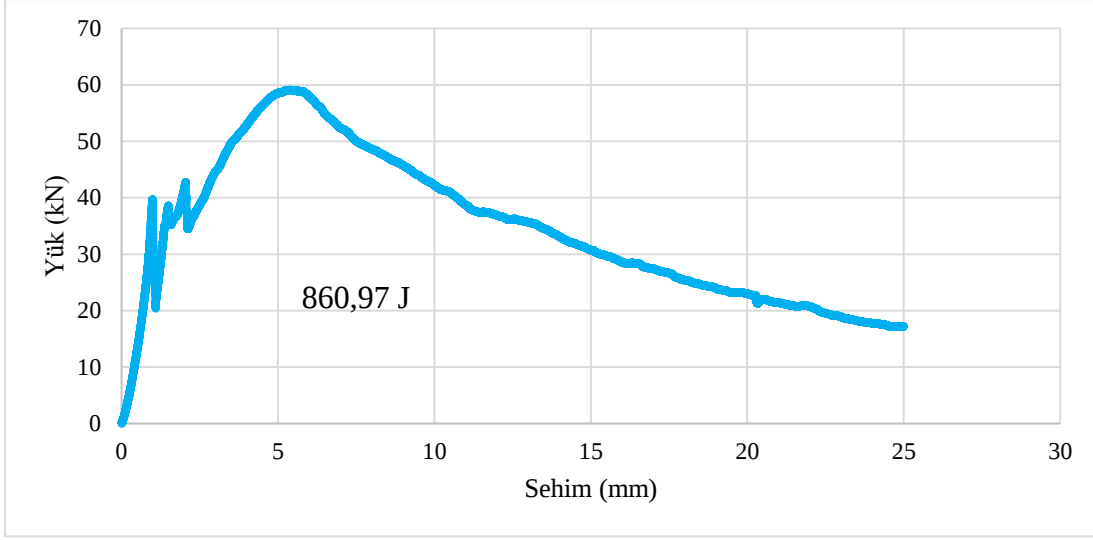


Şekil 5.31 : MF60 3 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



Şekil 5.32 : MF60 3 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

Şekil 5.33'te 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği ve Şekil 5.34'te 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde altı adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiği görülmüştür.



Şekil 5.33 : MF60 4 numaralı numunenin yük – sehim grafiği.



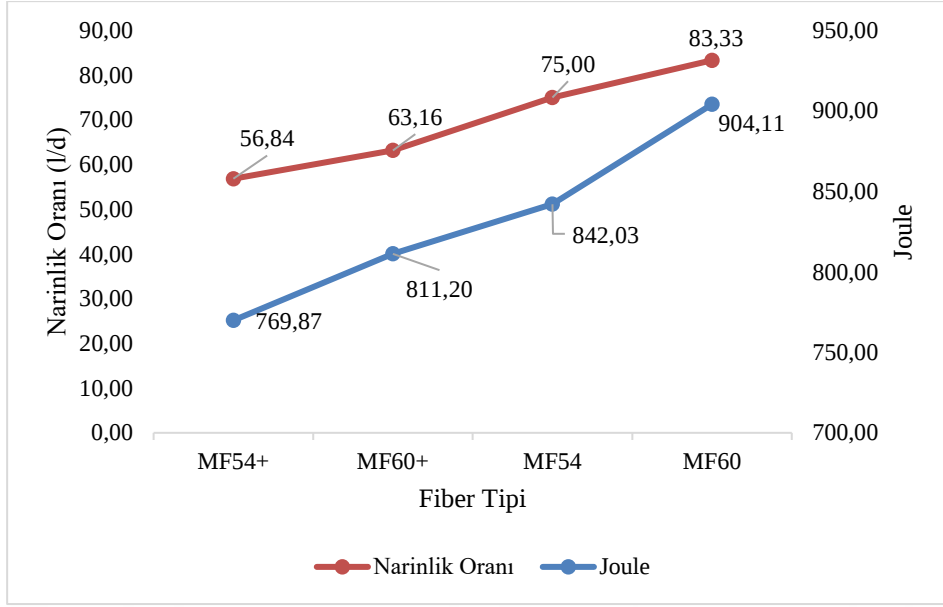
Şekil 5.34 : MF60 4 numaralı numunenin test sonrası görüntüsü.

6. SONUÇLAR

Sentetik fiber donatıların tahkimat elemanı olarak sağladığı faydalar, betonarme yapısına kazandırdığı eğilme performansı, çatlakların köprülenmesi, enerji tokluk değerlerinin artırılması, ani kırılma ve göçmelerin önlenmesi, geri sekme miktarının azaltılması, demir işçiliğine dayalı imalat, montaj hatalarının elimine edilmesi, şeklinde sıralanabilir. Öte yandan tüm bu uygulama avantajlarına ek olarak maliyetlerin düşürülmesi ve daha güvenli bir çalışma ortamı yaratılması başlıklarında sentetik fiber donatılar muazzam bir katkı sağlamaktadır.

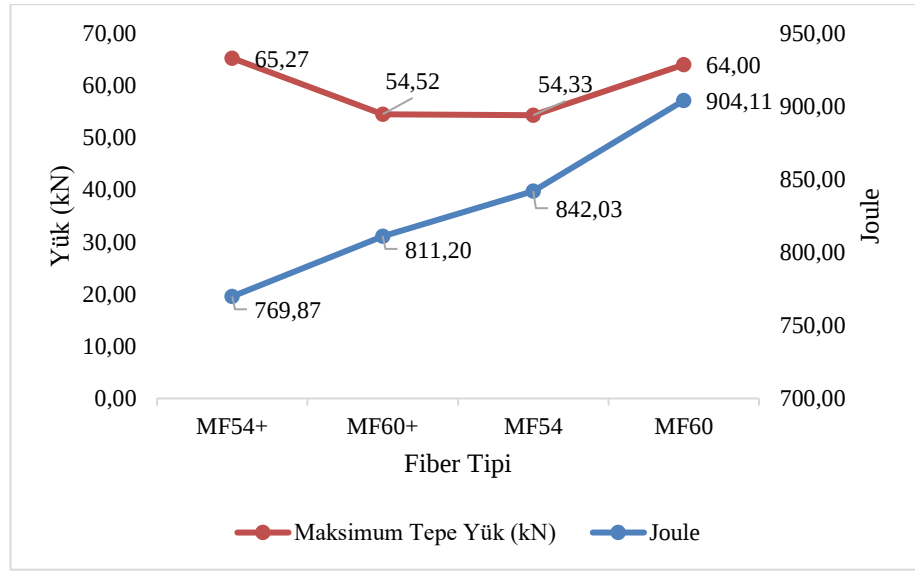
Tez çalışması kapsamında söz konusu sentetik fiber donatıların farklı narinlik oranlarında betonarme yapısına kazandırdığı enerji tokluk değerleri yani bir diğer ifade ile beton yapısının parçalanana dek absorbe ettiği toplam enerji seviyeleri araştırılmıştır. Balıkesir İli, Balya İlçesi sınırlarında, özel bir maden işletmesinden, birim ağırlık, çökme, basınç dayanımı, fiber içeriği tayini deneyleri için taze betondan alınan silindir ve enerji tokluk değerinin belirlenebilmesi için püskürtme beton uygulamasından alınan kare panel numuneleri ilgili testlere tabi tutulmuş, elde edilen sonuçlar altı başlık halinde aşağıda yorumlanmıştır.

- I. Sentetik fiber tipine göre sonuçlar kıyaslandığında Şekil 6.1’de görüldüğü haliyle en yüksek ortalama tokluk olan 904,11 Joule değerine MF60 ürünü ile ulaşılmış olup bu değeri ortalama 842,03 Joule ile MF54, ortalama 811,20 Joule ile MF60+ ve ortalama 769,87 Joule ile MF54+ takip etmiştir. Narinlik oranı ile tokluk endeksi arasındaki ilişkiye göz atılacak olursa MF60 ürününe ait olan 83,3 narinlik oranı en yüksek değer olup bu değeri, 75 ile MF54, 63,2 ile MF60+ ve 56,8 ile MF54+ takip etmiştir. Her iki değerlendirme bir araya getirildiğinde narinlik oranı ve tokluk endeksi arasında lineer bir ilişki olduğu söylenebilir. Öte yandan hem + serisinde sabit çap altında hem de normal seride sabit çap altında fiber boyunun artması enerji absorpsiyon seviyesinin yükselmesi şeklinde sonuçlanmıştır.



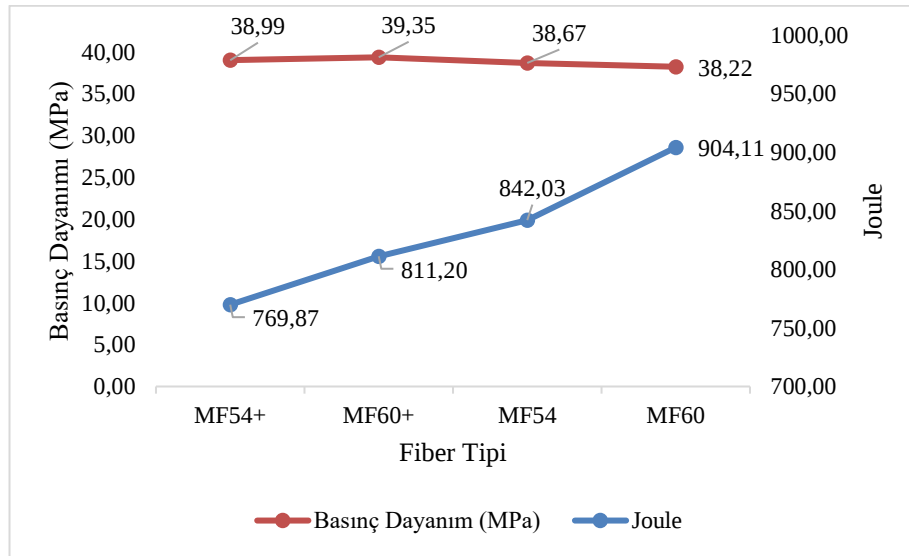
Şekil 6.1 : Narinlik oranı – tokluk değeri korelasyonu.

- II. Her ne kadar basınç dayanım değerlerinin yüksek olması tokluk indeksine etki ediyor olsa da taze betondan alınan silindir numunelerin test sonuçları değerlendirildiğinde beton basınç dayanım sonuçlarının neredeyse fiberli ve fibersiz tüm numunelerle benzer netice verdiği görülmüştür. Öte yandan enerji tokluk testi esnasında elde edilen veriler ışığında oluşturulan ve Şekil 6.2’de verilen ortalama 65,27 kN ile en yüksek tepe yük değerine sahip olan MF54+ numune grubu tokluk indeksine göre en düşük sonucu elde etmişken ortalama 65 kN tepe yük değerine sahip MF60 numune grubu tokluk indeksine göre en yüksek sonucu vermiştir. Birbiri ile neredeyse aynı değerlere sahip olan 54,33 kN ile MF54 ve 54,52 kN ile MF60+ sırasıyla 842,03 ve 811,20 Joule sonuç vermiş olup basınç dayanım değerlerinin sonuçlara doğrudan etki etmediğini ortaya çıkartmıştır. Maksimum tepe yük değerinin beton matrisi ile; tokluk değerinin ise fiberli beton kompozit yapısının bir sonucu olması sebebiyle aralarında rasyonel bir ilişki kurulması, çalışılan fiber dozajlarında mümkün olmamıştır.



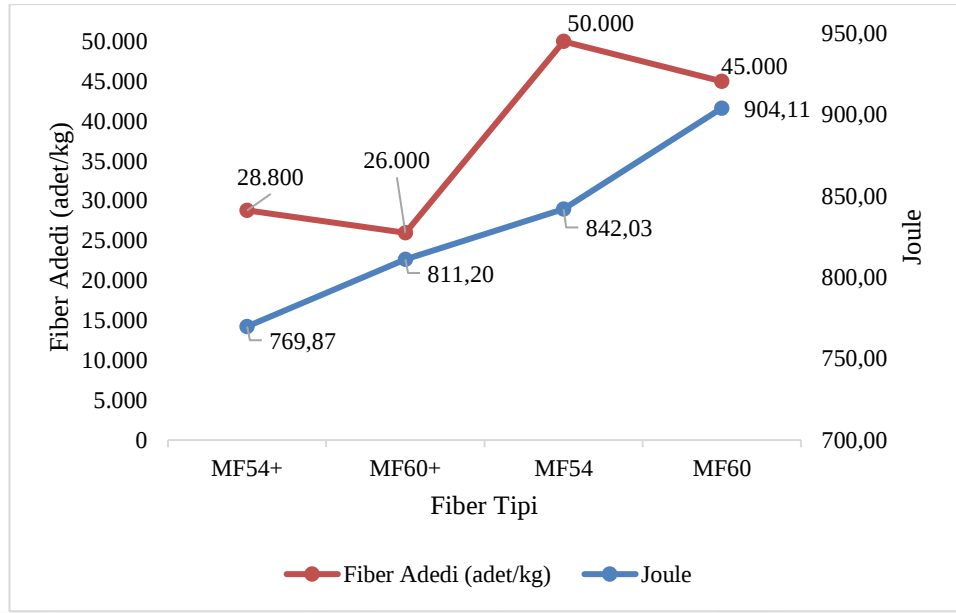
Şekil 6.2 : Maksimum tepe yük – tokluk değeri korelasyonu.

III. Narinlik ilişkisinin mekanik özelliklere etkisinin incelendiği araştırmada, benzer şekilde basınç dayanımı üzerindeki performans değişimi de takip edilmiştir. Beklendiği üzere fiberlerin betonun basınç dayanımına olumlu yönde bir katkısı olmadığı tespit edilmiş olup bununla birlikte fiberlerin eklendiği çalışma gruplarında referans gruba göre bir miktar düşüş takip edilmiştir. Yine de ortalama değerler dışındaki tekil numunelere göz atıldığında, basınç dayanım değerlerinin yer yer fibersiz gruptaki değerlerin üzerine çıktığı da gözlenmiştir. Şekil 6.3'te yer aldığı haliyle bu durum fiber donatıların basınç dayanımı üzerinde olumlu yahut olumsuz herhangi bir etki oluşturmadığı şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 6.3 : Basınç dayanımı – tokluk değeri korelasyonu.

- IV. Narinlik oranı ile doğrusal ilişkiye sahip birim hacimdeki fiber sayısı, kırımı tamamlanan plakların arka yüzeyinde gözle görülür şekilde ortaya çıkmıştır. Buna göre bir metreküp betonda aynı fiber kullanım oranlarına sahip MF54 ve MF60'a ait numunelerin arka yüzeyinde çok sayıda lif göze çarpmış olup bu yoğunluğun MF54+ ve MF60+ da daha az olduğu takip edilmiştir. Bu durum aynı zamanda çökme testinde de gözlenmiş olup, fibersiz betonda elde edilen 21,5 cm çökme rakamı, MF54 de 18,5 cm ile en düşük seviyeyi görmüş, MF54+ ve MF60 da aynı mertebede 19 cm olarak ölçülmüş, MF60+ da fiber sayısının azalmasıyla 19,5 cm seviyesinde olmuştur.
- V. Birim kilogram içerisinde yer alan fiber sayısının betonun enerji tokluk indeksine etkisi Şekil 6.4'te yer almaktadır. Hem + serisinde sabit çap altında hem de normal seride sabit çap altında fiber boyunun artması, bir kilogram içerisinde yer alan fiber donatı sayısının azalması şeklinde sonuçlanmıştır. MF54+ ve MF60+ arasında, düşen fiber adedine istinaden joule değerinin artması, fiber uzunluğunun çatlak köprülemeye olan pozitif etkisi şeklinde yorumlanabilir. Aynı zamanda fiber sayısının oldukça az miktarlarda değişmesi ve teste tabi tutulan numune hacimlerinin düşük olması, bu seviyedeki adet farklılıklarının tokluk değerlerini olumsuz etkilemediği sonucunu ortaya çıkartmaktadır. Benzer ilişki MF54 ve MF60 arasında da yer almaktadır. Öte yandan MF54+ ve MF54 arasında, sabit uzunluk ve azalan çap etkisi incelendiğinde, yaklaşık 1,7 kat artan fiber adedinin enerji tokluk indeksine pozitif yönde etki ettiği görülmektedir. Diğer bir deyişle çatlağın genişlemesini önlemek için ortamda daha fazla fiber donatı yer almakta, bu sayede daha geniş bir yüzey alanı elde edilmekte ve neticesinde artan aderans ile beton daha uzun süre yük taşıyabilir hale gelmektedir. Bu durum betonun enerji yutma kapasitesinde artış olarak takip edilmiştir. MF60+ ve MF60 arasında benzer ilişki görülmüştür.



Şekil 6.4 : Fiber adedi – tokluk değeri korelasyonu.

- VI. Beton yoğunlukları üzerinden bir değerlendirme yapıldığında, taze betondan alınan numune ağırlığının hacme bölünmesiyle elde edilen yoğunluk değerlerinde rasyonel bir bağlantı kurulamamıştır. Bu durum aynı zamanda fiber donatının beton birim ağırlığına etki etmediği şeklinde yorumlanabilir.
- VII. Enerji tokluk değerleri incelendiğinde tüm sonuçların 700 ila 1000 J arasında yani 5 ve 6 destek kategorisinde konumlandığı görülmüştür. Bu durum artan narinlik oranında daha düşük dozaj artışlarıyla bir üst destek kategorisi olan 1000 J değerinin arandığı 7'ye geçilebileceği şeklinde yorumlanabilir. Benzer şekilde elde edilen sonuç, narinlik oranının, beton optimizasyonu, maliyeti ve işlenilebilirliği hususlarında, önemli bir mühendislik parametresi olarak değerlendirilebileceği şeklinde yorumlanabilir.



KAYNAKLAR

- ACI Committee 544.** (1996). *State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, ACI 544.1R-96, American Concrete Institute, Michigan.
- ACI Committee 544.** (2018). *State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, ACI 544.4R-18, American Concrete Institute, Michigan.
- Afrouhsabet, V., Biolzi, L., & Monteiro, P.J.M.** (2018). *The Effect Of Steel And Polypropylene Fibers On The Chloride Diffusivity And Drying Shrinkage Of High-Strength Concrete*, Composites Part B (Vol. 139, pp. 84–96).
- Alhozaimy, A.M., Soroushian, P., & Mirza, F.** (1995). *Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials*, Cement and Concrete Composites 18(2) (pp. 85-92).
- Anderson, T. L.** (1991), *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, Retrieved from https://books.google.nl/books?id=K_0hiig1co4C&printsec=frontcover&hl=tr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Original work published 1991).
- Anshuang, S.U., & Yuebo, C.A.I.** (2013). *Influence of Aspect Ratio of Macro Synthetic Fiber on Mechanical Properties of Shotcrete*, Advanced Materials Research (Vol. 652-654, pp 1226-1232).
- Arioğlu, E., Yüksel, A., ve Yılmaz, A. O.** (2008) *Püskürtme Beton Bilgi Föyleri-Çözümlü Problemler*, TMMOB Maden Müh. Odası İstanbul Şubesi, Mayıs, İstanbul.
- ASTM** (2012). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. ASTM International, C1550-12a.
- ASTM** (2012). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. ASTM International, C1609 / C1609M - 12.
- Barton, N., & Choubey, V.** (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*, Rock Mechanics and Rock Engineering, s. Vol. 10, pp 1- 54.
- Bentur, A., & Mindess, S.** (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Modern Concrete Technology Series, Oxford (pp.267-268).
- Brandt, A. M.** (1995). *Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance*, E & FN Spon, London. Retrieved from <https://books.google.nl/books?id=jUxZDwAAQBAJ&> (Original work published 1995).

- Grimstad, E., & Barton, N.** (1993), *Updating of the Q-system for NMT*. International Symposium on Sprayed Concrete (pp. 46–66).
- Hameed, R., Turatsinze A., Duprat F., & Sellier A.** (2009). *Metallic Fiber Reinforced Concrete: Effect Of Fiber Aspect Ratio On The Flexural Properties*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Retrieved July 2009, from https://www.researchgate.net/publication/238093412_Metallic_fiber_reinforced_concrete_Effect_of_fiber_aspect_ratio_on_the_flexural_properties
- Hasaba, S., Kawamura, M., Koizumi, T., ve Takemoto, K.,** (1984). *Resistibility against impact load and deformation characteristics under bending load in polymer and hybrid (polymer and steel) fiber reinforced concrete*, in G.C. Hoff (ed.) *Fiber Reinforced Concrete*, ACI SP-81, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI (pp. 187–196).
- Juhász, K. P., & Kis, V.** (2017). *The effect of the length of macro synthetic fibres on their performance in concrete*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 246.
- Karayolları Teknik Şartnamesi** (2013), Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara (Vol. 351, pp 1-56).
- Karpuz, C., & Hindistan, M. A.,** (2006). *Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları* (pp 221-222), TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.
- Kalpakkian, S., & Schmid, S. R.** (2014). *Manufacturing Engineering and Technology*. Singapore: Pearson. Retrieved from https://books.google.com.tr/books/about/Manufacturing_Engineering_and_Technology.html?id=frF9MgEACAAJ&redir_esc=y
- Kaya, E.** (2002). *Kaya Mekaniği Ders Notları*, Pamukkale Üniversitesi, Retrieved from <http://eakyol.pamukkale.edu.tr/notlararayuz.html>
- Medina, N. F., Barluenga, G., Herdandez-Olivares, F.** (2015). *Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement*, Construction and Building Materials (Vol. 96, pp. 556–566).
- Moghimi, G.** (2014). *Behavior of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11129/1606>
- Monteiro, V., & Andrade Silva, F.** (2021). *On the design of the fiber reinforced shotcrete applied as primary rock support in the Cuiab'a underground mining excavations: A case study*, Case Studies in Construction Materials (Vol. 15). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521002990>
- Morgan, D., & Bernard, S. A.** *Brief History of Shotcrete in the Underground Industry*, American Shotcrete Association, Retrieved 2017, from https://shotcrete.org/wp-content/uploads/2020/05/2017Fal_Morgan-Bernard.pdf

- Norwegian Geotechnical Institute** (2015) *Using the Q-system, rock mass classification and support design*. NGI, Norway.
- Ozturk, C. A., Dogan, E., Donmez, M. S., ve Karaman, E.** (2021) *Ground Support Design of Underground Openings in Seismically Active Mine: A Case Study from a Lead and Zinc Underground Mine*, Geotechnical and Geological Engineering, Springer Nature Switzerland, 39, 2707-2726.
- Öztürk, Ç.** (2018). *High performance macro synthetic fiber reinforced concrete*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara. Retrieved from <https://open.metu.edu.tr/bitstream/handle/11511/27222/index.pdf>
- Rilem Tc 162-Tdf** (2003). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*, Materials and Structures / Matériaux et Constructions (Vol. 36, pp. 560-567).
- Rabcewicz L.** (1964). *The New Austrian Tunnelling Method*, Part one, Water Power, November 1964. Retrieved from <https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc547/lecture-material/Rabcewicz-NATM.pdf>
- Singh, S. K.** (2011). *Polypropylene Fiber Reinforced Concrete: An Overview*. Retrieved from <https://www.nbmcw.com/product-technology/construction-chemicals-waterproofing/concrete-admixtures/pfr.html>
- Spadea, G., ve Frigione, G.** (1987). *Mechanical and rheological behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete*, Il Cemento (Vol 2, pp 173–185).
- Teichert, P., & Akeley, C.** (2002). *A Tribute to the Founder of Shotcrete*, American Shotcrete Association.
- The British Tunnelling Society** (2012) *Monitoring Underground Construction* (Vol. 203, pp 29-30), London.
- The Concrete Society** (2016). *Concrete Industrial Ground Floors, A guide to design and construction* (Rapor no 34). Surrey : The Concrete Society.
- Ulusay, R., & Sönmez, H.** (2007). *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara.
- Xu, H., Mindess, S., & Duca, I. J.** (2004). *Performance of Plain and Fiber Reinforced Concrete Panels Subjected To Low Velocity Impact Loading*. 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC) (pp. 1257 - 1268).



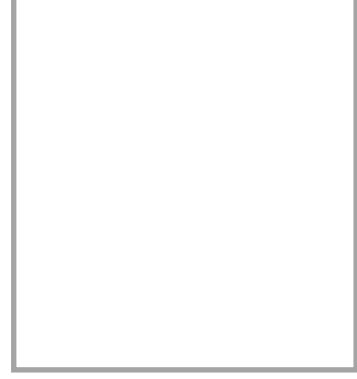
EKLER

EK-A Denklemler Listesi

(2.1)	20
(2.2)	26
(2.3)	27
(2.4)	27
(2.5)	28
(2.6)	28
(2.7)	28
(2.8)	28
(2.9)	28
(2.10)	28
(2.11)	33
(3.1)	38
(3.2)	44
(4.1)	62



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad

: Lühan Arda BAYRAKTAROĞLU



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Yüksek Lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Müh. Ana Bilim Dalı
- **Lisans** : 2012, İstanbul Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012 – 2014 : Spektra Jeotek (Şantiye Şefi) - Yurtdışı Projeler
- 2014 – 2015 : Tolsa Turkey (Maden Sahaları Sorumlusu) – Ankara/ Türkiye
- 2015 – 2017 : MCI Group (Genel Müdür Yard.) - İstanbul/ Türkiye
- 2017 – 2021 : ICT İnşaat (Bölgesel Satış Sorumlusu) - İstanbul/Türkiye
- 2021 – : Kordsa Teknik Tekstil A.Ş. (Müşteri Yöneticisi) – İstanbul/Türkiye