

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**IŞIK GEÇİREN BETONUN OPTİK FİBER ORANLARI VE
YERLEŞİMLERİNE GÖRE ÖZELLİKLERİNİ İNCELEMeye YÖNELİK
DENEYSEL BİR ÇALIŞMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinem EMANET

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

Ocak, 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**IŞIK GEÇİREN BETONUN OPTİK FİBER ORANLARI VE
YERLEŞİMLERİNE GÖRE ÖZELLİKLERİNİ İNCELEMeye YÖNELİK
DENEYSEL BİR ÇALIŞMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sinem EMANET
502181516**

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Halet Almila BÜYÜKTAŞKIN

Ocak, 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 502181516 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sinem EMANET, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Işık Geçiren Betonun Optik Fiber Oranları ve Yerleşimlerine Göre Özelliklerini İncelemeye Yönelik Deneysel Bir Çalışma” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi H. Almila BÜYÜKTAŞKIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

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

Dr. Öğr. Üyesi Meltem ŞAHİN
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

Teslim Tarihi : 29 Aralık 2021
Savunma Tarihi : 13 Ocak 2022





Aileme ve sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında ışık geçiren betonun üretimi ve malzeme özelliklerinin araştırılmasının yanında ışık geçiren betonun optik fiber oranları ve yerleşimlerine göre özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için deneysel çalışmayla desteklenerek kapsamlı bir inceleme yapılmıştır.

Öncelikle yaptığım çalışmayla ilgili ilgi ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Halet Almila BÜYÜKTAŞKIN'a teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmam için Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. firmasının Düzce'de yer alan AR-GE Merkezi olanaklarını kullanmama imkan sağlayan ve deneylerin yapılması için destek vermeyi kabul eden Fibrobeton Yönetim Kurulu Üyesi Sn. Muhammed MARAŞLI'ya, deneysel çalışmalarım sırasında malzeme ve cihaz temini gibi ihtiyaçlarımın karşılanmasında yardımcı olan ve deneyler boyunca yardımlarını esirgemeyen Laboratuvar ve AR-GE Şefi Sn. Volkan ÖZDAL'a, deneysel çalışmalarımı gerçekleştirirken kalıp hazırlık sürecinde bana yardımcı olan Sn. AR-GE Müh. Ahmet SEVEN'e, deneylerin yapılması sırasında yardımlarını esirgemeyen Sn. AR-GE Müh. Sefa GÜNTEPE'ye ve teknik destek sağlayan tüm Fibrobeton Yapı Elemanları çalışanlarına teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ocak 2022

Sinem Emanet
(Mimar, İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxix
SUMMARY	xxxii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tez Çalışmasının Amacı	2
1.2 Tez Çalışmasının Kapsamı	2
1.3 Tez Çalışmasının Yöntemi	3
1.3.1 Literatür araştırması	3
1.3.2 Deneysel çalışma	3
2. IŞIK GEÇİREN BETON	5
2.1 Tarihsel Gelişim	5
2.2 Işık Geçiren Beton Özellikleri	7
2.3 Işık Geçiren Betonda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	8
2.3.1 Beton ve Bileşenleri	8
2.3.1.1 Çimento	9
2.3.1.2 Su	11
2.3.1.3 Agregası	11
2.3.1.4 Katkı maddeleri	12
2.3.2 Betonun mekanik özellikleri	13
2.3.2.1 Betonun basınç dayanımı	13
2.3.2.2 Betonun gerilme-deformasyon özellikleri	13
2.3.2.3 Betonun çekme dayanımı	14
2.3.3 Optik fiber	15
2.3.3.1 Plastik optik fiber	16
2.3.3.2 Cam optik fiber	17
2.3.4 Işık geçirimi için kullanılan diğer malzemeler	17
2.3.4.1 Atık cam	17
2.3.4.2 Reçine	18
2.4 Işık Geçiren Beton Üretimi ve Kullanımı	19
2.4.1 Üretim yöntemleri	19
2.4.1.1 Litracon	19
2.4.1.2 Lucem	21
2.4.1.3 Italcementi	21
2.5 Dünya'dan ve Türkiye'den Üretici Firmalar	22
2.5.1 Litracon	22

2.5.1.1 Litracon ürünleri.....	22
2.5.2 Lucem.....	23
2.5.2.1 Lucem ürünleri	23
2.5.3 Luccon ve Luccon ürünleri	25
2.5.4 Fibrobeton ve Fibrobeton ürünleri	26
2.6 Uygulama Örnekleri	27
2.7 Daha Önce Yapılan Deneysel Çalışmalar	36
2.7.1 Kullanılan parametreler.....	36
2.7.1.1 Farklı optik fiber oranı ve optik fiber çapı	36
2.7.1.2 Farklı yerleşim.....	38
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	41
3.1 Kullanılan Malzemeler	42
3.1.1 “0,5 mm” çaplı optik fiber.....	42
3.1.2 “2 mm” çaplı PMMA tüpler.....	43
3.1.3 Beton	44
3.1.3.1 Çimento	44
3.1.3.2 Agregası	45
3.1.3.3 Mineral katkı - Metakaolin (MTKL).....	45
3.1.3.4 Akrilik esaslı polimer	46
3.1.3.5 Süper akışkanlaştırıcı	46
3.1.3.6 Su.....	46
3.2 Deney Yöntemi.....	47
3.2.1 Deneysel Çalışma Planı.....	47
3.3 Numune Özellikleri	48
3.3.1 REF numune grubu	49
3.3.2 AR1 numune grubu	49
3.3.3 AR2 numune grubu	51
3.3.4 PX numune grubu.....	52
3.4 Numunelerin Üretim Süreci	52
3.4.1 Numune tiplerine göre desenlerin oluşturulması	52
3.4.2 Üretim yönteminin belirlenmesi.....	53
3.4.3 Kalıpların hazırlanması	55
3.4.3.1 AR1 ve AR2 numune grupları	55
3.4.3.2 PX numune grubu.....	58
3.4.4 Beton dökümü	59
3.4.5 Kesim işlemi.....	61
3.5 Üretilen Numune Tipleri	63
3.5.1 REF numune grubu	63
3.5.2 AR1 numune grubu	63
3.5.3 AR2 numune grubu	66
3.5.4 PX numune grubu.....	68
3.6 Deneysel Parametreler.....	69
3.7 Uygulanan Deney Tipleri	69
3.7.1 Çökme (Slump) deneyi.....	69
3.7.2 Eğilme dayanımı deneyi.....	70
3.7.3 Basınç dayanımı deneyi	71
3.7.4 Işık geçirgenlik deneyi	71
3.7.5 Durabiliteyi belirlemeye yönelik uygulanan yaşlandırma koşulları	72
3.7.5.1 Islanma-kuruma çevrimleri	72
3.7.5.2 Donma-çözülme çevrimleri.....	73

3.7.5.3 Yüksek sıcaklık etkisi	73
3.8 Deneylerde Kullanılan Cihazlar	76
3.8.1 Kuru hava etüvü	76
3.8.2 Donma-çözülme cihazı	77
3.8.3 Beton basınç dayanım deney presi	77
3.8.4 Beton eğilme dayanım deney presi	78
3.8.5 Lüksmetre (Luxmeter)	79
3.8.6 Dijital kumpas	80
3.8.7 Hassas terazi	80
3.9 Üretilen Numune Gruplarına Göre Uygulanan Deneyler	81
3.9.1 Referans numune grubuna uygulanan deneyler	81
3.9.1.1 REF grubu, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deneyi	81
3.9.1.2 REF grubu, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyi	81
3.9.1.3 REF grubu ışık geçirgenlik testi	81
3.9.2 AR1 numune grubuna uygulanan deneyler	82
3.9.2.1 AR1 grubu, 28 günlük eğilme dayanımı deneyi	82
3.9.2.2 AR1 grubu, 28 günlük basınç dayanımı deneyi	83
3.9.2.3 AR1 grubu, ışık geçirgenlik testi	84
3.9.2.4 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası yapılan deneyler	85
3.9.3 AR2 numune grubuna uygulanan deneyler	88
3.9.3.1 AR2 grubu, 28 günlük eğilme dayanımı deneyi	88
3.9.3.2 AR2 grubu, 28 günlük basınç dayanımı deneyi	89
3.9.3.3 AR2 grubu, ışık geçirgenlik testi	90
3.9.4 PX numune grubuna uygulanan deneyler	91
3.9.4.1 PX grubu, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deneyi	91
3.9.4.2 PX grubu, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyi	91
3.9.4.3 PX grubu, ışık geçirgenlik testi	92
3.9.4.4 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası yapılan deneyler	92
3.10 Deney Sonuçları	95
3.10.1 REF grubu deney sonuçları	95
3.10.1.1 REF grubu 7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları	95
3.10.1.2 REF grubu 7 ve 28 günlük basınç testi sonuçları	96
3.10.1.3 REF grubu ışık geçirgenlik testi sonuçları	97
3.10.2 AR1 grubu deney sonuçları	97
3.10.2.1 AR1 grubu, 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları	97
3.10.2.2 AR1 grubu 28 günlük basınç dayanım testi sonuçları	99
3.10.2.3 AR1 grubu ışık geçirgenlik testi sonuçları	100
3.10.2.4 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası deney sonuçları	101
3.10.3 AR2 grubu deney sonuçları	109
3.10.3.1 AR2 grubu, 28 günlük eğilme testi sonuçları	109
3.10.3.2 AR2 grubu 28 günlük basınç testi sonuçları	110
3.10.3.3 AR2 grubu ışık geçirgenlik testi sonuçları	111
3.10.4 PX grubu deney sonuçları	112
3.10.4.1 PX grubu 7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları	112
3.10.4.2 PX grubu 7 ve 28 günlük basınç testi sonuçları	113
3.10.4.3 PX grubu ışık geçirgenlik testi sonuçları	113
3.10.4.4 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası deney sonuçları	114
4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	119
4.1 REF, AR1 ve AR2 Grubu 28 Günlük Dayanımlarının Karşılaştırılması	119
4.1.1 Eğilme dayanımı	119

4.1.2 Basınç dayanımı	121
4.2 REF, AR1 ve AR2 Grubu Işık Geçirgenliklerinin Karşılaştırılması	122
4.3 Hızlandırılmış Yaşlandırma Koşullarının AR1 Grubu Özelliklerine Etkisi...	124
4.3.1 Dayanıma etkisi.....	124
4.3.2 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası ağırlık ve boy değişimleri	127
4.3.3 Yüksek sıcaklığın ışık geçirgenliğine etkisi.....	129
4.4 Hızlandırılmış Yaşlandırma Koşullarının PX Grubunun Özelliklerine Etkisi	130
4.4.1 Dayanıma etkisi.....	130
4.4.2 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası ağırlık ve boy değişimleri	132
4.4.3 Yüksek sıcaklığın ışık geçirgenliğine etkisi.....	133
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR.....	141
EKLER	145
ÖZGEÇMİŞ.....	179



KISALTMALAR

AFS	: American Foundry Society
ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
CIE Kurumu)	: Commission Internationale de l'Eclairage (Uluslararası Aydınlatma
GGBS	: Ground Granulated Blast Furnace Slag
GI	: Graded-Index
LED	: Light Emitting Diode
LCD	: Liquid Crystal Display
MCC	: Mitsubishi Chemical Corporation
MMF	: Multi-Mode-Fiber
MTKL	: Metakaolin
PID	: Proportional Integral Derivative
PLC	: Programmable Logic Controller
PMMA	: Poly Methyl Methacrylate (Polimetil Metakrilat)
POF	: Plastic Optical Fiber (Plastik Optik Fiber)
RWTH	: Rheinisch Westfälische Technische Hochschule
SI	: Step-Index
SMF	: Single-Mode-Fiber
UV	: Ultraviyole



SEMBOLLER

b	: Kesit genişliği
cm	: Santimetre
dB	: Desibel
h	: Kesit yüksekliği
kN	: Kilonewton
kg	: Kilogram
l	: Mesnet açıklığı
lt	: Litre
m	: Metre
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
µm	: Mikrometre
m³	: Metreküp
m²	: Metrekare
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
P	: Yük
sn	: Saniye
W	: Watt
°C	: Santigrat derece
σ_c	: Betonun gerilmesi
ε_c	: Betonun birim şekil değiştirmesi
Ø	: Çap
τ_t	: Toplam ışık geçirgenliği
τ₁	: Numune yokken geçen ışık miktarı
τ₂	: Numuneden geçen ışık miktarı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çimento türleri.	9
Çizelge 2.2 : Farklı üreticilere ait ışık geçiren beton özellikleri.....	27
Çizelge 3.1 : ESKA CK-20 optik fiber özellikleri [36].....	43
Çizelge 3.2 : Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri [37].....	44
Çizelge 3.3 : Kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri [37].....	44
Çizelge 3.4 : Kullanılan silis kumunun elek analizine ait değerler.	45
Çizelge 3.5 : Kullanılan metakaolinin (MTKL) kimyasal özellikleri.....	45
Çizelge 3.6 : Kullanılan polimerin fiziksel özellikleri [38].....	46
Çizelge 3.7 : BUILDENT WR-780 fiziksel özellikleri [39].....	46
Çizelge 3.8 : Kullanılan suyun özellikleri.	47
Çizelge 3.9 : Kullanılan karışım oranları.....	47
Çizelge 3.10 : Deneysel çalışma planı.	48
Çizelge 3.11 : Etüvün teknik özellikleri [43].....	76
Çizelge 3.12 : Basınç dayanım presi teknik özellikleri [45].....	77
Çizelge 3.13 : Eğilme deney presi teknik özellikleri [46].	78
Çizelge 3.14 : PCE-174 lüksmetre teknik özellikleri [47].....	79
Çizelge 3.15 : REF numune grubu, eğilme dayanım testi sonuçları.	96
Çizelge 3.16 : REF grubu, basınç dayanım testi sonuçları.	96
Çizelge 3.17 : AR1 grubu, 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları.	98
Çizelge 3.18 : AR1 grubu, 28. gün basınç dayanım testi sonuçları.....	99
Çizelge 3.19 : AR1 grubu, ışık geçirgenlik testi sonuçları.	101
Çizelge 3.20 : AR1 grubu, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanım testi sonuçları.....	103
Çizelge 3.21 : AR1 grubu, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası eğilme dayanım testi sonuçları.....	103
Çizelge 3.22 : AR1 grubu, donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanım testi sonuçları.....	105
Çizelge 3.23 : AR1 grubu, donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanım testi sonuçları.....	105
Çizelge 3.24 : AR1 grubu (kısa doğrultu), yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası ışık geçirgenlik testi sonuçları.	106
Çizelge 3.25 : AR1 grubu, yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım testi sonuçları.....	107
Çizelge 3.26 : AR1 grubu, yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım testi sonuçları.....	107
Çizelge 3.27 : AR2 grubu, 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları.....	109
Çizelge 3.28 : AR2 grubu, 28 günlük basınç dayanım testi sonuçları.....	111
Çizelge 3.29 : AR2 grubu, ışık geçirgenlik testi sonuçları.	112
Çizelge 3.30 : PX grubu, 7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları.....	112
Çizelge 3.31 : PX grubu, basınç dayanım testi sonuçları.	113

Çizelge 3.32 : PX grubu, ışık geçirgenlik testi sonuçları.....	114
Çizelge 3.33 : PX grubu, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanım testi sonucu.	115
Çizelge 3.34 : PX grubu, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası eğilme dayanım testi sonucu.	115
Çizelge 3.35 : PX grubu, donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanım testi sonucu.	116
Çizelge 3.36 : PX grubu, donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanım testi sonucu.	117
Çizelge 3.37 : PX grubu, yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası ışık geçirgenlik testi sonuçları.	117
Çizelge 3.38 : PX grubu, yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım testi sonucu.....	118
Çizelge 3.39 : PX grubu, yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım testi sonucu.	118
Çizelge 4.1 : AR1 grubu, ağırlık ölçümleri (K: kısa doğrultu).	127
Çizelge 4.2 : AR1 grubu, ağırlık ölçümleri (U: uzun doğrultu).	128
Çizelge 4.3 : PX grubu, ağırlık ölçümleri.	132
Çizelge B.1 : REF grubu numuneleri, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.	150
Çizelge B.2 : AR1 grubu numuneleri, 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.....	150
Çizelge B.3 : AR2 grubu numuneleri, 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.	151
Çizelge B.4 : PX grubu numuneleri, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.	151
Çizelge B.5 : AR1 grubu numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.	152
Çizelge B.6 : PX grubu numuneleri, ıslanma-kuruma ve donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.	152
Çizelge B.7 : AR1 grubu numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.	153
Çizelge B.8 : PX grubu numuneleri, yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.	153
Çizelge B.9 : AR1 grubu numuneleri, yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.	154
Çizelge B.10 : REF grubu numuneleri, 7 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.....	154
Çizelge B.11 : REF grubu numuneleri, 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.....	155
Çizelge B.12 : AR1 grubu numuneleri, 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.....	155
Çizelge B.13 : AR2 grubu numuneleri, 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.....	156
Çizelge B.14 : PX grubu numuneleri, 7 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.	156
Çizelge B.15 : PX grubu numuneleri, 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.....	157
Çizelge B.16 : AR1 grubu numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.	157
Çizelge B.17 : PX grubu numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.	158

Çizelge B.18 : AR1 grubu numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.	158
Çizelge B.19 : PX grubu numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.	159
Çizelge B.20 : AR1 grubu numuneleri, yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.	159
Çizelge B.21 : PX grubu numuneleri, yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.	160





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Işık geçiren beton (Lucem, Urban Star Sculpture) [2].	5
Şekil 2.2 : Optik liflerin dokuma (tekstil) haline getirilmesi [6].	6
Şekil 2.3 : Optik liflerin kalıba yerleştirilmesi ve blokların kesilmesi [6].	7
Şekil 2.4 : Beton gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi (basitleştirilmiş).	14
Şekil 2.5 : Beton kırıta eğilme deneyi (4 noktalı eğilme deneyi).	14
Şekil 2.6 : Optik fiber yapısı.	15
Şekil 2.7 : Işığın optik fiberde yayılışı a) tek modlu fiber (SMF), b) SI çok modlu fiber (MMF), c) GI çok modlu fiber (MMF).	16
Şekil 2.8 : Atık cam içeren ışık geçiren beton panel [18].	18
Şekil 2.9 : Polimer reçine içeren ışık geçiren beton panel [5].	18
Şekil 2.10 : Litracon'un kullandığı üretim metodu [20].	20
Şekil 2.11 : Litracon'un kullandığı üretim metodu [21].	20
Şekil 2.12 : Lucem'in kullandığı üretim metodu [22].	21
Şekil 2.13 : Italcementi'nin kullandığı üretim metodu [23].	21
Şekil 2.14 : "Litracon Classic" ürünü [4].	22
Şekil 2.15 : "Litracon pXL" ürünü [24].	23
Şekil 2.16 : "Lucem Line" ürünü [25].	24
Şekil 2.17 : "Lucem Starlight" ürünü [25].	24
Şekil 2.18 : "Lucem Pure" ürünü [25].	25
Şekil 2.19 : "Lucem Label" ürünü [25].	25
Şekil 2.20 : "Luccon" ürünü [26].	26
Şekil 2.21 : "Fibro-Transbeton" ürünü.	26
Şekil 2.22 : İtalyan Pavyonu dış ve iç görünüşü [28].	27
Şekil 2.23 : Al Aziz Cami, dış görünüşü [2].	28
Şekil 2.24 : Al Aziz Cami, panel görünüşü [2].	28
Şekil 2.25 : "Halifax Anıtı" görünüşü [30].	29
Şekil 2.26 : "Garden Pavyonu (Pavilion)" görünüşü [31].	29
Şekil 2.27 : "Garden Pavyonu (Pavilion)" sistem görünüşü [31].	30
Şekil 2.28 : Sergi elemanı olarak kullanılan ışık geçiren beton panel [30].	30
Şekil 2.29 : Iberville Parish Gazileri Anıtı [30].	31
Şekil 2.30 : Macaristan'da Erzsebet bankları [30].	31
Şekil 2.31 : Japonya'da Stüdyo Hibiya [30].	31
Şekil 2.32 : Cella Septichora Müzesi girişi [30].	32
Şekil 2.33 : Hansa Carrée lobisi [2].	32
Şekil 2.34 : Georgia Bankası, içeriden görünüm [32].	33
Şekil 2.35 : Georgia Bankası, koridor görünümü [32].	33
Şekil 2.36 : Münih Havalimanı bankları [2].	33
Şekil 2.37 : Işık geçiren betondan üretilen ofis mobilyası [2].	34
Şekil 2.38 : Işık geçiren betondan üretilen ofis mobilyası [2].	34
Şekil 2.39 : Işık geçiren betondan üretilen kent mobilyaları [2].	34

Şekil 2.40 : Luccon firması, ışık geçiren beton cephe paneli ve kent mobilyası uygulaması [26].	35
Şekil 2.41 : Luccon firması, ışık geçiren beton mobilya uygulaması [26].	35
Şekil 2.42 : Luccon firması, ışık geçiren beton panel uygulaması [26].	35
Şekil 2.43 : 2 mm ve 3 mm çaplı optik fiberlerden üretilen numuneler [33].	36
Şekil 2.44 : Optik fiber tekstilin çubuklar etrafında sarılması [1].	37
Şekil 2.45 : Üretilen panel görünümü [1].	37
Şekil 2.46 : Kalıp hazırlanması [34].	37
Şekil 2.47 : Üretilen numune görünümleri [34].	38
Şekil 2.48 : Numunelerin üretilmesi [7].	38
Şekil 2.49 : Üretilen numune görünümleri [35].	39
Şekil 3.1 : 0,5 mm çaplı optik fiber.	42
Şekil 3.2 : 2 mm çaplı PMMA tüpler.	43
Şekil 3.3 : Üretilen numune tipleri.	49
Şekil 3.4 : AR1 grubu, uzun doğrultuda (U) optik fiber yerleşen numune tipleri.	50
Şekil 3.5 : AR1 grubu, kısa doğrultuda (K) optik fiber yerleşen numune tipleri.	50
Şekil 3.6 : AR2 grubu, kısa doğrultuda (K) optik fiber yerleşen numune tipleri.	51
Şekil 3.7 : AR2 grubu, uzun doğrultuda (U) optik fiber yerleşen numune tipleri.	52
Şekil 3.8 : PX grubu, PMMA ünite içeren numune tipi.	52
Şekil 3.9 : Deneme üretimi, kalıp hazırlanması.	53
Şekil 3.10 : Deneme üretimi, döküm yapılması.	53
Şekil 3.11 : Deneme üretimi, düzgün yerleşmemiş optik fiberler.	54
Şekil 3.12 : 2. Deneme üretimi, karşılıklı geçirilen optik fiberler.	54
Şekil 3.13 : 2. Deneme üretimi, kalıp üstten görünümü.	54
Şekil 3.14 : 2. Deneme üretimi, düzenli yerleşmiş optik fiberler.	55
Şekil 3.15 : Karşılıklı olarak elek telinden geçirilen optik fiberler.	55
Şekil 3.16 : Hazırlanan ahşap kalıbın üç boyutlu çizimi.	56
Şekil 3.17 : Hazırlanan kalıp planı ve metal çerçeve görünüşü.	56
Şekil 3.18 : Optik fiberlerin örülmesi sırasında kalıpta bırakılan boşluklar.	57
Şekil 3.19 : Hazırlanan kalıbın dıştan görünümü.	57
Şekil 3.20 : PMMA ünitelerin birleşim noktaları.	58
Şekil 3.21 : Hazırlanan kalıbın üstten görünümü.	58
Şekil 3.22 : Beton döküm işlemi (AR1 numune grubu).	59
Şekil 3.23 : AR2 numune grubu, beton dökümü sonrası görünüm.	59
Şekil 3.24 : Beton döküm işlemi (PX numune grubu).	60
Şekil 3.25 : Beton yüzeyinin düzeltilmesi - mastarlama.	60
Şekil 3.26 : Üretilen taze betonun üzerinin kapatılması.	60
Şekil 3.27 : Kesim işleminin yapılması.	61
Şekil 3.28 : AR1 grubu için üretilen ışık geçiren beton bloğun kesim şablonu.	61
Şekil 3.29 : AR2 grubu için 40 mm kalınlığında kesilen bir panel üzerinde gösterilen kesim şablonu.	62
Şekil 3.30 : Kesimi yapılan PX grubu numunelerinin üstten görünümü.	62
Şekil 3.31 : Kesimi yapılan PX grubu numunelerinin üstten görünümü.	62
Şekil 3.32 : REF grubu numunelerin görünümü.	63
Şekil 3.33 : AR1-1-K numunesi görünümü.	63
Şekil 3.34 : AR1-1-U numunesi görünümü.	64
Şekil 3.35 : AR1-1-U numunelerinin üstten görünümü.	64
Şekil 3.36 : AR1-2-K numunesi görünümü.	64
Şekil 3.37 : AR1-2-K numuneleri üstten görünümü.	64
Şekil 3.38 : AR1-2-U numunesi görünümü.	65

Şekil 3.39 : AR1-3-K numunesi görünümü.....	65
Şekil 3.40 : AR1-3-U numunesi görünümü.....	65
Şekil 3.41 : AR1-3-U numunelerinin üstten görünümü.....	65
Şekil 3.42 : AR2-1-K numunesi görünümü.....	66
Şekil 3.43 : AR2-1-U numunesi görünümü.....	66
Şekil 3.44 : AR2-1-U numunelerinin üstten görünümü.....	66
Şekil 3.45 : AR2-2-K numunesi görünümü.....	67
Şekil 3.46 : AR2-2-U numunesi görünümü.....	67
Şekil 3.47 : AR2-2-K ve AR2-2-U numunelerinin üstten görünümü.....	67
Şekil 3.48 : AR2-3-K numunesi görünümü.....	67
Şekil 3.49 : AR2-3-U numunesi görünümü.....	68
Şekil 3.50 : AR2-3-U numunelerinin üstten görünümü.....	68
Şekil 3.51 : PX grubu, numunenin önden görünümü.	68
Şekil 3.52 : PX grubu, numunenin üstten görünümü.	68
Şekil 3.53 : Üretilen numune gruplarına göre yapılan deneyler.....	69
Şekil 3.54 : Çökme (Slump) deneyinin yapılması.	70
Şekil 3.55 : 3 noktalı eğilme deneyi şematik gösterimi [41].	70
Şekil 3.56 : Işık geçirgenlik deneyi için hazırlanan düzeneğin 3 boyutlu modeli.	71
Şekil 3.57 : Işık geçirgenlik deney düzeneği.	72
Şekil 3.58 : Optik fiberlerin etüve konulması.....	74
Şekil 3.59 : 110 °C sıcaklıktan sonra PMMA tüplerde kısılma.	74
Şekil 3.60 : 90 °C sıcaklığa maruz kalmış numune.	75
Şekil 3.61 : 160 °C sıcaklığa maruz kalmış numune.	75
Şekil 3.62 : 150 °C sıcaklığa maruz kalmış numune.	75
Şekil 3.63 : 160 °C sıcaklığa maruz kalmış numune.	76
Şekil 3.64 : FN400 etüv görünümü.	76
Şekil 3.65 : Donma-çözülme cihazı görünümü.	77
Şekil 3.66 : EN kaynaklı beton basınç dayanım deney presi.....	78
Şekil 3.67 : Servo kontrollü otomatik eğilme deney presi.....	79
Şekil 3.68 : Lüksmetre cihazı görünümü.	80
Şekil 3.69 : Dijital kumpasın görünümü.....	80
Şekil 3.70 : Hassas terazi görünümü.....	80
Şekil 3.71 : REF grubu, 28 günlük eğilme dayanım testi.....	81
Şekil 3.72 : REF grubu, 28 günlük basınç dayanım testi.....	81
Şekil 3.73 : REF grubu numunesi, ışık geçirgenlik testi.	82
Şekil 3.74 : AR1 numune grubu, 28 günlük eğilme dayanım testleri.....	82
Şekil 3.75 : AR1-1-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.....	83
Şekil 3.76 : AR1-2-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.....	83
Şekil 3.77 : AR1-3-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.....	83
Şekil 3.78 : Işık geçirgenlik deney düzeneği.	84
Şekil 3.79 : AR1 grubu numuneleri, ışık geçirgenlik testi.	84
Şekil 3.80 : Etüvde kurumaya bırakılan AR1 grubu numuneleri.	85
Şekil 3.81 : Islanmaya bırakılan AR1 grubu numuneleri.	85
Şekil 3.82 : Numuneye uygulanan eğilme dayanımı testi (AR1-2-K).....	86
Şekil 3.83 : Numuneye uygulanan basınç dayanımı testi (AR1-2-K).	86
Şekil 3.84 : Donma-çözülme cihazına bırakılan AR1 grubu numuneleri.....	86
Şekil 3.85 : Yüksek sıcaklık uygulanmadan önceki numune görünümleri.	87
Şekil 3.86 : Yüksek sıcaklık uygulandıktan sonraki numune görünümleri.	87
Şekil 3.87 : Numuneye uygulanan eğilme dayanımı testi (AR1-2-K).....	88
Şekil 3.88 : Numuneye uygulanan basınç dayanımı testi (AR1-2-K).	88

Şekil 3.89 : Numuneye uygulanan ışık geçirgenlik testi (AR1-1-K).....	88
Şekil 3.90 : AR2 grubu numuneleri, 28 günlük eğilme dayanım testi.....	89
Şekil 3.91 : AR2-1-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.....	89
Şekil 3.92 : AR2-2-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.....	90
Şekil 3.93 : AR2-3-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.....	90
Şekil 3.94 : AR2 grubu numuneleri, ışık geçirgenlik testi.....	90
Şekil 3.95 : PX grubu numunesi, 28 günlük eğilme dayanım testi.....	91
Şekil 3.96 : PX numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.....	91
Şekil 3.97 : PX grubu numunesi, ışık geçirgenlik testi.....	92
Şekil 3.98 : Etüvde kurumaya bırakılan PX grubu numuneleri.	92
Şekil 3.99 : Islanmaya bırakılan PX grubu numuneleri.	93
Şekil 3.100 : Numuneye uygulanan eğilme dayanımı testi.	93
Şekil 3.101 : Numuneye uygulanan basınç dayanımı testi.	93
Şekil 3.102 : Donma çevrimi.	94
Şekil 3.103 : Çözülme çevrimi.	94
Şekil 3.104 : Yüksek sıcaklık uygulandıktan sonraki numune görünüşleri.	94
Şekil 3.105 : Yüksek sıcaklık uygulanmadan önce yapılan ışık geçirgenlik testi.	95
Şekil 3.106 : Numuneye uygulanan basınç dayanımı testi.	95
Şekil 3.107 : REF grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	96
Şekil 3.108 : REF grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.	97
Şekil 3.109 : AR1 grubu (U) numunesi, eğilme deneyi sonrası görünüm.	98
Şekil 3.110 : AR1-1-K numuneleri, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	98
Şekil 3.111 : AR1-1-U numuneleri, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	99
Şekil 3.112 : AR1-1 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.	100
Şekil 3.113 : AR1-1-U numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.	101
Şekil 3.114 : AR1-1-K numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.	101
Şekil 3.115 : AR1-2-U numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.	102
Şekil 3.116 : AR1-2-K numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.	102
Şekil 3.117 : AR1-3-U numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.	102
Şekil 3.118 : AR1-3-K numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.	102
Şekil 3.119 : Islanma-kuruma sonrası optik fiber çevrelerinde görülen beyaz tabaka.	103
Şekil 3.120 : AR1-1-K numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm.	104
Şekil 3.121 : AR1-1-U numunesi, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm. ..	104
Şekil 3.122 : AR1-2-K numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm.	104
Şekil 3.123 : AR1-2-U numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm.	104
Şekil 3.124 : AR1-3-K numunesi, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm. ..	104
Şekil 3.125 : AR1-3-U numunesi, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm. ..	105
Şekil 3.126 : Donma-çözülme sonrası optik fiber çevrelerinde görülen beyaz tabaka.	105
Şekil 3.127 : AR1-1-K numunesi, yüksek sıcaklık etkisi öncesi ışık geçirgenlik deneyi.	106
Şekil 3.128 : AR1-1-K numunesi, yüksek sıcaklık sonrası ışık geçirgenlik deneyi.	107
Şekil 3.129 : AR1-1-U numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.	108
Şekil 3.130 : AR1-1-K numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.	108
Şekil 3.131 : AR1-2-K numuneleri, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.	108
Şekil 3.132 : AR1-3-K numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.	108
Şekil 3.133 : AR1-2-K numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.	109
Şekil 3.134 : AR1-2-U numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.	109
Şekil 3.135 : AR2-1-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	110

Şekil 3.136 : AR2-1-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	110
Şekil 3.137 : AR2-1 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.	111
Şekil 3.138 : PX grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	112
Şekil 3.139 : PX grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.	113
Şekil 3.140 : PX grubu, ışık geçirgenlik testi düzeneği.	114
Şekil 3.141 : PMMA tüp yüzeyinde görülen erime ve betondaki kılcal çatlaklar...	114
Şekil 3.142 : PMMA tüp doğrultularında yatay ve düşey yönde oluşan çatlaklar. .	115
Şekil 3.143 : Islanma-kuruma çevrimleri sonrası test yapılan numunenin iç yüzeyine ait görünüm.	115
Şekil 3.144 : Numunede donma-çözülme çevrimleri sonrası oluşan çatlak.	116
Şekil 3.145 : Numunelerin donma-çözülme çevrimleri sonrası görünümleri.	116
Şekil 3.146 : Yüksek sıcaklık sonrası uygulanan ışık geçirgenliği testi.	117
Şekil 3.147 : Yüksek sıcaklık sonrası PMMA tüplerde erime ve betonda oluşan çatlaklar.	118
Şekil 4.1 : AR1, AR2 ve REF gruplarının 28 günlük eğilme dayanımları.	119
Şekil 4.2 : AR1, AR2 ve REF grupları 28 günlük basınç dayanımları.	121
Şekil 4.3 : AR1, AR2 ve REF gruplarının ışık geçirgenliklerinin (%) karşılaştırılması.	123
Şekil 4.4 : AR1 grubu, hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının numunelerin basınç dayanımına etkisi.	124
Şekil 4.5 : AR1 grubu, hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının numunelerin eğilme dayanımına etkisi.	125
Şekil 4.6 : AR1 grubu (K), yüksek sıcaklığın ışık geçirgenliğine etkisi.	129
Şekil 4.7 : PX grubu, hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının basınç dayanımına etkisi.	130
Şekil 4.8 : PX grubu, hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının eğilme dayanımına etkisi.	131
Şekil 4.9 : PX grubu, yüksek sıcaklığın numunelerin ışık geçirgenliğine etkisi.	133
Şekil A.1 : AR1-1-U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	146
Şekil A.2 : AR1-1-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	146
Şekil A.3 : AR1-2-U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	146
Şekil A.4 : AR1-2-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	147
Şekil A.5 : AR1-3 –U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	147
Şekil A.6 : AR1-3-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	147
Şekil A.7 : AR2-1-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	148
Şekil A.8 : AR2-1-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	148
Şekil A.9 : AR2-2-U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	148
Şekil A.10 : AR2-2-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	149
Şekil A.11 : AR2-3-U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	149

Şekil A.12 : AR2-3-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.	149
Şekil C.1 : AR1-2-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	161
Şekil C.2 : AR1-2-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	161
Şekil C.3 : AR1-3-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	161
Şekil C.4 : AR1-3-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	162
Şekil C.5 : AR2-2-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	162
Şekil C.6 : AR2-2-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	162
Şekil C.7 : AR2-3-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	163
Şekil C.8 : AR2-3-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	163
Şekil C.9 : PX grubu, 7 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	163
Şekil C.10 : REF grubu, 7 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.	164
Şekil C.11 : Islanma-kuruma sonrası AR1-1-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	164
Şekil C.12 : Islanma-kuruma sonrası AR1-1-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	164
Şekil C.13 : Islanma-kuruma sonrası AR1-2-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	165
Şekil C.14 : Islanma-kuruma sonrası AR1-2-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	165
Şekil C.15 : Islanma-kuruma sonrası AR1-3-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	165
Şekil C.16 : Islanma-kuruma sonrası AR1-3-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	166
Şekil C.17 : Donma-çözülme sonrası AR1-1-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	166
Şekil C.18 : Donma-çözülme sonrası AR1-1-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	166
Şekil C.19 : Donma-çözülme sonrası AR1-2-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	167
Şekil C.20 : Donma-çözülme sonrası AR1-2-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	167
Şekil C.21 : Donma-çözülme sonrası AR1-3-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	167
Şekil C.22 : Donma-çözülme sonrası AR1-3-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	168
Şekil C.23 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-1-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	168
Şekil C.24 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-1-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	168
Şekil C.25 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-2-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	169
Şekil C.26 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-2-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	169
Şekil C.27 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-3-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	169
Şekil C.28 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-3-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.	170
Şekil C.29 : Yüksek sıcaklık sonrası PX grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği..	170
Şekil C.30 : Donma-çözülme sonrası PX grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği..	170

Şekil C.31 : Islanma-kuruma sonrası PX grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği..	171
Şekil C.32 : AR1-2 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.	171
Şekil C.33 : AR1-3 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.	171
Şekil C.34 : AR2-2 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.	172
Şekil C.35 : AR2-3 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.	172
Şekil C.36 : PX grubu, 7 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.	172
Şekil C.37 : REF grubu, 7 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.....	173
Şekil C.38 : Islanma-kuruma sonrası AR1-1 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.....	173
Şekil C.39 : Islanma-kuruma sonrası AR1-2 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.....	173
Şekil C.40 : Islanma-kuruma sonrası AR1-3 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.....	174
Şekil C.41 : Donma-çözülme sonrası AR1-1 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.....	174
Şekil C.42 : Donma-çözülme sonrası AR1-2 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.....	174
Şekil C.43 : Donma-çözülme sonrası AR1-3 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.....	175
Şekil C.44 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-1 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.....	175
Şekil C.45 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-2 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.....	175
Şekil C.46 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-3 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.....	176
Şekil C.47 : Yüksek sıcaklık sonrası PX grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği..	176
Şekil C.48 : Donma-çözülme sonrası PX grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği..	176
Şekil C.49 : Islanma-kuruma sonrası PX grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği...	177



İŞIK GEÇİREN BETONUN OPTİK FİBER ORANLARI VE YERLEŞİMLERİNE GÖRE ÖZELLİKLERİNİ İNCELEMeye YÖNELİK DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

ÖZET

Beton, günümüzde başta yapı sektörü olmak üzere çok çeşitli alanlarda kullanılmakla birlikte 20. yüzyılda teknolojinin daha da ilerlemesi farklı beton türlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Son yıllarda beton, tasarımlarıyla dikkat çeken birçok yapıda ve serbest formlu yapılarda tercih edilmektedir. Kullanıcıların ve tasarımcıların tekdüze betonarme yapı tasarımlarının dışına çıkmak istemeleri malzeme alanında da yeni ürünlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Ülkemizde yapısal uygulamalarda sıkça tercih edilen beton da gelişen teknolojiyle birlikte farklı katkı maddelerinin geliştirilmesiyle ve içeriğine konulan farklı malzemelerle yeni özellikler kazanmıştır. Malzeme ve yapısal alandaki bu yeni gelişmeler estetik ve yaratıcılık değeri yüksek yapıların ortaya çıkmasında tasarımcılara da imkanlar sunmaktadır. Ayrıca son yıllarda estetik özelliklerin yanısıra yapılarda enerji tüketimini azaltmak amacıyla sürdürülebilir malzemelerin kullanımına da önem vermeye başlanmıştır.

Bu çalışmada da özellikle mimarların ve sanatçıların estetik anlamda farklı ve dikkat çeken bir tasarım yapmak için kullanabilecekleri ışık geçiren betonun özellikleri araştırılmıştır. Işık geçiren beton (light transmitting concrete) ya da saydam beton (translucent concrete), opak bir malzeme olan betonun içerisine optik fiber, cam, polimer reçine gibi ışık geçiren bir malzeme konularak oluşturulmaktadır. Yapılan uygulamalarda daha çok polimer içerikli optik fiberler ve polimer şeffaf malzemeler kullanılmaktadır. Işık geçirgenliğine imkan vermesi sebebiyle yapılarda karanlık alanlarda ya da cephe paneli olarak kullanılması durumunda enerji tüketimini azaltacağı düşünülmektedir. Işık geçiren panellere LED yerleştirilerek farklı renklerde ışığı geçirmesi de sağlanabilmektedir. İstenilen renk ve formda üretilebilmesi bu anlamda tasarımcıya da çeşitlilik sunmaktadır.

Bununla birlikte, ışık geçiren betonun inşaat sektöründe uygulanması işçilik maliyeti ve üretim sürecinin karmaşıklığı gibi nedenlerden dolayı küçük ve az sayıda üretimlerle sınırlı kalmıştır.

Tez çalışması için yapılan literatür araştırması ışık geçiren betonun özellikleri, içerdiği malzemelerin özellikleri, üretici firmalar ve ürünleri, uygulama örneklerini içermektedir. Işık geçiren betonun farklı optik fiber oran ve yerleşimlerine göre mekanik özellikleri, ışık geçirgenlik özellikleri ve durabilite özelliklerini incelemeye yönelik bir deneysel çalışma yapılmıştır.

Deneysel çalışmada plastik optik fiberler ve PMMA şeffaf üniteler betona yerleştirilerek ışık geçiren beton üretimi yapılmıştır. Optik fiberli gruplar için farklı oranlarda ve farklı yerleşimlerde plastik optik fiber konulmasının malzemenin mekanik özelliklerinde bir değişime sebep olup olmayacağı konusu araştırılmıştır.

Ayrıca optik fiberli bir grupta hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının numunelerin dayanımına etkisi belirlenmiştir. Fibrobeton Yapı Elemanlar A.Ş. firmasından temin edilen PMMA şeffaf ünitelerin kullanıldığı numune grubuna da hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulanmış ve numune özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir.

Deneyisel çalışmanın ilk aşamasında optik fiberlerle farklı desenler ortaya çıkarabilmek için bir üretim yöntemi belirlenmiştir. Çizgisel düzende ve demet halinde optik fiber gruplarının kullanılmasıyla farklı desen tipleri oluşturulmuştur. Bunlardan çizgisel düzene sahip olan numune grubu AR1 ve demet düzenine sahip olan numune grubu AR2 ismini almıştır. Yapılan üretimlerde 0,5 mm çapındaki optik fiberler karşılıklı olarak elek telinden geçirilerek belirlenen desenler oluşturulmuştur. Optik fiberlerin beton dökümü sırasında gerilmesiyle istenilen desenler elde edilebilmiştir. Beton, kalıba dökülüp sertleştikten sonra kesilerek belirlenen numune boyutlarına getirilmiştir. Numune üretimleri gerçekleştirildikten sonra planlanan deneyler uygulanmıştır.

0,5 mm optik fiber içeren gruplardan iki farklı optik fiber yerleşimine sahip 3 farklı optik fiber oranında toplamda 6 alt grup oluşturulmuştur. Kullanılan optik fiber hacimsel oranları %1, %1,6 ve %2,4'tür. Yapılan çalışmalarda optik fiberli iki grup (AR1 ve AR2) için 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı, ışık geçirgenliği gibi özellikler karşılaştırılmıştır. Çizgisel düzende optik fiberlerin yerleştiği AR1 grubu numunelerinde hızlandırılmış yaşlandırma etkileri sonrası dayanım testleri yapılmıştır. Testler yapıldıktan sonra numunelerin özellikleri karşılaştırılmıştır.

2 mm çapında şeffaf tüplerden oluşan PMMA ünite konulan numune grubu PX olarak adlandırılmıştır. PX grubu numunelerinin, 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı, ışık geçirgenliği belirlenmiştir. Ayrıca numunelere donma-çözülme ve ıslanma-kuruma çevrimleri ve yüksek sıcaklık uygulanmıştır. Hızlandırılmış yaşlandırma etkileri sonrasında numune dayanımları belirlenip 28 günlük dayanımları ile karşılaştırması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Işık Geçiren Beton, Şeffaf Beton, Optik Fiber

AN EXPERIMENTAL STUDY AIMED AT INVESTIGATING THE PROPERTIES OF LIGHT TRANSMITTING CONCRETE ACCORDING TO OPTICAL FIBER RATIOS AND ARRANGEMENTS

SUMMARY

Concrete is a composite material widely used in buildings for many years. Different types of concrete have emerged with the development of technology in the 20th century. In recent years, concrete has been preferred in different types of structures. Nowadays, users no longer want to live in uniform reinforced concrete structures because they expect a high aesthetic value of a building. This high expectation leads designers and engineers to search for new materials.

Concrete, which is often preferred in structural applications in our country, has also gained new properties with the development of different additives and different components. It also gives an opportunity to designers to use these new developments in the field of the material. In addition to aesthetical concerns, sustainable materials have also started to be used in buildings to reduce energy consumption.

In this study, the properties of light-transmitting concrete have been investigated. Light-transmitting concrete or translucent concrete is first produced by Hungarian architect Aaron Losonczy in 2001. Light-transmitting concrete consists of concrete and a light-transmitting material such as optical fiber, waste glass or polymer resin. It can be produced as blocks or panels. The diameters of optical fibers are generally between 2 μm and 2 mm. Polymer optical fibers and polymer resin used in many researches and applications.

Light transmitting concrete allows light to be transmitted through optical fibers placed in concrete and it reduces energy consumption in the buildings. Also, optical fibers can transmit the light in different colors by placing LEDs into the light-transmitting panels. The panels might be produced in different colors by adding pigment into the concrete mixture.

However, the applications of light-transmitting concrete are limited in the construction industry because of the labor cost and complexity of the production process. Light transmitting concrete is not suitable for production in the field, as in traditional concrete production, and it can be produced in the form of blocks or panels in prefabricated factories or production facilities.

In the production of light-transmitting concrete, its physical and mechanical properties depends on some parameters such as the different ratios, diameters, arrangements and type of the optical fibers in the concrete. The increase of the optical fibers in light-transmitting concrete contributes to light transmission, but it affects the homogeneity of the concrete. Therefore, high compressive strength concrete is generally used in the applications.

The literature research for this study includes the properties of light-transmitting concrete, the properties of the materials it contains, the manufacturers and their

products, and applications. An experimental study was carried out in order to better understand the behaviour of light-transmitting concrete and to determine its mechanical, light transmitting and durability properties according to different optical fiber ratios and arrangements.

In the experimental study, light-transmitting concrete was produced by placing plastic optical fibers (for two groups) and PMMA transparent units (for one group) in the concrete. A reference sample group (REF group) without optical fiber was produced for comparison with light-transmitting concrete samples. Mechanical properties of light-transmitting concrete which have different ratios of optical fibers have been investigated. Two groups of samples (AR1 and AR2) include 0,5 mm diameter optical fibers. Optical fibers were placed in a regular arrangement into the concrete in AR1 group, AR2 group had a different arrangement of optical fibers. The physical changes in the samples and their mechanical properties were determined.

At the first stage of the experimental study, a production method was determined to make different optical fiber patterns. Optical fibers with a diameter of 0,5 mm were mutually passed through a wire mesh to create the determined pattern. During concrete casting, the optical fibers were stretched. After the concrete was poured into the mold and hardened, the concrete block was cut in specimen size. The specimens with the dimensions of 40 mm x 40 mm x 160 mm were obtained from the light transmitting concrete block.

There was a total of six subgroups containing 0,5 mm optical fibers with different arrangements and three different optical fiber ratios. The optical fiber ratios (by volume) were 1%, 1,6%, and 2,4% in the two main groups (AR1 and AR2). The optical fibers were placed in the longitudinal and latitudinal direction and of the sample in these two groups. The effect of the optical fiber direction to the strength was investigated and it was determined with the flexural strength tests.

The compressive strength tests, flexural strength tests and light transmittance tests were applied to the AR1 and AR2 group samples. The loading direction was perpendicular to the optical fibers' direction. The results of the 28-day compressive test, 28-day flexural strength tests (in two directions), and light transmittance test were compared for these two groups. The light transmitting properties of specimens were measured by a luxmeter. Cube specimens with the dimensions of 40 mm x 40 mm x 40 mm were used for the light transmitting tests. Light transmitting values of the cube specimens were measured for the distances which were 10 cm and 20 cm from the specimen to the luxmeter. Durability tests were carried out for AR1 group where optical fibers were placed in a linear arrangement. For durability tests, freeze-thaw and wetting-drying cycles and high temperature were applied to the samples.

The PX group included PMMA units which have transparent tubes with 2 mm diameter. The mechanical properties and light transmittance of the samples were investigated. The results of 7 and 28-day compressive tests and 7 and 28-day flexural strength tests and light transmittance tests were determined. Durability tests were applied to the PX group in which PMMA transparent units supplied from Fibrobeton Inc. After the end of the aging process, the compressive strength test and flexural strength test were applied to the samples. The results of the tests were compared at the end of the study.

For the AR1 and AR2 groups, according to the 28-day compressive strength test results, as the optical fiber ratios increased, the compressive strength of the samples decreased. According to the 28-day flexural strength test results, as the optical fiber

ratios increased in the samples which include optical fibers in longitudinal direction, the flexural strength of the specimens increased.

Reference (REF) group had the highest 28-day compressive strength values compared with the AR1, AR2 and PX groups.

According to the light transmittance test results, when the number of the fiber was a certain value, light transmittance decreased with an increasing distance from the luxmeter and the specimen. The light transmittance of specimens increased in proportion with the increase the optical fiber ratio for specified distances. The samples which had the highest optical fiber ratio (%2,4) had the highest light transmittance value in AR1 and AR2 groups. Also, the AR2 group specimens had higher light transmitting values compared with the AR1 group.

After the effects of wet-dry cycles, freeze-thaw cycles and high temperature applied to AR1 and PX group specimens, the compressive and flexural strength values of specimens determined. After the effects, the compressive and flexural strength values decreased some of the AR1 group samples. Also, there were significant decreases in the light transmittance values of the AR1 group specimens after the high temperature effect.

In terms of the PX group, it included PMMA units, there were significant decreases in flexural and compressive strengths after wet-dry cycles and high temperature effect. After the high temperature effect, light transmittance of the PX group decreased.

In conclusion, light transmitting concrete was produced by using different types of light transmitting materials in this experimental study. The mechanical properties, light transmitting properties and durability properties of the specimens were investigated. In order to better understand the durability properties of light transmitting concrete, it is recommended to increase the specimen numbers. In this thesis, a different and laborious production method was applied due to the production of an unprecedented pattern with using small diameter (0,5 mm diameter) optical fibers. The emergence of easier and less costly production methods related to light-transmitting concrete will be possible by conducting research studies together with manufacturing companies.

Keywords: Light-transmitting concrete , Translucent concrete, Optical fibers



1. GİRİŞ

21.yüzyılda yapılar da enerji tüketimini azaltmak amacıyla geliştirilen teknolojilerle birlikte sürdürülebilir yeni malzeme arayışlarına girilmiştir. Özellikle yüksek yapıların inşa edilmesiyle birlikte bu tip yapıların ihtiyaç duyduğu yüksek enerji miktarının karşılanması için alternatif çözümler üretilmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Işığın geçirimine izin veren ışık geçiren beton (light-transmitting concrete) yapılar da enerji tüketimini azaltarak yapıların sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. İlk olarak 2001 yılında Macar mimar Aaron Losonczi tarafından üretilen ışık geçiren beton ya da şeffaf beton günümüzde önemli sürdürülebilir malzemelerden biri olarak kullanılmaktadır. Blok ya da panel halinde üretilen ışık geçiren beton üretimi optik fiberlerin betonun sertleşmesinden önce kalıp içine yerleştirilmesiyle gerçekleşmektedir. Işık geçiren beton üretiminde cam optik fiber, plastik optik fiber (POF) gibi farklı tiplerde optik fiberler kullanılabilir. Işık geçiren beton yapısal malzeme olarak taşıyıcı olmayan elemanlar da iç duvarlar da, merdiven basamaklarında, tavanlar da ve cephelerde kullanılabilir. Merdiven çevresi, tünel ve metro istasyonları gibi karanlık hacimlerin aydınlatılmasında kullanılan ışık geçiren beton, içerisindeki optik fiberlerin farklı düzenlerde bir araya gelmesiyle ve farklı desenler oluşturularak üretilmektedir. Işık geçiren beton üretiminde malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri, optik fiberlerin beton içerisinde farklı yerleşimleri ve yerleşim doğrultuları, farklı lif oranları ve lif çapları gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Üretimde kullanılan optik fiber liflerin çapları genelde 2 µm ve 2 mm arasındadır. Işık geçiren beton, geleneksel beton üretiminde olduğu gibi sahada üretime elverişli olmayıp blok ya da panel şeklinde prefabrike olarak fabrikalarda ya da üretim tesislerinde üretilmektedir. Işık geçiren betonda çok sayıda optik fiber bulunması ışık geçirgenliğine katkı sağlamakta ancak beton için malzemenin homojenliğine etki etmektedir. Bu yüzden üretilen karışımlar da genelde yüksek basınç dayanımına sahip beton ya da harç kullanılmaktadır.

Işık geçiren betonun yapılar da kullanımı, yapı içerisinde daha iyi bir aydınlatma sağlayarak enerjiden tasarruf edilmesine katkı sağlamakta ve farklı ışık renkleri ile

birlikte betonda oluşturulan farklı desenlerinin üretilmesiyle tasarım anlamında da mimarlara birçok alternatif sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ışık geçiren betonun malzeme özellikleri ve üretim süreci araştırılmış, optik fiber oranları ve yerleşimlerine bağlı olarak mekanik ve ışık geçirgenlik özellikleri, hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının numunelerin mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Literatür çalışmasında ışık geçiren betonun Türkiye’deki üretimi ve Dünya’daki üretici firmaların tamamlamış olduğu uygulamalara dair örnekler verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada farklı tipte üretilen ışık geçiren beton numunelerin yüksek sıcaklık, donma- çözülme, ıslanma-kuruma etkileri altında mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır.

1.1 Tez Çalışmasının Amacı

Işık geçiren beton, doğal ve yapay ışığın geçişine imkân sağlayarak yapı içerisinde kullanımında enerji tüketimini azaltmasının yanında kullanıcılara farklı bir görsel etki sunmaktadır. Işık geçiren beton yapı içerisinde enerji tasarrufuna katkı sağlayarak yapıda kullanım için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Bu tez çalışması ile ışık geçiren betonun farklı koşullar ve parametreler etkisindeki davranışı incelenerek malzemenin özelliklerine yönelik kapsamlı bir araştırma yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada ışık geçiren betonda kullanılan optik fiberlerin yerleşim ve oranlarına göre özellikleri incelenmiştir. Ayrıca ışık geçiren betonun yapıda kullanımı durumunda uzun dönem etkileri bilinmediğinden bu tez çalışmasıyla malzemenin durabilite özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.2 Tez Çalışmasının Kapsamı

Bu tez kapsamı doğrultusunda ışık geçiren betonu oluşturan malzemelerin özellikleri araştırılmış, ışık geçiren beton uygulama örnekleri ve Dünya’daki ve Türkiye’deki üretici firmalara değinildikten sonra tüm bu araştırmaların sonunda elde edilen veriler bir deneysel çalışma ile desteklenmiştir. Deneysel çalışmada, ışık geçiren betonun mekanik özelliklerinin optik fiber oranları ve yerleşimlerine göre incelenmesi, numunelerin hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası özelliklerinin incelenmesi ve karşılaştırılması yer almaktadır. Farklı tipte ışık geçiren malzeme ve üretim

yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada ilk önce üretim yöntemini belirlemeye yönelik denemeler yapılmıştır. Yöntemin belirlenmesiyle numune hazırlık ve üretim aşamasına geçilmiştir. Numuneler üretildikten sonra belirlenen deneyler uygulanarak numune özellikleri incelenmiştir.

1.3 Tez Çalışmasının Yöntemi

Araştırma yöntemlerinden biri olan literatür araştırmasında ışık geçiren betonun tarihsel gelişimi, malzeme özellikleri, gerçekleştirilen uygulamalar ve üretici firmalara ait bilgilere yer verilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan diğer yöntem ise deneysel çalışmadır. Literatür araştırması yapılırken belirlenen parametreler değerlendirilerek deneysel çalışmanın sürecine karar verilmiştir. Deneysel çalışmada, ışık geçiren betonun mekanik özelliklerinin farklı optik fiber oranları ve farklı yerleşimlerine göre incelenmesi, karşılaştırılması, hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulanan farklı ışık geçiren beton numunelerin incelenmesi yer almaktadır.

1.3.1 Literatür araştırması

Yapılan literatür araştırmasında ilk önce ışık geçiren betonun özellikleri, tarihsel gelişimi ve günümüzdeki uygulama örnekleri, üretici firmalar, malzeme özellikleri gibi konulara değinilmiştir. Malzeme özellikleri araştırıldıktan sonra ışık geçiren betonun özelliklerini etkileyen parametreler belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerin etkisini incelemek amacıyla bir deneysel çalışma yapılmıştır.

1.3.2 Deneysel çalışma

Yapılan deneysel çalışmada, ışık geçiren betondaki optik fiberlerin yerleşimlerindeki farklılıklara göre mekanik özelliklerinde değişim olup olmadığı incelenmiştir. Yapılan literatür çalışmasının katkısıyla daha önce yapılmış akademik çalışmalarda ışık geçiren betonla ilgili parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler optik fiber oranı, optik fiber düzeni ve optik fiber doğrultusudur. Belirlenen parametrelerden yola çıkılarak farklı optik fiber oranlarının ve yerleşimlerinin uygulandığı ışık geçiren beton üretimi yapılarak ve malzemenin mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik bir çalışma yapılması amaçlanmıştır. Hazırlanan deney numunelerinde ışık geçirgenliği için 0,5 mm çapında optik fiberler ve 2 mm çapında tüplere sahip PMMA (Polimetil metakrilat) üniteler kullanılmıştır. 2 mm çaplı PMMA üniteler ve 0,5 mm çaplı optik

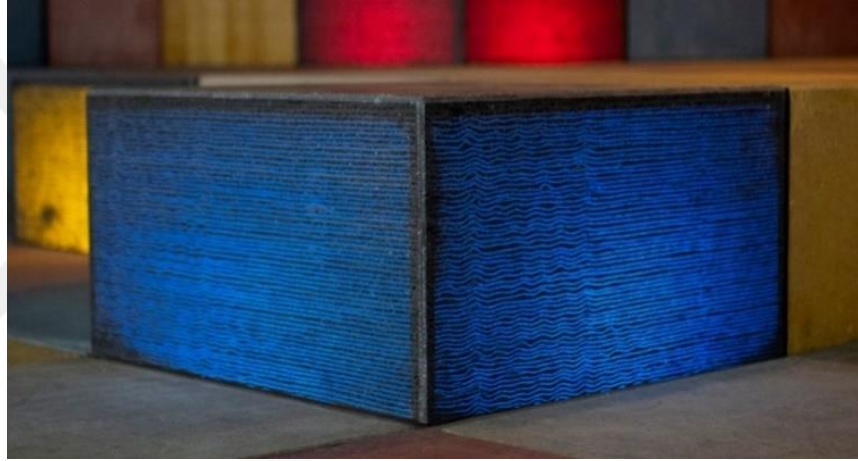
fiberler Fibrobeton Yapı Elemanları firmasından temin edilmiştir. Işık geçirmeyen sadece betondan oluşan numune grubu REF olarak adlandırılmıştır. 0,5 mm optik fiber kullanılan gruplarda (AR1 ve AR2) 2 tip optik fiber yerleşimi/düzeni belirlenmiş ve numune boyutlarına bağlı olarak farklı düzen (yerleşim) uygulanmıştır. Çizgisel düzende optik fiber yerleşimine sahip numuneler AR1, demet (dörtlü optik fiber grubu) şeklinde optik fiber yerleşimine sahip numuneler AR2 olarak adlandırılmıştır. AR1 ve AR2 gruplarında %1, %1,6 ve %2,4 olmak üzere 3 farklı fiber optik yüzdesi kullanılmıştır. Hazırlanan tüm numunelerin 28 günlük basınç dayanımları, 28 günlük eğilme dayanımları ve ışık geçirgenlikleri incelenmiş ve elde edilen değerlerle bir karşılaştırma yapılmıştır. PMMA ünite içeren ışık geçiren beton numuneleri PX olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca AR1 ve PX numune gruplarına hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulanmış, numunelerin ıslanma-kuruma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkileri sonrasında dayanımları belirlenmiştir. Bu deneysel çalışmayla optik fiber yerleşimlerinin ve hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının ışık geçiren betonun özelliklerine etkisine araştırılarak literatüre katkı sunulması amaçlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmaya ait detaylara bu tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde yer verilmiştir.

2. IŞIK GEÇİREN BETON

Işık geçiren beton, içerisine optik fiberler konularak ışık geçirimine imkân veren bir beton türüdür. Işık geçiren beton, “saydam beton” ya da “şeffaf beton” olarak da isimlendirilmektedir.

Geleneksel ışık geçiren malzemeler genelde organik kompozit ve cam malzemeden yapılmıştır. Işık geçiren çimento esaslı malzemeler yeni tip bir ışık geçiren malzeme olarak 21.Yüzyılda karşımıza çıkmaktadır. Işık geçiren beton, temelde optik fiber ve beton ya da yüksek dayanımlı çimento harcının bir araya gelmesiyle oluşmuştur (Şekil 2.1). Optik fiberler, karışım içerisine belli düzenlerde karşılıklı olarak yerleştirilmekte olup oluşturulacak beton bloğun her iki tarafından ışık geçişini sağlamaktadır [1].



Şekil 2.1 : Işık geçiren beton (Lucem, Urban Star Sculpture) [2].

2.1 Tarihsel Gelişim

Optik fiberlerin beton içerisinde kullanımı 1976 tarihinde David Kenneth ve John Richardson tarafından yapılmıştır. Bu deneylerde optik cam fiberlerden oluşan demetler, beton içinde açılan kanallara yerleştirilmiş ancak ışık geçirimi kısıtlı düzeyde sağlandığından başarılı bir sonuç elde edilememiştir. 1990'ların başlarında RWTH Aachen Mimarlık Bölümü'nde gerçekleştirilen çalışmalarda ise yeni bir yaklaşım denenmiş, elde edilen örneklerle düşük seviyeli ve donuk ışık iletimi sağlanmıştır [3].

2001 yılında Aaron Losonczy %96 oranında beton, %4 oranında optik fiber kullanarak ilk kez ışık geçiren betonu üretmiştir. Kullanmış olduğu numune boyutları 600 mm x 300 mm'dir. Numunelerin basınç dayanımları 50 N/mm² ve eğilme dayanımları 7

N/mm²'dir [1]. 2002 yılında ürünü için patent almıştır. Aaron Losonczi daha sonra 2004 yılında ışık geçiren beton üretimi yapan Litracon firmasını kurmuştur. Losonczi, 2007 yılında Litracon pXL ürünü için ikinci patentini almıştır [4].

Işık geçiren beton ile ilgili Andreas Bittis de bazı çalışmalar yapmıştır. Andreas Bittis saydam beton üretiminde kullandığı optik cam liflerini bir dokuma (tekstil) halinde betona yerleştirmeyi denemiştir. Optik lifler dokuma şeklinde serilerek kalıba yerleştirilmiş ve sonra betonun dökülmesiyle ışık geçiren beton üretimi yapılmıştır. Liflerin bu şekilde kullanılması liflerin çizgisel ve düzgün olarak yerleşmesini sağlamıştır [3].

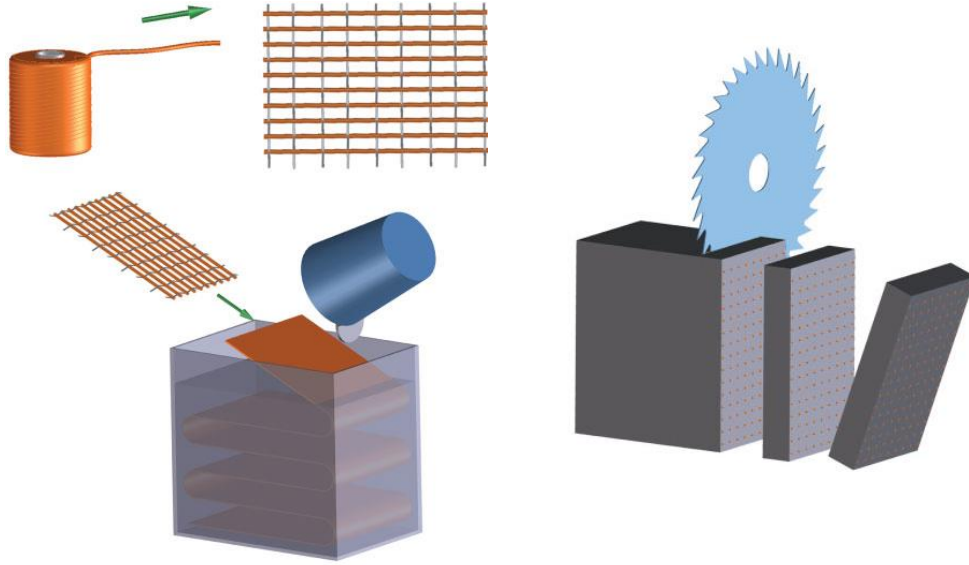
2010 yılında Italcementi Group, ışık geçirgenliğini sağlamak için önceden oluşturulmuş reçineyi ince taneli betona gömmek üzere yeni bir ışık geçiren beton türü geliştirmiştir. Daha sonra, Italcementi Group bu ürünleri üretip Şangay'daki bir fuarda (Shanghai Expo) İtalyan Pavyonu'nda (Italian Pavilion) kullanmıştır. Yapı, fuar katılımcıları ve akademisyenlerden yoğun ilgi görmüştür [5].

Aynı zamanda Lucem şirketinin kurucusu olan Andreas Roye de bir çalışmasında ışık geçiren beton üretiminde polimer optik lifleri dokuma (tekstil) halinde nasıl kullanıldığını açıklamıştır. Bu yöntemde katmanlı bir dokuma oluşturmak için liflere tekstil işlemleri uygulanmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Optik liflerin dokuma (tekstil) haline getirilmesi [6].

Maksimum 6 mm boyutunda agreganın kullanıldığı beton, kalıba tabakalar halinde dökülmektedir. Beton kalıptan çıkarıldıktan sonra bloklar halinde kesilerek ışık geçiren beton paneller elde edilmektedir [6]. Yöntemin görsel olarak açıklaması Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Optik liflerin kalıba yerleştirilmesi ve blokların kesilmesi [6].

2.2 Işık Geçiren Beton Özellikleri

Işık geçiren beton, taze betonun içerisine belli miktarlarda optik fiber ya da ışığı geçiren bir malzemenin konulması ve sonrasında betonun sertleşmesiyle elde edilmektedir. Plastik ve cam optik fiberler dışında ışık geçiren beton üretiminde ışık geçirgenliğini sağlamak amacıyla atık cam ve reçine gibi malzemeler de kullanılmıştır. Işık geçiren beton üretiminde iki ana yöntem kullanılmaktadır. Birincisi, geleneksel beton üretiminde kullanılan agraga gibi bazı malzemeler yerine saydam ya da ışığı geçiren polimer malzemeler kullanmak, ikincisi ise betonun içine konulan optik fiber gibi bir malzeme ile üretim yapmaktır [7].

Işık geçiren beton üretimindeki asıl amaç enerji tüketimini azaltmaktır. Bu nedenle kullanılan malzemenin yüksek yarı saydamlığa veya yüksek ışık geçirgenlik özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Bununla birlikte, farklı şeffaf malzeme türlerinin, ışık geçiren betonun genel özelliklerini doğrudan etkileyecek biçimde kendilerine ait ışık geçirgenlik, dayanım, ısı iletkenliği gibi özellikleri bulunmaktadır [8]. Işık geçiren malzemenin karakteristik özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

Işık geçirgenliği: Polimetilmetaakrilat (PMMA) malzemedan üretilen optik fiberlerin ışık geçirgenliği yaklaşık %90'ı bulmaktadır.

Yüksek mekanik dayanım: Beton içerisine yerleştirilen optik fiberlerin düşük (sınırlı) yüzdelerde katılması betonun mekanik dayanımında fazla bir azalmaya sebep olmamaktadır. Bu yüzden yapı malzemesi olarak da kullanılabilir.

Hafiflik: Betonla kıyaslanırsa daha düşük yoğunluğa sahip optik fiberlerin karışıma katılması, beton içerisindeki boşluk miktarının artmasıyla elde edilen bloğun yoğunluğunda azalmaya sebep olacaktır.

Dekoratif etki / şık görünüm: Optik fiberlerin farklı renk ve düzenlerde kullanılması dekoratif anlamda çeşitlilik sunmaktadır. Ayrıca optik fiberlerden farklı renklerde ışık geçirilerek tasarıma farklılık kazandırılabilir. Işık geçiren beton, yapı elemanları haricinde tabela, gece lambası gibi objelerin yapımında da kullanılmaktadır [1].

2.3 Işık Geçiren Betonda Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.3.1 Beton ve Bileşenleri

Beton, teknolojinin gelişimiyle beraber keşfinden günümüze kadar yapı malzemesi olarak çok çeşitli alanlarda kullanılmıştır. Çoğunlukla konutlar ve kamu yapılarında sıkça örneklerine rastlanmaktadır. Ayrıca altyapı inşaatları, deniz yapıları, yol, baraj, tüneller, sulama kanalları ve köprüler gibi birçok yapıda taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan malzeme olarak tercih edilmektedir. Günümüzde betonun donatıyla birlikte kullanımıyla oluşan betonarme taşıyıcı sisteme sahip birçok yapı bulunmaktadır. Yerinde döküm tekniklerinin yanı sıra ön üretim tekniklerinin gelişmesi ile endüstriyel tesislerde ürünler haline getirilerek de kullanılmaktadır. Prefabrike yapım tekniklerinin gelişmesi ile birlikte köprü, sulama kanalları, cephe kaplamaları, mimari ürünler, ön üretimli konut ve endüstriyel yapıların kolon, döşeme ve duvar elemanları, kaldırım ve zemin elemanları, deniz yapıları, şehir mobilyaları olarak üretilebilmekte ve neredeyse yaşamın her alanında kullanılmaktadır [9].

Beton agrega (kum ve çakıl), çimento ve suyun belirli ölçülerde karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Bileşenlerin mekanik ve kimyasal etkileşimi sonucu ortaya çıkan taze beton kalıp içerisine boşaltılır. İyi bir şekilde yerleşimi sağlamak amacıyla vibratörle titreştirilir. Bundan sonra sertleşmeye bırakılan beton kullanılan çimento ve katkı maddelerine göre değişen bir hızla sertleşmeye başlar ve beton dayanımının önemli bir kısmını 7 günde kazanır. Betonun birim hacim ağırlığı karışımına ve yerleşimine bağlı olarak değişir. Uygulamada 21-26 kN/m³ değerlerine rastlansa da öz ağırlık hesaplarında betonarme için 25 kN/m³ ve donatısız beton için 24 kN/m³ değerlerinin kullanılması tavsiye edilir. Betonun davranışında bileşenlerinin

özellikleri etkili olur [10]. Betonlu oluşturan bileşenler, izleyen alt başlıklarda incelenecek olan çimento, su, agrega ve katkı maddeleridir.

2.3.1.1 Çimento

Çimento esas olarak kalsiyum ve alüminyum silikatlardan oluşan ince toz şeklinde minerallerden yapılmıştır. Suyun eklenmesiyle bu mineraller hamur oluşturur ve daha sonra sertleşerek mukavemet kazanır. Torbalanmış durumda özgül ağırlığı 15 kN/m^3 civarındadır. Çimento yapımında esas olarak kireç taşı (CaCO_3) ve kil (SiO_2 ve Al_2O_3) ve bazı diğer mineraller beraberce 1400°C gibi yüksek bir sıcaklıkta hafif eğimli dönel bir fırından geçirilir. Maksimum çapı 50 mm'ye varan klinker adı verilen bir malzeme elde edilerek daha sonra bu malzeme soğutulup öğütülür. Çimentoda esas içeriği oluşturan klinkerin yanı sıra farklı oranlarda cüruf, silis dumanı, puzolan, şist, katkılar, normal ve uçucu kül katılabilir [10]. TS-EN 197-1:2012'ye göre çimento, su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve işlemleri ile priz alan ve sertleşen bir hamur (pasta) oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında dahi dayanımını ve kararlılığını koruyan ince öğütülmüş inorganik hidrolik bağlayıcıdır. TS-EN 197-1'e göre uygun çimento, CEM çimentosu diye adlandırılır. Buna göre CEM çimentosu agrega ve su ile uygun şekilde harmanlanıp karıştırıldığında, yeterli süre işlenebilirliğini muhafaza eden ve belirlenmiş periyodlarda belirli dayanım seviyelerini kazanan ve uzun süre hacim sabitliği gösteren, beton veya harç üretilen çimentodur. Çimentonun erken dayanımı TS-EN 196-1:2016'ya göre tayin edilen 2 veya 7 günlük basınç dayanımıdır. N ile belirtilen normal erken dayanım sınıfı, R ile belirtilen yüksek erken dayanım sınıfı ve L ile belirtilen düşük erken dayanım sınıfı olmak üzere her bir standard dayanım sınıfı için üç erken dayanım sınıfı tanımlanır. L sınıfı sadece CEM III çimentolarına uygulanır. TS-EN 197-1:2012 (Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk) standardına göre tanımlanan çimento türleri aşağıda Çizelge 2.1'de verilmiştir [11].

Çizelge 2.1 : Çimento türleri.

Esas türler	Çimento türü
CEM I	Portland çimentosu
CEM II	Portland-kompoze çimento
CEM III	Yüksek fırın cürufllu çimento
CEM IV	Puzolanik çimento
CEM V	Kompoze çimento

Çimento türleri Portland çimentosu, Portland kompoze çimento, yüksek fırın cürufu çimento, puzolanik çimento ve kompoze çimento olarak 5'e ayrılmıştır. Bunlardan en çok bilinen ve kullanılan çimento türü Portland çimentosudur.

Portland çimentosu

Yapılarda portland çimentosu çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Portland çimentosu belirli oranlardaki kalkertaşı (CaO) ve kilin (SiO_2 ve Al_2O_3) karıştırılıp pişirilmesinden sonra, kilin öğütülmesiyle elde edilir. Çimentonun sertleşmesini geciktirmek için klinkere bir miktar alçı taşı da eklenir [12].

TS-EN 197-1'ye göre kütlece %95-100 oranında klinker %0-5 oranında minör ilave bileşen bulunmalıdır. Minör ilave bileşenler, inorganik doğal mineral malzemeler, klinker üretim sürecinden çıkan inorganik mineral malzemeler veya çimentoda ana bileşen olarak kullanılmayan özel olarak seçilmiş malzemelerdir [11].

Portland kompoze çimento

TS EN 197-1 'e göre klinker kütlece oranı %65-94 arasında değişmektedir. CEM II sınıfına giren portland cürufu çimento, portland silis dumanlı çimento, portland puzolanik çimento, portland uçucu küllü çimento, portland pişmiş şistli çimento, portland kalkerli çimento ve portland kompoze çimento gibi türleri bulunmaktadır. Tras ve kalker gibi mineral katkıları içerdiğinden uzun süreli mukavemeti ve dayanıklılığı yüksektir.

Yüksek fırın cürufu çimento

Yüksek fırın cürufu çimentolar, granüle yüksek fırın cürufu ile Portland çimentosu klinkeri karışımının az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesiyle elde edilir. Bu tür çimentolar, Portland çimentosu klinkerinin ağırlıkça %20 kadarının yüksek fırın cürufu ile değiştirilmesiyle elde edilir. Yüksek fırın cürufu, kalsiyum oksit oranının yüksek olması ve puzolanik özelliğe sahip olması nedeniyle kendi başına, sınırlı olsa da bağlayıcı özelliğe sahiptir. Genelde bu tür çimentolar deniz suyu ve diğer sülfatlı ortamlarda Portland çimentosuna göre daha dayanıklıdır [12].

Puzolanik çimento

TS EN 197-1 'e göre klinker kütlece oranı %45-89 arasında değişmektedir. %11-55 oranında silis dumanı, puzolan ve uçucu kül içerebilmektedir. Sıva, harç imalatlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Kompoze çimento

TS EN 197-1 'e göre klinker kütlece oranı %20-64 arasında değişmektedir. %18-49 oranında yüksek fırın cürufu ve %18-49 oranında puzolan ve silissi uçucu kül içerebilmektedir.

2.3.1.2 Su

Çimentoda kimyasal reaksiyon için ve agregaların ıslanması ve karışımı ıslatarak işlenebilirlik sağlamak için beton üretiminde su önemli bir faktördür. Beton karışımında normal içme suyu kullanılabilir. Ancak suyun çözülebilen tuzlar, organik maddeler ve askıda katkı maddesi içermemesi gerekir. Kirlilik, silt, yağ, şeker veya betonun yapısına etkili olabilecek maddeler içeren su hem dayanım ve hem de yerleştirmeye olumsuz etkisi olduğundan dolayı kullanılmaz. Betonun dayanımında etkili olan jel çimentonun su ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucu oluştuğu için, su/çimento oranı beton için önemli bir parametredir. Suyun gereğinden az olması kimyasal reaksiyonun tamamlanmamasına sebep olurken, gereğinden fazla olması da betonda düzensiz ve boşluklu bir yapı oluşturur [12].

2.3.1.3 Agreg

Kum ve çakıl (veya kırma taş) karışımı agrega olarak tanımlanmaktadır. Genellikle 0-7 mm arasında olan agrega kum, 7-70 mm arasında olan ise çakıl olarak adlandırılmaktadır. Agreg

Kum, doğal veya yapay olabilir. Doğal kum, kum ocaklarından, dere yataklarından veya deniz kıyısından elde edilebilir. Yapay kum ise, taşların konkasörle kırılması ile mekanik olarak üretilir. Betonda kullanılacak kumun temiz olması ve betona veya donatıya zarar verecek kimyasal maddeleri içermemesi gerekir. Kumun içerisinde fazla miktarda kil veya silt bulunması uygulamada sıkça karşılaşılan sorunlardan biridir. Kalın agrega da (7-70 mm) doğal veya yapay olabilir. Doğal agrega dere yataklarından, özel ocaklardan veya deniz kenarlarından elde edilir ve çakıl olarak adlandırılır. Yapay olanı ise, uygun nitelikteki taşların konkasörle kırılmasıyla elde edilir ve kırmetaş olarak adlandırılır [12].

2.3.1.4 Katkı maddeleri

Betonun özelliklerini daha iyi hale getirebilmek amacıyla belirli ve az miktarda katkı maddeleri kullanılmaktadır. Katkı maddeleri kimyasal katkılar ve mineral katkılar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Kimyasal katkılar

Kimyasal katkılar esas olarak betonun veya harcın taze ve sertleşmiş durumdaki özelliklerini iyileştiren, suda çözünebilen maddelerdir. Farklı özelliklerdeki kimyasal katkıların beton özellikleri üzerinde sağladığı iyileştirmelere pek çok örnek gösterilebilir. Katkı maddeleri sayesinde betonun basınç ve eğilme dayanımları artırılabilen, geçirimsizlik özellikleri ve buna bağlı olarak durabilite özelliklerinde iyileştirmeler yapılabilmektedir. Ayrıca korozyon önleme, rötre azaltma, ayrışmadan yüksek kıvam artırma gibi işlenebilirlik özellikleri üzerindeki iyileştirmeler, priz süresinin ayarlanması, yüksek pompalabilirlik, amaca yönelik düzenlenebilir reolojik özellikler, çimento etkinliğinin artırılması ve alkali silika reaksiyon riskinin azaltılması gibi performans artırıcı etkiler de katkı maddelerinin avantajları olarak sayılabilir [13].

Su azaltıcılar (akışkanlaştırıcılar): Genel olarak bu katkılar sayesinde yüksek işlenebilirlik değerlerine sahip çok düşük su/çimento oranlı betonlar üretebilmek mümkün hale gelmiş, taze beton içerisine katılan çimento ve mineral katkı maddeleri gibi yüksek incelikli malzemelerin beton içinde flokülleşmeden dağılması ve bu sayede daha yüksek hidrasyon derecelerine ulaşılabilmesi sağlanmıştır. Akışkanlaştırıcı katkıların taze beton ve harç karışımlarında sağladığı bu iki önemli iyileştirme sayesinde ise sertleşmiş betonların dayanım ve dürabilite özelliklerinin neredeyse tek bir katkı tipi ile kayda değer biçimde iyileştirilebilmesi mümkün olmuştur [13].

Priz hızlandırıcılar: Priz geciktiricilerin aksine, bu katkılar betonun katılma süresini kısaltırlar. Bazı uygulamalarda, erken kalıp almada ve soğuk hava dökümlerinde don olayı başlamadan betonun sertleşmesini sağlamak için kullanılırlar.

Priz geciktiriciler: Taze betonun katılma süresini uzatırlar. Uzun mesafeye taşınan betonlar veya sıcak hava dökümleri için yararlıdırlar.

Su geçirimsizlik katkıları: Sınırlı miktarda hava sürükleyen katkılardır ancak yerine yerleşmiş betonun su sızdırmazlığının sağlanması uygun yerleştirme tekniğinin iyi bir şekilde yapılmasına bağlıdır [14].

Mineral katkılar

Çimento gibi öğütülmüş toz halde silolarda depolanan cüruf, uçucu kül, silis dumanı, taş unu gibi çeşitli maddelere mineral katkı adı verilir. Mineral katkılar tek başına iken çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar, fakat birlikte kullanıldıklarında çimentoya benzer görev yaparlar, dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katkılardan yüksek dayanımlı beton üretiminde de yararlanılmaktadır [14].

2.3.2 Betonun mekanik özellikleri

Bu bölümde betonun mekanik özellikleri olarak basınç dayanımı, gerilme-deformasyon özellikleri ve çekme dayanımına değinilecektir.

2.3.2.1 Betonun basınç dayanımı

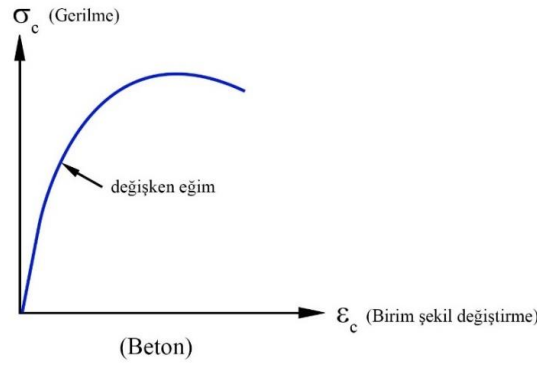
Beton, basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük ve gevrek bir malzemedir. Betonun çekme dayanımı çok düşük olduğundan hesaplarda basınç dayanımı üzerinde durulmaktadır. Betonun standart basınç dayanımı, suda saklanmış 28 günlük, çapı 150 mm, boyu 300 mm olan silindir numunelerin, eksenel basınç altındaki dayanımı olarak tanımlanır. Gerilme cinsinden ifade edilen dayanım, kırılma yükünün, silindirin alanına bölünmesiyle elde edilir. Küp ve silindir dayanımları arasındaki ilişkiye bakılırsa, silindir dayanımının küp dayanımına oranının, ortalama 0,80-0,85 olduğu bulunmuştur. Yapılan çevrimin %30'a varan hatalar içerebileceği unutulmamalıdır. Beton zamanla dayanım kazanan bir malzemedir. İlk 7 günde çok hızlı olan dayanım kazanımı, yavaşlayarak devam eder. Bu nedenle standart dayanımın belirli bir beton yaşı ile ifade edilmesi zorunlu olmuştur. Bugün tüm uluslararası ve ulusal yönetmeliklerde 28 günlük dayanım, standart dayanım kabul edilmiştir [12].

Betonun basınç dayanımına numune boyutları, yükleme hızı, su/çimento oranı, numunenin bakımı (kür) gibi birçok parametre etki etmektedir.

2.3.2.2 Betonun gerilme-deformasyon özellikleri

Malzemenin davranışının belirlenebilmesi için gerilme-birim şekil değiştirme (birim deformasyon) eğrileri büyük önem taşımaktadır. Betonun çekme dayanımının düşük olması nedeniyle hesaplarda basınç altındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

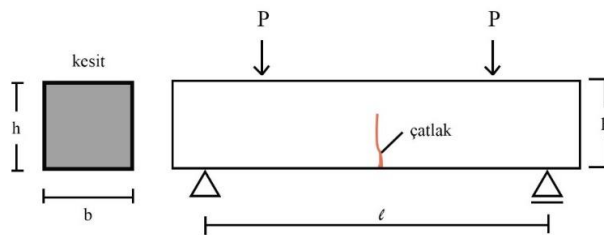
dikkate alınmaktadır. Betonun dayanımının yaklaşık %40'ına kadar davranışı doğrusal elastik kabul edilebilir. Ancak dayanımının yaklaşık olarak %70'inden sonra rijitlik azalırken, doğrusal olmayan bir değişim ortaya çıkar. Dayanıma yakın gerilmelerde genellikle yükleme doğrultusuna paralel çatlaklar oluşur ve ani bir şekilde güç tükenmesine erişilir [10]. Betonun basitleştirilmiş haldeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 2.4'te verilmiştir. Grafikte σ_c betonun gerilmesini, ϵ_c betonun birim şekil değiştirmesini göstermektedir.



Şekil 2.4 : Beton gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi (basitleştirilmiş).

2.3.2.3 Betonun çekme dayanımı

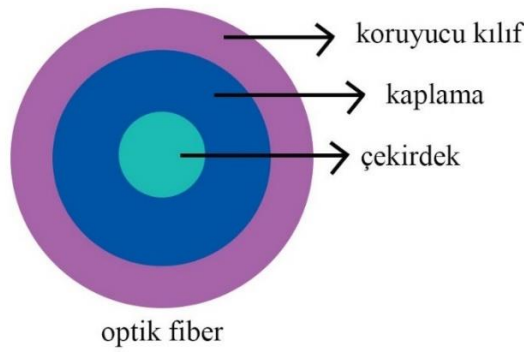
Betonun çekme dayanımı yaklaşık olarak basınç dayanımının %10'u kadardır. Maksimum çekme birim uzaması da 0,0001 civarında bulunur. Doğrudan doğruya eksenel basit çekme deneyi uygulamanın ve deney aletinde meydana gelebilecek ikincil gerilmelerin kontrolünün zor olmasından dolayı, farklı deney düzenekleri uygulanmıştır. Betonun çekme dayanımı bir silindirin çap doğrultusunda yüklenmesi (yarma) deneyi ile bulunabilir. Ayrıca betonun çekme dayanımı eğilme deneyi sonucunda da belirlenebilir (Şekil 2.5). Eğilme deneyinde en altta meydana gelecek çekme gerilmesi yine doğrusal elastik kabulü ile $P \cdot l / (b \cdot h^2)$ bağıntısından hesap edilebilmektedir [10]. Yükleme biçimine göre 3 noktalı veya 4 noktalı eğilme deneyleri yapılabilmektedir.



Şekil 2.5 : Beton kirişte eğilme deneyi (4 noktalı eğilme deneyi).

2.3.3 Optik fiber

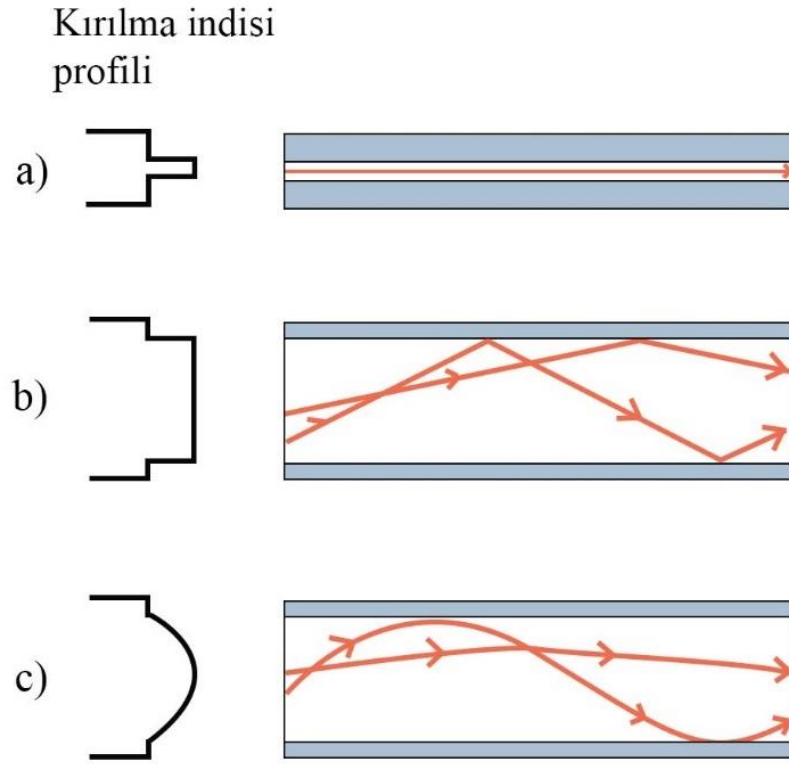
Işık geçiren betonların üretimlerinde çoğunlukla optik fiberler kullanılmaktadır. Optik fiberler genel olarak 2 ana kısımdan oluşmaktadır. Biri ışığın geçtiği çekirdek (core) bölgesi diğeri ise çekirdek bölgesini çevreleyen kaplama (cladding) bölgesidir. En dışta da genelde koruyucu kılıf (coating) bulunmaktadır (Şekil 2.6). Kaplama bölgesinin ışık geçirgenliğine bir katkısı olmamakla birlikte, kaplama bölgesi çekirdek bölgesinde ışığın kırılma indisini değiştirebilecek fiziksel etkilere koruma amaçlı tasarlanmıştır. Çekirdek bölgesinin kırılma indisi değeri kaplama bölgesinden bir miktar fazladır. Bu nedenle çekirdeğe giren ışığın geliş açısı Snell Yasası tarafından belirlenen kritik açıdan daha büyük olduğunda gelen ışık, çekirdek bölgesinde hapsolarak fiber boyunca yayılmaya devam eder. Işık yayılırken çekirdek-kaplama ara yüzeyinden tekrar çekirdek bölgesine geri yansıtılır [15].



Şekil 2.6 : Optik fiber yapısı.

Optik fiberler genellikle iki sınıfa ayrılabilir: Tek modlu (SMF-single mode fiber) ve çift modlu fiberler (MMF-multimode fiber). Adlarından da anlaşılacağı gibi, tek modlu (SMF) yalnızca bir yayma moduna izin verirken, çok modlu (MMF) optik fiberler çok sayıda modu yönlendirebilir. Çok modlu optik fiberler, basamak indisli (SI-step-index) ve derece indisli (GI-graded-index) olarak ikiye ayrılmaktadır. SI optik fiber lifi tüm çekirdekte sabit bir kırılma indisine sahiptir. Kırılma indisi, çekirdek-kaplama sınırında aniden değişir. GI lifi neredeyse parabolik kırılma dağılımına sahiptir (Şekil 2.7). Kırılma indisi, çekirdek merkezinden kademeli olarak azalır [15].

Işık geçiren beton uygulamalarında plastik optik fiber (POF) ve cam optik fiberler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada da en çok kullanılan bu iki çeşidine aşağıda değinilmiştir.



Şekil 2.7 : Işığın optik fiberde yayılışı a) tek modlu fiber (SMF), b) SI çok modlu fiber (MMF), c) GI çok modlu fiber (MMF).

2.3.3.1 Plastik optik fiber

Plastik optik fiberler genellikle silikon reçine kaplamalı ve polikarbonat çekirdekten oluşur. Cam optik fiberlere göre daha esnek olduğundan çatlamalara karşı dayanıklıdır. 0,15-2 mm (küçük çekirdek) ve 20 mm'e kadar (büyük çekirdek) farklı çaplarda çeşitleri bulunmaktadır [16].

İlk POF (plastik optik fiber) 1960'ların ortalarında icat edildiğinden beri, POF performansını artırmak ve malzemeyi geliştirmek için önemli çabalar sarf edilmiştir. POF üretimi için malzeme seçimi veya tasarımı için temel gereksinimler, polimerin tamamen şeffaf, yüksek sıcaklıklara dayanıklı, fiber olarak kullanılabilmesi ve mekanik olarak esnek olmasıdır. Sıcaklık gereksinimi POF'lerin hangi amaçla kullanılacağına bağlı olsa da genelde en az 80 °C dayanması beklenmektedir [15].

PMMA (polimetilmetakrilat) korozyona karşı dirençli ve seri üretilen bir polimerdir. PMMA'nın geçirgenliği genel olarak optik polimerler arasında en yüksektir. PMMA'nın görünür ışığın %93-94'ünü ilettiği ve geri kalanını yansıttığı bilinmektedir. 1975 Yılında Mitsubishi Rayon tarafından ticarileştirilen ilk POF ürününden bu yana, çoğu plastik optik fiber PMMA kullanılarak üretilmiştir [15].

2.3.3.2 Cam optik fiber

2001 yılında Aron Losonczy ilk ışık geçiren betonu ürettiğinde cam optik fiberleri kullanmıştır. Ancak daha sonra cam optik fiberlerin daha maliyetli olması sebebiyle üretimlerde daha çok plastik optik fiberler kullanılmaya başlanmıştır [8]. Cam optik fiberler tipik olarak daha az saf cam veya plastik kaplamaya sahip saf bir cam (SiO_2) çekirdekten oluşur. Cam optik fiberlerin birçok faydası vardır, ancak plastik optik fiberde olduğu gibi bazı dezavantajlar da vardır. Avantajları; sıcaklığa dayanıklı olması, nemli ortamdan etkilenmemesi, UV görünür ve kızılötesi ışık (200-2200 nm) arasında değişen çok daha geniş bir spektrum iletebilmesi olarak sıralanabilir. Dezavantajları ise, kırılma ve kırılmaya eğilimli olması, çaplarının ise genelde 0,05 - 0,15 mm arasında değişen küçük değerlerle sınırlı olmasıdır [16].

2.3.4 Işık geçirimi için kullanılan diğer malzemeler

Optik fiberlerin maliyetinin yüksek ve uygulanmasının karmaşık olması nedeniyle daha ekonomik malzemeler kullanılarak ışık geçiren beton üretimleri yapılmıştır. Bunlardan en çok kullanılanları atık cam ve reçinedir.

2.3.4.1 Atık cam

Her iki ucunun beton panelin yüzeyinde olması koşuluyla ışık geçiren betonlarda atık cam kullanılabilir. Atık cam süreksiz olduğundan, ışık geçirgenliğini iyi düzeyde sağlamak için atık camlı ışık geçiren panellerin kalınlığı sınırlıdır. Atık cam uygulamasında karşılaşılan bir sorun da alkali silika reaksiyonudur (ASR). Bunu önlemek için beton karışımında metakaolin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBS), silis dumanı veya uçucu kül gibi mineral katkıları kullanılabilmektedir [8].

Alkali silika reaksiyonunda, belirli silika formlarını içeren agregalar, çevredeki çimento hamurundan veya ortamdan suyu absorbe ederken şişen bir jel oluşturmak üzere betondaki alkali hidroksit ile reaksiyona girecektir. Bu jeller betona zarar verecek kadar geniş bir basınç neden olabilir. Betonda oluşan basınç da çatlamalara neden olacak ve betona zarar verecektir [17].

Yapılan bir çalışmada 50 cm x 50 cm x 2,5 cm boyutlarına sahip, atık cam içeren %5 ışık geçirimine sahip bir ışık geçiren beton panelin, 4,5 m x 4,5 m x 3 m boyutlarındaki bir oda için enerji ihtiyacını %12,7-16'ya kadar düşürdüğü sonucu elde edilmiştir. Yapılan simülasyonlarda %11 ışık geçirgenliğine sahip bir panelin kullanımıyla enerji

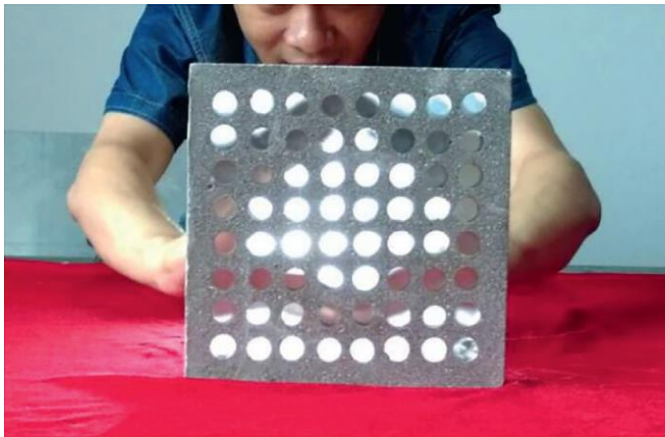
ihtiyacının %20,6'ya kadar düştüğü görülmüştür [18]. Çalışmada üretilen panele ait görünüm Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8 : Atık cam içeren ışık geçiren beton panel [18].

2.3.4.2 Reçine

Işık geçiren betonun mekanik özelliklerinin ve ışık geçirgenliğinin araştırılmasında polimetil metakrilat (PMMA) reçinesi, polyester reçinesi ve epoksi reçinesi gibi farklı polimer reçineleri kullanılmıştır. Cam ve optik fiber ile karşılaştırıldığında, polimer reçine işçilik maliyeti açısından ekonomik seçeneklerden bir tanesidir [8]. Yapılan bir çalışmada 10 cm x 10 cm boyutlarındaki farklı kalınlıklarda üretilen reçineli ışık geçiren betonun ışık geçirgenlikleri ölçülmüştür. Reçine malzemesinin, 100 mm kalınlıkta %93'e varan ışık geçirgenliğine sahip olduğu ve 100 mm'yi aşan kalınlıkta ise ışık geçirgenliğinin %60 olduğu sonucuna varılmıştır [5]. Şekil 2.9'da yapılan çalışmada üretilen reçineli ışık geçiren beton panel görülmektedir.



Şekil 2.9 : Polimer reçine içeren ışık geçiren beton panel [5].

2.4 Işıık Geçiren Beton Üretimi ve Kullanımı

Işıık geçiren beton, sürdürülebilir bir malzeme olmasının yanında görsel anlamda da dikkat çekici özelliklere sahiptir. Geleneksel betonlara kıyasla içerisinde optik fiber barındırdığından daha pahalı ve işçilik gerektiren bir malzemedir. Bu yüzden geleneksel betona tam anlamıyla alternatif olamamıştır. Ancak keşfinden bu yana daha düşük maliyetli alternatiflerin gelişmesi ile ışık geçiren betonlar hala popüler uygulamalar arasında yerini almaktadır. Özellikle bodrum katlar, karanlık yol kenarları, ofis alanları gibi ışığa ihtiyaç duyan alanlarda kullanılabilir [19].

Işıık geçiren beton, mimari uygulamalarda estetik ve yüksek dayanım özelliklerini bir arada barındırmaktadır. Işıık geçiren betonun en sık kullanıldığı alan geçirgen duvar paneli imalatlarıdır. Beton tasarımının üretici firma kontrolünde olması sebebiyle yapısal beton eleman olarak prefabrik halde imal edilebilir. Işıık geçiren beton bölme duvar ve zemin döşemesi olarak iç mekân uygulamalarında da kullanılabilir. Alttan ışııklandırma (LED-Light Emitting Diode kullanarak) ya da fosfor ilave edilerek gündüz normal beton şeklinde görülen yüzey, gece istenen renkteki ışııkta görülebilmektedir. Işıık geçiren beton görselliğın ve estetiğın ön planda olduğu dekoratif elemanlar ve şeffaf obje üretimi, renkli beton uygulamaları gibi her alanda kullanılabilir [19].

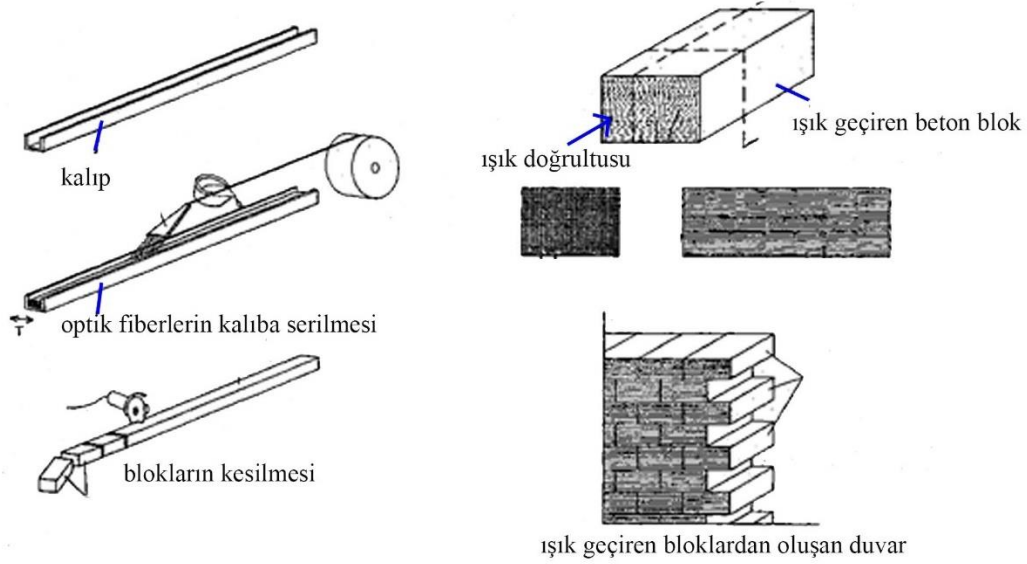
Işıık geçiren beton yapı malzemesi olarak taşıyıcı veya taşıyıcı olmayan duvar bölmeleri olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Daha önce yapılan araştırmalarda ışık geçiren beton elemanlarda basınç dayanımında azalma olmadan ışığı iletebildiğı ve ışık enerjisi tüketimini %50'ye kadar azaltabildiğı görülmüştür. Ancak hala yapı endüstrisinde sürdürülebilir bir malzeme olarak geniş çapta kabul görmemiştir. Bunun sebeplerine yoğun işçilik maliyeti, üretim sürecinin karmaşıklığı, kullanım ömrü bakımından dayanıklılık ve mekanik özelliklerine dair güvenilir bir veri olmaması, daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyan yeni bir malzeme olması verilebilir [8].

2.4.1 Üretim yöntemleri

2.4.1.1 Litracon

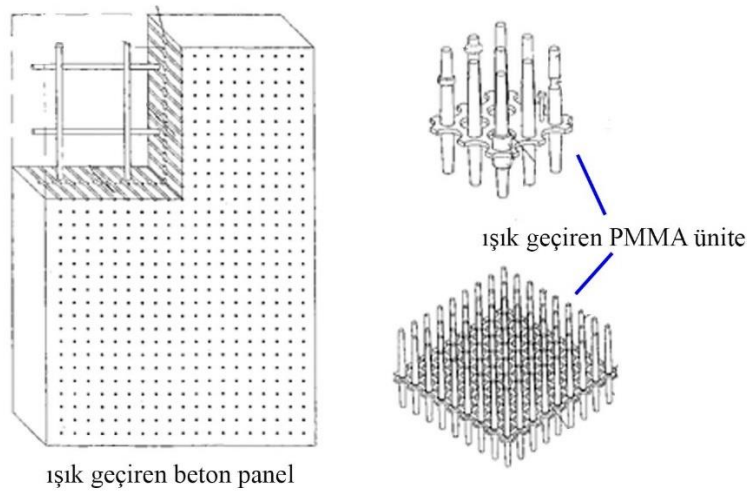
Dünya'da üretim yapan önemli firmaların kullandığı üretim metotları kullanılan ışık geçiren malzemeye göre çeşitlilik göstermektedir. Aaron Losonczı'nın kurucusu olduğu Macaristan'dan Litracon firması genel olarak 2 tür üretim metodu

kullanmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi küçük çapta optik fiberlerin kalıba serilerek yerleştirilmesi ve üzerine beton dökülmesidir. Beton sertlik kazandıktan sonra istenilen ölçülerde paneller kesilebilmektedir. Optik fiberler ışık yönüne göre yerleştirilmektedir. Yönteme ait görsel Şekil 2.10'da verilmiştir [20].



Şekil 2.10 : Litracon'un kullandığı üretim metodu [20].

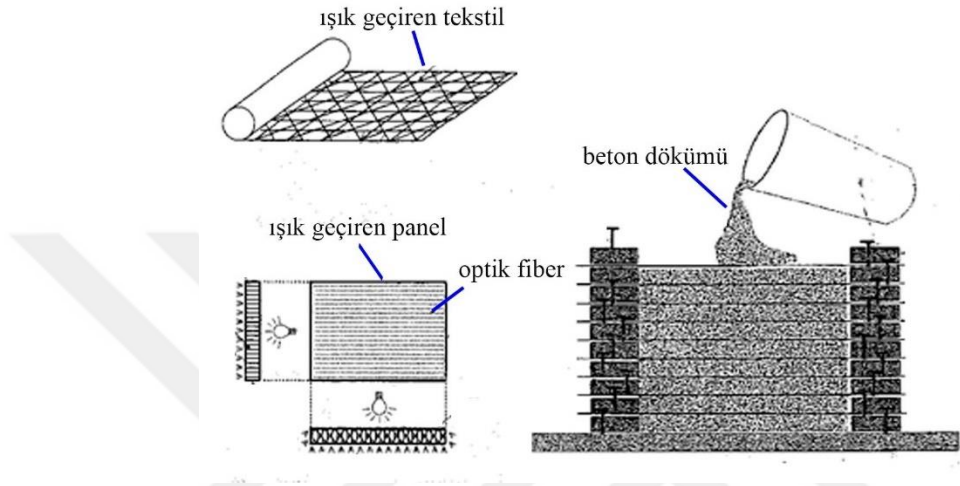
Litracon'un kullandığı diğer bir üretim yöntemi ise ışık geçiren PMMA ünitelerin birleştirilmesi ve kalıba yerleştirilip üzerine beton dökülmesidir. PMMA ünitelerin birbirine geçmesi için tüpler arasında bağlantılar bulunmaktadır bu yüzden üniteler kolayca birbirine geçebilmektedir. Ayrıca ışık geçiren parçaların arasına paneli güçlendirmek ve betonda oluşabilecek çatlamları önlemek için donatı konulabilmektedir. Üretim yöntemine ait görsel Şekil 2.11'de verilmiştir [21].



Şekil 2.11 : Litracon'un kullandığı üretim metodu [21].

2.4.1.2 Lucem

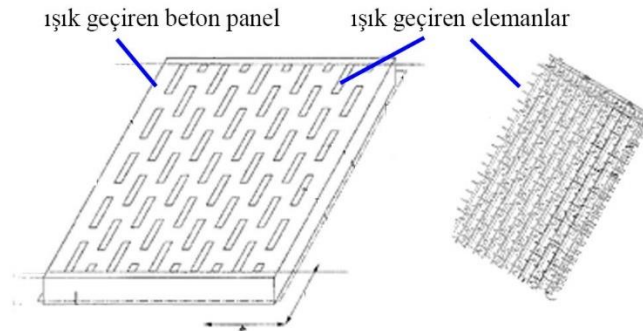
Andreas Roye'nin kurucusu olduğu Lucem firması da ışık geçiren beton üretimi yapan firmalardan bir tanesidir. Lucem firmasının kullandığı üretim yöntemi ise ışık geçiren fiberlerin tekstil (kumaş) halinde serilmesi ve beton dökülmesi şeklindedir [22]. Tekstil ürün paralel, dik ve eğik doğrultularda fiberlerin birleşimi şeklindedir. Üretim yöntemine ait görseller Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12 : Lucem'in kullandığı üretim metodu [22].

2.4.1.3 Italcementi

Italcementi SpA firmasının ışık geçiren malzeme olarak optik fiber yerine şeffaf polimer malzeme kullandığı özel bir üretim yöntemi de bulunmaktadır. Italcementi firması normalde ışık geçiren beton üretmemekle birlikte geliştirdikleri üretim yöntemini sadece Şangay Expo'daki İtalyan Pavilyonu'nda kullanmışlardır. Üretilen paneller içerisinde çok sayıda ışık geçiren eleman, yatay ve düşeyde yerleşen donatı elemanları bulunmaktadır. Üretim yöntemine ait görünüm Şekil 2.13'te verilmiştir [23].



Şekil 2.13 : Italcementi'nin kullandığı üretim metodu [23].

2.5 Dünya'dan ve Türkiye'den Üretici Firmalar

Işık geçiren beton üreten firmalardan dünyadaki önemli üretici firmaların isimleri Macaristan'da Litracon, Avusturya'da Luccon ve Almanya'da ise Lucem'dir. Türkiye'den ise ışık geçiren beton alanında patentli ürünü (Fibro-Transbeton) bulunan Fibrobeton firması önemli üreticiler arasında yer almaktadır.

2.5.1 Litracon

2001 yılında Aron Losonczi ilk ışık geçiren betonu üretmiş ve 2002 yılında ürünü için patent almıştır. Daha sonra 2004 yılında Litracon firmasını kurmuştur. Şirket, Macar kasabası Csongrad'da bulunmaktadır ve ışık geçiren beton ürünleri geliştirme ve üretimi ile ilgilenmektedir. Losonczi, daha sonra 2007 yılında Litracon pXL ürünü için ikinci patentini almıştır [4].

2.5.1.1 Litracon ürünleri

Litracon firmasına ait dünyanın ilk ticari olarak temin edilebilen ışık geçiren betonu olan Litracon Classic ürünü, optik fiber (cam) ve ince agregalı betonun birleşimidir. Bu üründe kullanılan liflerin küçük boyutlarından dolayı, lifler betona karışarak küçük agregat parçaları gibi malzemenin bir bileşeni haline gelirler. Üretilen en büyük panel boyutu 1200 mm x 400 mm'dir. Panel kalınlığı ise 25-200 mm arasında değişmektedir. Litracon Classic, TIME dergisi tarafından 2004 yılının en önemli icatları arasında gösterilmiştir [4]. Şekil 2.14'te firmaya ait Litracon Classic ürününe ait görünüş verilmiştir.



Şekil 2.14 : “Litracon Classic” ürünü [4].

Litracon Classic 'in aksine, Litracon pXL'in içerisinde ışık geçirimi için optik fiber yoktur. Litracon pXL özel olarak oluşturulmuş bir plastik ünedir. Hazır plastik

Ünitelerin kolayca bir araya getirilmesi montaj ve işçilik açısından diğer ürüne göre kolaylık sağlamaktadır. Panel boyutları maksimum 3010 mm x 1210 mm olmaktadır. Panel kalınlığı ise 80 mm’dir. Iş ın geçtiği noktaların LCD ekrandaki pikseller gibi paneller üzerinde düzenli bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir (şekil 2.15). Ayrıca, bu ürün kullanılarak istenilen desen ve logoları oluşturmak oldukça kolaydır. Litracon pXL ile sadece düz paneller değil, katlanmış veya kavisli formlar gibi üç boyutlu nesneler oluşturmak da mümkündür. Diğerlerinin yanı sıra, bu seçenek örneğin mimarlara kamusal alanlarda sokak mobilyalarında farklı tasarımlar yapabilmeleri için fikirler verebilmektedir [24].



şekil 2.15 : “Litracon pXL” ürünü [24].

2.5.2 Lucem

Lucem firması 2007 yılında kurulmuş olup RWTH Aachen  niversitesi'nin bir kuruluşu olarak, uluslararası tasarım ve mimari projeler için ışık geçiren beton üretimi yapmaktadır.  r nler elle üretilmekte ve talep üzerine az miktarlarda üretim yapılmaktadır. Başlangıçta, Lucem ışık geçiren betonun sadece “Lucem Line” adını verdikleri bir modelini üretmekteydi (şekil 2.16). Metrekare başına 200.000 fiberin kullanıldığı bu üründe, yüksek homojenlik, ışık ve gölge iyi bir şekilde görülebilmektedir. şirket daha sonra “Starlight”, “Label” ve “Pure” adını verdikleri farklı modeller de geliştirmiştir [25].

2.5.2.1 Lucem  r nleri

“Lucem Line” olarak üretilen ışık geçiren panellerin boyutları 1200 mm x 600 mm ve 1600 mm x 600 mm’dir (şekil 2.16). Kalınlıkları 20-30 mm arasında değişmektedir. İstenilen renkte panel  retilenilmektedir. Kullanılan optik fiber çapları 0,5 mm olup düzenli bir biçimde oluşturulmuşlar. Panellerin basınç dayanımı 70-85 MPa, eğilme

dayanımı ise 4 MPa'yı bulmaktadır. Yoğunluğu yaklaşık olarak 2400 kg/m³'tür. Yapı malzemesi sınıfı A2'dir [25]. A2 sınıfı malzemeler yangın yükü ve yangın gelişmesine önemli ölçüde katkıda bulunmamaktadır.



Şekil 2.16 : “Lucem Line” ürünü [25].

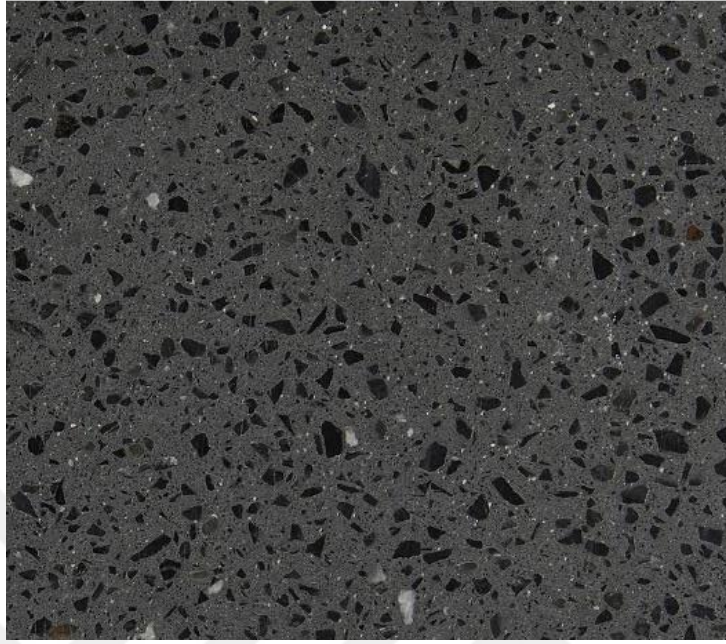
“Lucem Starlight” olarak üretilen ışık geçiren panellerin boyutları 1200 mm x 600 mm x 30 mm'dir (Şekil 2.17). İstenilen renkte panel üretilabilmektedir. Kullanılan optik fiber çapları 1-3 mm'dir. Bu modelde metrekare başına 500 optik fiber düzensiz biçimde yerleştirilmektedir. Basınç dayanımı 70-85 MPa, eğilme dayanımı ise 4 MPa'yı bulmaktadır. Yoğunluğu yaklaşık olarak 2400 kg/m³'tür. Yapı malzemesi sınıfı A2'dir [25].



Şekil 2.17 : “Lucem Starlight” ürünü [25].

“Lucem Pure” ürününde optik fiber bulunmamaktadır (Şekil 2.18). Üretilen panellerin boyutları 1200 mm x 600 mm x 30 mm'dir. İstenilen renkte panel üretilabilmektedir. Panellerin basınç dayanımı 70-85 MPa, eğilme dayanımı ise 12 MPa'yı bulmaktadır. Yoğunluğu yaklaşık olarak 2400 kg/m³'tür. Yapı malzemesi sınıfı A2'dir [25].

“Lucem Label” ürünü ise daha çok logo ve yazı gibi formların oluşturulmasında kullanılmaktadır (Şekil 2.19).



Şekil 2.18 : “Lucem Pure” ürünü [25].



Şekil 2.19 : “Lucem Label” ürünü [25].

2.5.3 Luccon ve Luccon ürünleri

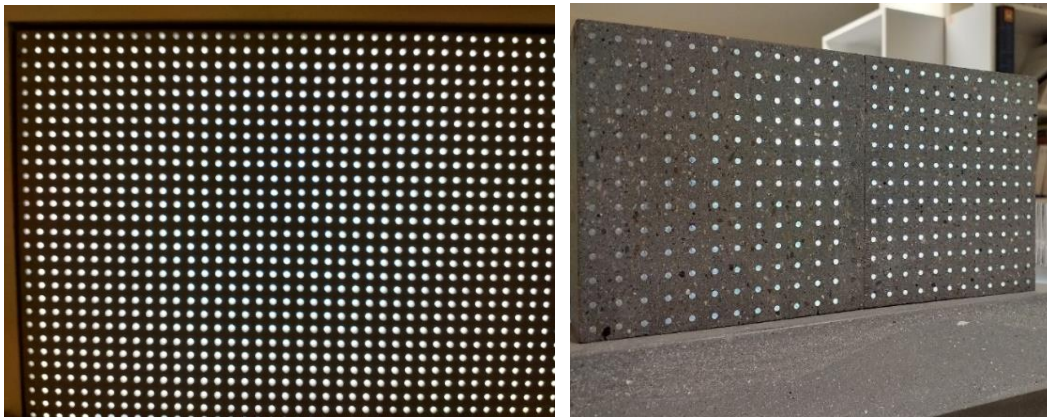
Luccon firması da Avusturya’da ışık geçiren üreten bir firmadır. Üretilen panel boyutları 1500 mm x 1000 mm ve 2000 mm x 1000 mm’dir. Panel kalınlıkları 20-30 mm’dir. Panel üretiminde metrekare başına 300.000 optik fiber yerleştirilmektedir. Kullanılan optik fiber çapları genelde 4 mm’dir. Panellerin basınç dayanımı yaklaşık 100 MPa ve eğilme dayanımı 10 MPa’dır. Yoğunluğu 2300-2400 kg/m³’tür [26]. Üretilen panel tipine ait görünüş Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20 : “Luccon” ürünü [26].

2.5.4 Fibrobeton ve Fibrobeton ürünleri

Fibrobeton firması 1987 yılında kurulmuş olup lif takviyeli beton kullanarak cephe paneli üretimi ve yapı kabuğu ile ilgili sistemlerin üretimi gibi birçok alanda faaliyet göstermektedir. 2009 yılında Litracon firmasıyla iş birliğine gitmiş ve ışık geçiren betonu Fibro-Transbeton adıyla Türkiye’de ilk kez kullanıcılara sunmuştur. Litracon pXL ve Fibro-Transbeton ürünlerinin özellikleri bu yüzden benzerlik göstermektedir. Fibro-Transbeton iç ve dış mekânlarda farklı amaçlarla kullanılabilir. Fibro-Transbeton panellerin yüzeylerindeki ışık noktaları, LCD ekranlardaki pikseller gibi homojen bir şekilde dağılmış şekilde görünmektedir (Şekil 2.21). Bu malzeme ile sadece düz paneller değil, katlanmış veya eğri formlar ile boş gövdeler gibi üç boyutlu objeler de üretilebilmektedir. Üretilen panel boyutları 40 mm kalınlık için 1200 mm x 600 mm ve 60 mm kalınlık için 3600 mm x 1200 mm’dir. İçeriğinde %4 PMMA, %96 beton bulunmaktadır. Yoğunluğu $2100-2400 \text{ kg/m}^3$ ’tür [27].



Şekil 2.21 : “Fibro-Transbeton” ürünü.

Üretici firmaların ürünlerinin malzeme özellikleri özet olarak Çizelge 2.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.2 : Farklı üreticilere ait ışık geçiren beton özellikleri.

	Lucem Line	Litracon Classic	Lucon	Litracon Pxl / Fibro-Transbeton
Boyutları (mm)	1200 x 600, 1600 x 600	1200 x 400	1500 x 1000, 2000 x 1000	1200 x 600, 3600 x 1200
Yoğunluk (kg/m ³)	2400		2300 – 2400	2100-2400
Bitiş (yüzey)	kaplamalı	kaplamalı	kaplamalı, cilalı, fabrika üretimli	cilalı, kalıplı, yıkamalı
Mevcut kalınlıklar (mm)	20 - 30	25 – 200	20 - 30	40 - 60
Dayanım	C70 / 85		≥ 100 N/mm ²	
Renkler	beyaz, koyu gri, gri	beyaz, gri, siyah	beyaz, gri, siyah	
Fiber sayısı	200.000 / m ²		300.000/m ²	-
Çekme dayanımı	>4 N/mm ²		> 10 N/mm ²	
Fiber çapı	0,5 mm		0,4 mm	

2.6 Uygulama Örnekleri

Işık geçiren beton ile ilgili yapısal ve yapısal olmayan birçok uygulama yapılmıştır. Işık geçiren betonla ilgili yapısal alandaki uygulamalardan en önemlileri Şangay Expo için inşa edilen İtalyan Pavyonu (Italian Pavilion) ve Abu Dhabi'deki Al Aziz Camisi'dir.

İtalyan Pavyonu, 2010 yılında Şangay Expo için 3600 m²'lik bir alana inşa edilmiştir. Sergi yapısı, yaklaşık 18 m yüksekliğinde olup Italcementi firması tarafından geliştirilen çimento esaslı bir malzeme ile reçine içeren ışık geçiren beton paneller kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 : İtalyan Pavyonu dış ve iç görünüşü [28].

Yapının %40'ını oluşturan 3774 ışık geçiren panel, toplamda 1.887 m²'lik bir alanı kaplamakta ve binada gün boyunca sürekli değişen bir dizi ışık ve gölge

oluşturmaktadır [28]. Italcementi firması ışık geçirgenliğini sağlamak için diğer firmalardan farklı olarak optik fiber yerine şeffaf reçine kullanmıştır [5].

Al Aziz Cami, 2015 yılında Birleşik Arap Emirlikleri'nin Abu Dhabi şehrinde inşa edilmiştir (Şekil 2.23). Işık geçiren betondan üretilen cephe panellerinin Lucem firması tarafından tasarımı, imalatı ve montajı yapılmıştır. Cami, yaklaşık 3 kat seviyesine dağıtılmış 5100 m²'lik bir alanı kapsamaktadır [29].



Şekil 2.23 : Al Aziz Cami, dış görünüşü [2].

Cephe panellerinin her bir boyutu 1800 mm x 1400 mm x 40 mm'dir. Yapıda 515 m²'lik bir alanı kaplayan yaklaşık 207 adet cephe paneli kullanılmıştır. Yapının cephesinde kullanılan panellerin üzerinde Allah'ın 99 ismini içeren Arapça harfler de bulunmaktadır (Şekil 2.24). Özellikle akşam saatlerinde yapı aydınlatıldığında cephedeki harflerin daha görünür olması sağlanmaktadır [29].



Şekil 2.24 : Al Aziz Cami, panel görünüşü [2].

Diğer önemli uygulamalara Litracon'un yaptığı Kanada'da Halifax Anıtı, İsviçre'de Garden Pavyonu (Pavilion), İzlanda'da bir sergi elemanı, Amerika'da Iberville Parish Gazileri Anıtı, Macaristan'da Erzsebet bankları, Japonya'da Stüdyo Hibiya duvarı ve Cella Septichora Müzesi sayılabilir.

Halifax Anıtı, 2007 yılında Kanada’da Adam Collins Architects tarafından tasarlanmıştır (Şekil 2.25). 70 mm kalınlığında ışık geçiren beton bloklardan oluşan yapı, 4 m yüksekliğinde ve kemer formundadır [30].



Şekil 2.25 : “Halifax Anıtı” görünüşü [30].

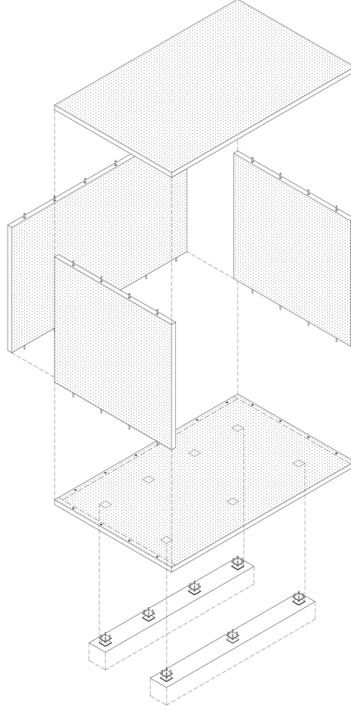
Garden Pavyonu, kendiliğinden destekli ilk ışık geçiren beton uygulamasına örnek olarak gösterilebilir (Şekil 2.26). 2013 yılında inşa edilen yapıda 80 mm kalınlığında, 360 cm x 230 cm boyutlarında Litracon pXL ışık geçiren beton paneller kullanılmıştır.



Şekil 2.26 : “Garden Pavyonu (Pavilion)” görünüşü [31].

Mimari tasarımı Gianni Botsford Architects’e, yapısal tasarımı Tall Engineers ve Hemmerlein Ingenieurbau’ya ait olan yapı zemin, duvar ve çatıyla birlikte 5 adet panelin bir araya gelmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 2.27). Panellerin içerisinde paslanmaz çelik donatı ve PMMA ışık geçiren üniteler bulunmaktadır. Beton dökümü,

donatıların ve PMMA ünitelerin yerleşimine dikkat edilerek yapılması gerektiğinden hassas bir işlemdir [31].



Şekil 2.27 : “Garden Pavyonu (Pavilion)” sistem görünüşü [31].

2015 yılında İzlanda’da düzenlenen Powering the Future sergisinde de ışık geçiren beton elemanlar kullanılmıştır (Şekil 2.28). İzlanda'nın Ulusal Enerji Şirketi Landsvirkjun'un 50. yıl dönümü için düzenlenen sergi Gagarin tarafından Tvíhorf Architects’in katkılarıyla tasarlanmıştır [30].



Şekil 2.28 : Sergi elemanı olarak kullanılan ışık geçiren beton panel [30].

Amerika’da yer alan 2008 yılında inşa edilen Iberville Parish Gazileri Anıtı 60 m² ışık geçiren siyah renkte betondan (Litracon Classic) oluşmaktadır (Şekil 2.29) [30].



Şekil 2.29 : Iberville Parish Gazileri Anıtı [30].

2013 yılında Macaristan’da Erzsebet’e 12 adet ışık geçiren beton bank yerleştirilmiştir (Şekil 2.30). Parçalar 80 mm kalınlığında Litracon pXL panellerden yapılmıştır ve gece aydınlatılabilmektedir [30].



Şekil 2.30 : Macaristan’da Erzsebet bankları [30].

2011 yılında Japonya Tokyo’da bir stüdyoda ışık geçiren betondan duvar uygulaması yapılmıştır (Şekil 2.31). 25 mm kalınlığında siyah ışık geçiren beton (Litracon) bloklardan oluşan ince duvar, stüdyonun lobisinde yer almaktadır. Videolar ve hareketli görüntüler duvardan izlenebilmektedir [30].



Şekil 2.31 : Japonya’da Stüdyo Hibiya [30].

2006 yılında inşa edilen Cella Septichora Müzesi'nin 2 ton ağırlığındaki ana giriş kapısı da 10 cm kalınlığında ışık geçiren (Litracon Classic) bloklardan yapılmıştır (Şekil 2.32). Duvarın yüksekliği 244 cm ve genişliği 361 cm'dir [30].



Şekil 2.32 : Cella Septichora Müzesi girişi [30].

Lucem firması tarafından yapılan uygulamalara Al Aziz Cami, Georgia Bankası, Hansa Carrée lobisi duvarı, Münih Havalimanı bankları ve farklı yerler için tasarlanan ofis mobilyaları gösterilebilir. 2021 yılında Almanya'da bir ofis binasının (Hansa Carrée) lobisinin duvarı ışık geçiren beton paneller (Lucem- Starlight) kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2.33) [2].



Şekil 2.33 : Hansa Carrée lobisi [2].

1975 yılında yapılmış olan Georgia Bankası (Bank of Georgia) binası 2007 yılında koruma altına alınmış ve 2010-2011 yılları arasında yeniden inşa edilmiştir. Yapıda toplamda 300 m²'lik ışık geçiren beton panel kullanılmıştır (Şekil 2.34). Paneller beyaz renkte ve Lucem Line ürününe uygun olarak üretilmiştir. Ofislerin bölme

duvarları ve tavanlarda kullanılan ışık geçiren beton panellerdeki ledler sayesinde koridorların ve iç mekânların aydınlatılması sağlanmaktadır (Şekil 2.35) [32].



Şekil 2.34 : Georgia Bankası, içeriden görünüm [32].



Şekil 2.35 : Georgia Bankası, koridor görünümü [32].

2015 yılında Münih Havalimanı için ışık geçiren betondan banklar yapılmıştır [2]. Şekil 2.36'da yapılan uygulamaya ait görünüm verilmektedir. Ayrıca yine Lucem firmasına ait ofis ve açık alan mobilya uygulamaları da bulunmaktadır (Şekil 2.37-Şekil 2.39).



Şekil 2.36 : Münih Havalimanı bankları [2].



Şekil 2.37 : Işık geçiren betondan üretilen ofis mobilyası [2].



Şekil 2.38 : Işık geçiren betondan üretilen ofis mobilyası [2].



Şekil 2.39 : Işık geçiren betondan üretilen kent mobilyaları [2].

Luccon firması da ışık geçiren betonla ilgili birçok çalışma ve uygulama yapmıştır. Luccon firmasına ait dış cephe paneli, mobilya ve bank tasarımı gibi uygulamalar bulunmaktadır. Firmanın yapmış olduğu uygulamalara ait görünümler Şekil 2.40-Şekil 2.42’de verilmiştir.



Şekil 2.40 : Luccon firması, ışık geçiren beton cephe paneli ve kent mobilyası uygulaması [26].



Şekil 2.41 : Luccon firması, ışık geçiren beton mobilya uygulaması [26].



Şekil 2.42 : Luccon firması, ışık geçiren beton panel uygulaması [26].

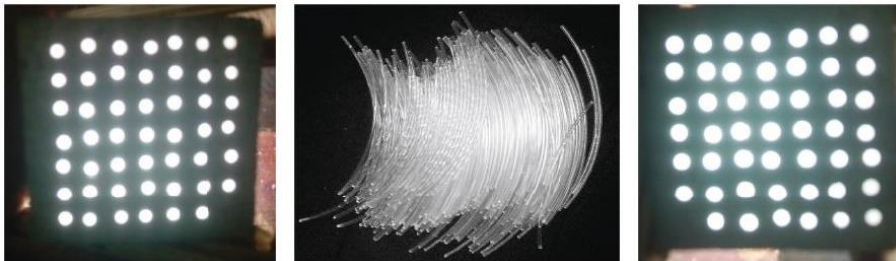
2.7 Daha Önce Yapılan Deneysel Çalışmalar

Bu tez için deneysel çalışma yapılmadan önce, daha önce yapılmış olan çalışmalarda kullanılan parametreler araştırılmıştır. Işık geçiren betonla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde optik fiber çapı ve optik fiber oranına bağlı parametrelerin sıklıkla kullanıldığı görülmüştür.

2.7.1 Kullanılan parametreler

2.7.1.1 Farklı optik fiber oranı ve optik fiber çapı

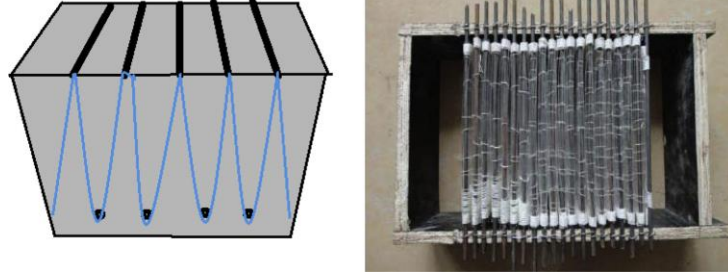
Optik fiberlerin farklı oranlarda ve çaplarda kullanılarak ışık geçiren beton üretilmesi daha önceki çalışmalarda sıklıkla yapılmıştır. 2019 yılında yapılan bir çalışmada %2, %4 ve %6 hacimsel oranlarında 2 mm ve 3 mm çaplarında plastik optik fiberler kullanılarak ışık geçiren beton numuneler üretilmiştir. Ayrıca 2 mm ve 3 mm çaplarında %6 oranında optik fiber kullanılarak 100 mm x 150 mm x 300 mm boyutlarında ışık geçiren panel üretimi yapılmıştır. 3 mm çapında optik fiber içeren numunelerin eğilme dayanımlarında optik fiber oranındaki artışa bağlı olarak sırasıyla yaklaşık %9,80, %14,71 ve %24,02 azalma görülmüştür. 2 mm optik fiber içeren numunelerin de benzer şekilde eğilme dayanımlarında %11-22 arasında azalma olmuştur [33]. Optik fiberli numunelerin optik fiber içermeyen referans numunelere göre, 28 günlük basınç dayanımlarında %8-24 arasında azalma olduğu görülmüştür. Ancak optik fiberli panellerin referans panele göre daha sünek davranışa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Üretilen numunelere ait görünüm Şekil 2.43'te verilmiştir. Yukarıda açıklanan deneysel çalışmada belirlenen parametreler; farklı optik fiber çapı ve optik fiber oranıdır.



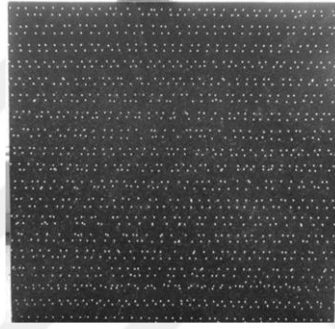
Şekil 2.43 : 2 mm ve 3 mm çaplı optik fiberlerden üretilen numuneler [33].

2015 yılında yapılan bir çalışmada kullanılan bir üretim yöntemi ise optik fiberlerin bir tekstil ürünü gibi birleştirilmesi ve çubuklar etrafında sarılarak kalıba yerleştirilmesidir (Şekil 2.44). Üretimlerde 0,5 mm ve 1 mm çaplarında optik fiberler

kullanılmıştır. Ayrıca %1-4 arasında farklı optik fiber yüzdeleri kullanılarak özellikleri karşılaştırılmıştır [1]. Üretilen panele ait görünüm Şekil 2.45'te verilmiştir. Yukarıda açıklanan deneysel çalışmada belirlenen parametreler; farklı optik fiber çapı ve farklı optik fiber yüzdesidir.

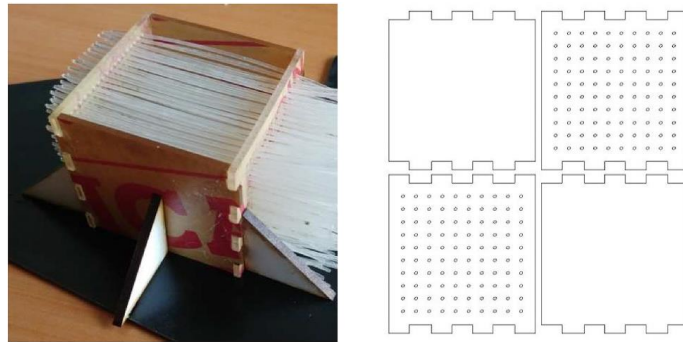


Şekil 2.44 : Optik fiber tekstilin çubuklar etrafında sarılması [1].

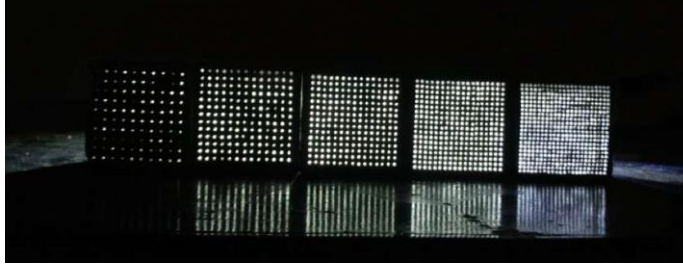


Şekil 2.45 : Üretilen panel görünümü [1].

2021 yılında yapılan bir çalışmada %3, %5, %7, %10 ve %15 oranlarında optik fiberler kullanılarak 5 cm x 5 cm x 5 cm boyutlarında ışık geçiren numuneler üretilerek numunelerin dayanımları ve ışık geçirgenlikleri belirlenmiştir. Her numune için numune boyutlarına göre küçük kalıplar üretilmiştir (Şekil 2.46). %3, %5, %7, %10 ve %15 optik fiber yüzdeleri için numunelerin ışık geçirgenliklerinin sırasıyla %1.23, %2.25, %4.31, %5.95 ve %7.39 olduğu görülmüştür [34]. Üretilen numunelerin görüntüleri Şekil 2.47'de verilmiştir. Bu çalışmada belirlenen parametre optik fiber yüzdesidir.



Şekil 2.46 : Kalıp hazırlanması [34].



Şekil 2.47 : Üretilen numune görünümleri [34].

2021 yılında yapılan başka bir çalışmada ise 1 mm ve 2 mm çaplı optik fiberlerin %1, %2, %3 ve %4 oranlarında beton karışıma katılmasıyla elde edilen ışık geçiren beton numunelerin yapay ve doğal ışık kullanılarak ışık geçirgenlik performansları detaylı olarak incelenmiştir. 10 cm x 10 cm x 10 cm boyutlarında toplamda 30 adet küp numune üretimi yapılmıştır (Şekil 2.48). Doğal ışık kullanıldığında %4 optik fiber oranına sahip numunelerin ışık geçirgenliklerinin %21,35 oranında, yapay ışık kullanıldığında ise %24,7 oranında olduğu görülmüştür. 2 mm çapında %4 oranında optik fiber içeren numunelerin ortalama basınç dayanımının yaklaşık 48 MPa olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda 48 MPa gibi yüksek basınç dayanımına sahip olan ışık geçiren betonun, yapılarda enerji tasarrufu sağlamak adına rahatlıkla kullanılabileceği sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca çalışmanın sonunda ışık geçiren betonun durabilite özelliklerinin araştırılmasının gerekli olduğu belirtilmiştir [7]. Yukarıda açıklanan deneysel çalışmada belirlenen parametreler; farklı optik fiber çapı ve optik fiber yüzdesidir.



Şekil 2.48 : Numunelerin üretilmesi [7].

2.7.1.2 Farklı yerleşim

2019 yılında ışık geçiren elemanların farklı yerleşim/desen oluşturarak bir araya gelmesiyle ilgili bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada beton içerisine tüpler yerleştirilmiştir ancak bunların optik fiber olmadığı görülmektedir. Numunelerin sadece basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Dairesel düzende yerleşen tüplere sahip

numune 13,78 MPa ile en yüksek basınç dayanım değerini almıştır. Kırıklı şekilde tüplerin yerleştigi numuneler ise 5,33 MPa ile en düşük basınç dayanım değerini almıştır [35]. Üretilen numunelerin görünümleri Şekil 2.49’da verilmiştir. Bu çalışmada belirlenen parametre beton içerisindeki tüplerin farklı düzende kullanılmasıdır.



Şekil 2.49 : Üretilen numune görünümleri [35].



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Literatür araştırması sırasında daha önce yapılan deneysel çalışmalar üzerinden belirlenen parametrelere göre numune üretimleri yapılmıştır. Bu tez çalışması için belirlenen parametreler optik fiber içeren numune grupları için optik fiber oranı, optik fiber düzeni ve optik fiber doğrultusudur.

Bu deneysel çalışmada numune üretimlerinde kullanılan ana bileşenler ışık geçiren eleman ve betondur. Işık geçiren elemanlar içeren numune tipleri ile karşılaştırmak için sadece betondan oluşan referans numune grubu üretilmiştir. Referans numune grubu REF olarak isimlendirilmiştir. Deneylerde iki farklı ışık geçiren malzeme tipi kullanılmıştır. Bunlar 0,5 mm çaplı optik fiberler ve PMMA ünitelerdir. Optik fiberlerin düzenleri (desenleri) farklı tutularak ışık geçiren betonun özelliklerini karşılaştırmak amacıyla 0,5 mm çapında optik fiberlerin kullanıldığı 2 numune grubu (AR1 ve AR2) üretilmiştir. Optik fiber oranlarına bağlı olarak numunelerin özelliklerini belirlemek için farklı optik fiber oranları kullanılmıştır. AR1 ve AR2 gruplarında %1, %1,6 ve %2,4 optik fiber hacimsel oranları kullanılarak 3 farklı optik fiber oranında numuneler üretilmiştir. Optik fiberlerin farklı doğrultuda yerleşmesiyle elde edilen numunelerin özelliklerini belirlemek için ise optik fiberler bu gruplarda hem uzun hem de kısa doğrultularda yerleştirilmiştir. Optik fiber içeren AR1 grubunun durabilite özelliklerini incelemek için AR1 numune grubuna hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulanmıştır. Uygulanan hızlandırılmış yaşlandırma koşulları; donma-çözülme, ıslanma-kuruma ve yüksek sıcaklıktır. AR1 grubuna uygulanan deneyler 28 günlük eğilme ve basınç deneyleri, ışık geçirgenlik deneyi, hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası uygulanan eğilme ve basınç deneyleridir. AR1 numunelerine yüksek sıcaklık uygulanmadan önce ve sonra ışık geçirgenlik değerleri belirlenmiştir.

Işık geçiren eleman olarak PMMA ünitelerin kullanıldığı numune grubu bu deneysel çalışmada PX ismini almıştır. PX grubuna uygulanan deneyler; 28 günlük eğilme dayanımı deneyi, 28 günlük basınç dayanımı deneyi, ışık geçirgenlik deneyi ve hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulandıktan sonra uygulanan basınç ve eğilme

deneyleridir. Uygulanan hızlandırılmış yaşlandırma koşulları; donma-çözülme, ıslanma-kuruma ve yüksek sıcaklıktır. PX grubu numunelerine hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulandıktan sonra numunelerin basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. PX grubunda numunelere yüksek sıcaklık uygulanmadan önce ve sonra ışık geçirgenlik değerleri belirlenmiştir.

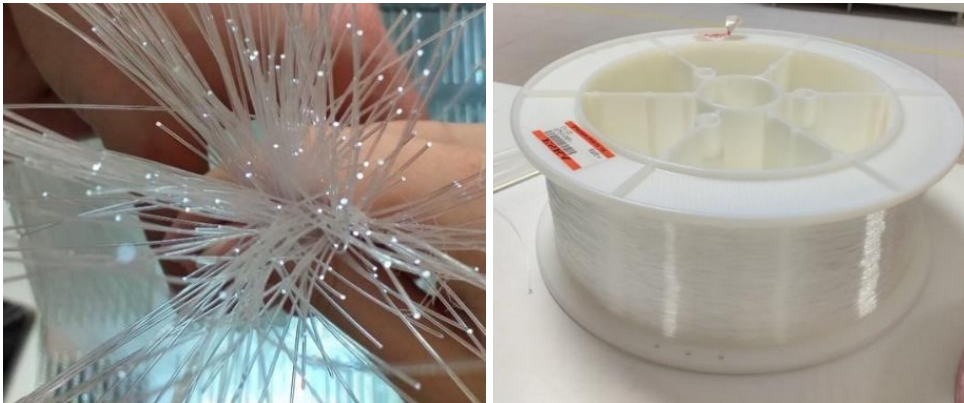
Deneylerde kullanılan malzemeler, numune özellikleri, numunelerin üretim süreci, üretim yöntemi, uygulanan deneyler ve deney sonuçları ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

3.1 Kullanılan Malzemeler

Numune üretimlerinde kullanılan ana malzemeler 0,5 mm çaplı optik fiberler, PMMA üniteler ve betondur.

3.1.1 “0,5 mm” çaplı optik fiber

AR1 ve AR2 numune gruplarının üretimlerinde Mitsubishi Chemical Corporation (MCC) tarafından imal edilen Eska™ marka CK 20 tipinde 0,5 mm çapındaki optik fiberler kullanılmıştır (Şekil 3.1). Optik fiberin çekirdek (core) malzemesi polimetilmetakrilat (PMMA) olup kaplama (cladding) malzemesi floropolimer’dir. Optik fiberin çekirdek bölgesinde ışığın kırılma indis değeri 1,49’dur. Çekirdek bölgesi çapı 485 μm , optik fiber dış çapı ise 500 μm ’dir. Kuru ortam şartlarında optik fiber -55 °C ile +70 °C arasındaki sıcaklık değerinde ışık geçiriminde bir bozulma olmadan kalabilmektedir.



Şekil 3.1 : 0,5 mm çaplı optik fiber.

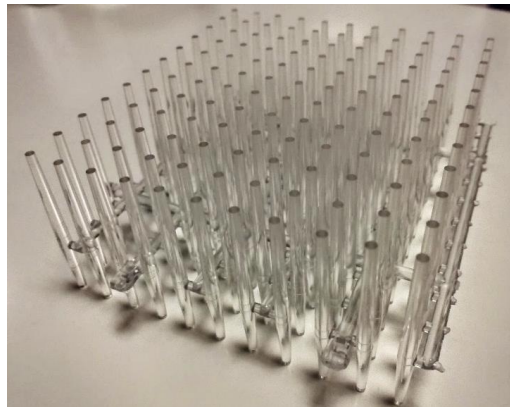
Malzemeye ait teknik bilgi formundan alınan detaylı bilgiler Çizelge 3.1’de yer almaktadır [36].

Çizelge 3.1 : Eska CK-20 optik fiber özellikleri [36].

Optik fiber yapısı			
Çekirdek malzemesi	Polimetil metakrilat (PMMA)		
Kaplama malzemesi	Floro polimer (Fluorinated Polymer)		
Çekirdek kırılma indisi	1,49		
Kırılma indis profili	Aşama indisi (Step index)		
Sayısal açıklık	0,5		
	Birim	Değer	
Çekirdek çapı	µm	485	
Dış çap	µm	500	
Yaklaşık ağırlık (g/m)	0,24		
Performans			
Saklama ve çalışma koşulları	Kabul kriterleri	Birim	Değer
	Optik özelliklerde bozulma yok (kuru ortam)	°C	-55~+70
Nemli ortamda çalışma koşulları	Optik özelliklerde bozulma yok (<%95)	°C	Mak. 60
	Minimum Artış kaybı < 0,5 dB	mm	Min.10
Mekanik özellikler	eğilme yarıçapı	[çeyrek eğilme]	
	Çekme dayanımı	Akma noktasındaki çekme kuvveti	N Min.14

3.1.2 “2 mm” çaplı PMMA tüpler

PX numune grubunun üretiminde PMMA (Polimetil metakrilat) üniteler kullanılmıştır. Kullanılan PMMA ünitelere ait teknik bilgi formu elde edilemediğinden sınırlı bilgiye ulaşılmıştır. Ancak hazır ünitelerin malzemesinin polimetilmetakrilat (PMMA) olduğu bilinmektedir. Üniteler 2 mm çapında ışık geçiren PMMA tüplerden oluşmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : 2 mm çaplı PMMA tüpler.

Kullanılan bir adet ünitenin boyutu yaklaşık olarak 102 mm x 102 mm x 42 mm olup her bir ünite, içerisinde 144 adet tüp barındırmaktadır. PMMA tüpler birbirlerine eşit mesafelerde (8 mm) yer almaktadır.

3.1.3 Beton

Numune üretimlerinde beton karışımının içerisinde çimento, agrega, su, metakaolin, polimer ve süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Beton karışımının hazırlanmasında Fibrobeton Yapı Elemanları A.Ş. firması tarafından temin edilen bileşenler ve karışım oranları kullanılmıştır. Kullanılan bileşenlerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

3.1.3.1 Çimento

Yapılan karışımlarda Çimsa EKOBEYAZ Prekast marka Portland Kalkerli Çimento (TS EN 197-1 CEM II / B-L 42,5 R) kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun teknik bilgi formundan alınan kimyasal özellikler Çizelge 3.2’de, fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.3’te verilmiştir [37].

Çizelge 3.2 : Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri [37].

Kimyasal özellikler	Çimsa değerleri (%)	EN-197-1 Limitleri	
		Minimum	Maksimum
Çözünmeyen kalıntı	0,12	-	-
SiO ₂	17,50	-	-
Al ₂ O ₃	3,30	-	-
Fe ₂ O ₃	0,21	-	-
CaO	63,50	-	-
MgO	1,15	-	-
SO ₃	2,60	-	4,0
Kızdırma kaybı	11,20	-	-
Na ₂ O	0,25	-	-
K ₂ O	0,27	-	-
Klorür (Cl ⁻)	0,0080	-	0,1
Serbest CaO	1,40	-	-

Çizelge 3.3 : Kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri [37].

Fiziksel ve mekanik özellikler	Birim	Değerler	EN-197-1 Limitleri	
			Minimum	Maksimum
Özgül ağırlık	gr/cm ³	3,00	-	-
Özgül yüzey (Blaine)	cm ² /gr	5500	-	-
Priz başlangıcı	dakika	120	60	-
Priz sonu	dakika	145	-	-
Su	%	28,6	-	-
0,045 mm elekte kalıntı	%	1,2	-	-
0,090 mm elekte kalıntı	%	0,1	-	-
2 günlük basınç dayanımı	MPa	28,0	20,0	-
7 günlük basınç dayanımı	MPa	-	-	-
28 günlük basınç dayanımı	MPa	49,0	42,5	62,5

3.1.3.2 Agrega

Hazırlanan beton karışımlarında kullanılan agregası 43-47 AFS Silis kumudur. 0,5 mm çapındaki optik fiberlerin arasına beton karışımının iyice yerleşebilmesi için tane boyutu küçük olan bu kum çeşidi tercih edilmiştir. Silis kumunun Fibrobeton Yapı Elemanları firması AR-GE laboratuvarında yapılan elek analizine ait değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Kullanılan silis kumunun elek analizine ait değerler.

Tane ebatı (mm)	Elek üstü (gr)	Elek üstü (%)	Çarpım faktörü	Çarpım faktörü	Çarpım
1,400	0,000	0,000	1673	6	0,000
1,000	0,000	0,000	1183	9	0,000
0,710	0,060	0,118	943	15	1,775
0,500	3,740	7,377	598	25	184,418
0,355	14,320	28,245	421	35	988,560
0,250	22,210	43,807	298	45	1971,302
0,180	9,360	18,462	212	60	1107,692
0,125	1,010	1,992	150	81	161,361
0,090	0,000	0,000	106	118	0,000
0,063	0,000	0,000	75	164	0,000
Tava	0,000	0,000	35	275	0,000
Toplam	50,70	100			4415,108

3.1.3.3 Mineral katkı - Metakaolin (MTKL)

Yapılan karışımlarda yaklaşık %4,14 oranında metakaolin (MTKL) kullanılmıştır. Fibrobeton Yapı Elemanları firması AR-GE laboratuvarından temin edilen MTKL kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Kullanılan metakaolinin (MTKL) kimyasal özellikleri.

Bileşen	Miktarı (%)
SiO ₂	59,78
Al ₂ O ₃	10,23
Fe ₂ O ₃	0,44
CaO	9,91
MgO	1,59
K ₂ O	0,90
Na ₂ O	0,05
SO ₃	1,25
P ₂ O ₅	0,04
TiO ₂	0,15
Cr ₂ O ₃	0,0186
Mn ₂ O ₃	0,0077
Kızdırma kaybı	16,24

3.1.3.4 Akrilik esaslı polimer

Karışımında kullanılan polimer markası ACS LATEX 5'dir. ACS LATEX 5 akrilik dispersiyon esaslı, çimento esaslı sıva ve şaplarda harçların kalitesini, aderans ile geçirimsizliğin artırılması için kullanılan katkı malzemesidir. Polimere ait fiziksel özellikler Çizelge 3.6'da verilmiştir [38].

Çizelge 3.6 : Kullanılan polimerin fiziksel özellikleri [38].

Malzemenin yapısı	Modifiye edilmiş akrilik dispersiyon
Renk	Beyaz
Katı madde oranı	%44
Yoğunluğu	1,10 kg/lt
Uygulama zemin sıcaklığı	+ 5 °C - +35 °C
Servis sıcaklığı	- 20 °C - +80 °C

3.1.3.5 Süper akışkanlaştırıcı

Yapılan beton karışımlarında BUILDENT WR-780 polikarboksilat eter süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. BUILDENT WR-780 açık kahverengi sıvı görünümündedir. Kullanım avantajlarında düşük su/çimento oranıyla yüksek basınç dayanımının sağlanması ve iyi akışkanlık özellikleri yer almaktadır [39]. Malzemenin teknik bilgi formundan alınan BUILDENT WR-780'in fiziksel özelliklerine ait değerler Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : BUILDENT WR-780 fiziksel özellikleri [39].

Görünüm	Açık kahverengi sıvı
Koku	Karakteristik
Toplam katı içeriği	Yaklaşık %55 (w/w)
pH (seyreltilmemiş)	2,5
Özgül ağırlık	1,11 (25 °C)
Viskozite, Brookfield viskometre, cps	500 (25 °C)

3.1.3.6 Su

Yapılan karışımlarda kullanılan su/çimento oranı %38,89'dur. Karışımlarda kullanılan su, Düzce havzasından toplanan kuyu suyudur. Suyu ait analizler Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır. Analizler 23,2 °C sıcaklık, %55 nem koşullarında yapılmıştır. Kullanılan suyun özelliklerine ait değerler Fibrobeton Yapı Elemanları firmasından temin edilmiştir. Kullanılan suyun özelliklerine ait değerler Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Kullanılan suyun özellikleri.

Analiz adı	Değer	Birim	Analiz metodu
pH	8,27	-log [H ⁺]	TS ISO 10390
Toplam askıda katı madde	0,86	mg/L	Gravimetrik
Organik madde	0,39	mg/L	NPOC
Kurşun (Pb)	0,01	mg/L	
Çinko (Zn)	0,01	mg/L	
Fosfat	10,60	mg/L	TS EN ISO-14911
Klorür	7,79	mg/L	TS EN ISO-14911
Nitrat	1,10	mg/L	TS EN ISO-14911
Sülfat	0,08	mg/L	TS EN ISO-14911

3.2 Deney Yöntemi

3.2.1 Deneysel Çalışma Planı

Deneysel çalışmada kullanılan ve yukarıda özellikleri verilen malzemelerin karışım oranları Çizelge 3.9’da yer almaktadır. Numuneler hazırlanırken üretilen tüm karışımlarda aşağıdaki çizelgede verilen değerler kullanılmıştır. Kullanılan karışım oranları Fibrobeton Yapı Elemanları firmasının önerdiği değerlerdir.

Çizelge 3.9 : Kullanılan karışım oranları.

	%	kg
Çimento	37,24	22,5
Silis kumu	41,37	25
Metakaolin (MTKL)	4,14	2,5
Su	14,48	8,75
Akrilik bazlı polimer	1,41	0,85
Süper akışkanlaştırıcı	0,12	0,075
Siyah pigment	1,24	0,75
Su / çimento oranı	%38,89	

Deneysel çalışma planı Çizelge 3.10’da verilmiştir. Üretilen numunelere uygulanan deneyler, numune sayıları ve numune boyutları deneysel çalışma planında yer almaktadır. Numune isimleri sütununda REF numune grubu, AR1 ve AR2 numune grupları, PX numune grupları bulunmaktadır. Çizelgede verilen numune sayıları uygulanan deney tiplerine göre B, E ve I sütunlarına ayrılmıştır. B: Basınç Dayanım Testi, E: Eğilme Dayanım Testi, I ise Işık Geçirgenlik Testini simgelemektedir. Basınç dayanım testleri için belirlenen numune sayısı 6, eğilme dayanım testleri ve ışık geçirgenlik testleri için belirlenen numune sayısı 3’tür. AR1 ve AR2 grupları optik fiber içermekte, PX grubu PMMA üniteleri içermektedir. REF grubu sadece betondan oluşmuştur. Üretilen numune tiplerine ait detaylı bilgiler ilerleyen bölümde verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Deneysel çalışma planı.

Numune isimleri	Işık geçiren eleman oranı	7. gün	7. gün	28. gün	28. gün		Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası						
		40x40x40	40x40x160	40x40x40	40x40x160	40x40x40	Donma-çözülme		Islanma-kuruma		Yüksek sıcaklık		
							40x40x40	40x40x160	40x40x40	40x40x160	40x40x40	40x40x160	40x40x160
		B	E	B	E	I	B	E	B	E	B	E	I
REF	%0	6	3	6	3	3	-	-	-	-	-	-	-
AR1-1-K	%1	-	-	6	3	3	6	3	6	3	6	3	3
AR1-2-K	%1,6	-	-	6	3	3	6	3	6	3	6	3	3
AR1-3-K	%2,4	-	-	6	3	3	6	3	6	3	6	3	3
AR1-1-U	%1	-	-	-	3	-	-	3	-	3	-	3	-
AR1-2-U	%1,6	-	-	-	3	-	-	3	-	3	-	3	-
AR1-3-U	%2,4	-	-	-	3	-	-	3	-	3	-	3	-
AR2-1-K	%1	-	-	6	3	3	-	-	-	-	-	-	-
AR2-2-K	%1,6	-	-	6	3	3	-	-	-	-	-	-	-
AR2-3-K	%2,4	-	-	6	3	3	-	-	-	-	-	-	-
AR2-1-U	%1	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-
AR2-2-U	%1,6	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-
AR2-3-U	%2,4	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-
PX	%4,6	6	3	6	3	3	6	3	6	3	6	3	3

B: Basınç Dayanımı Testi
E: Eğilme Dayanımı Testi
I: Işık Geçirgenlik Testi

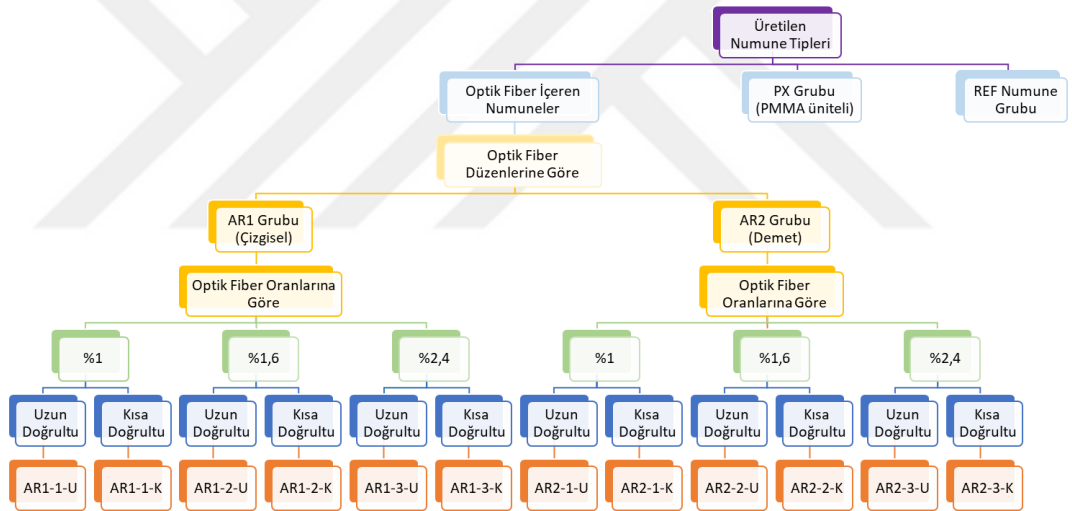
3.3 Numune Özellikleri

Deneysel çalışma kapsamında ışık geçiren betonun mekanik özelliklerinin detaylı olarak araştırılması için önce numune tipleri ve boyutları belirlenmiştir. Üretilen numune boyutları 40 mm x 40 mm x 160 mm olarak belirlenmiş ve tüm numune gruplarında aynı boyutlar kullanılmıştır. Işık geçiren numune gruplarıyla karşılaştırılmak üzere REF adıyla %0 optik fiber oranına sahip yani optik fiber içermeyen bir referans numune grubu üretilmiştir. Optik fiber içeren numune grupları AR1 ve AR2 isimlerini almıştır. Optik fiberler bu gruplarda numunelerin uzun doğrultuları veya kısa doğrultuları boyunca belirlenen optik fiber düzenine göre yerleştirilmiştir. AR1 grubu çizgisel optik fiber düzenine sahip, AR2 grubu ise demet (dörtlü optik fiber grubu) düzenine sahiptir. %1, %1,6 ve %2,4 olmak üzere 3 farklı optik fiber oranı kullanılmıştır. AR1 ve AR2 grupları optik fiber oranları ve optik fiber yerleşimindeki farklılıklara göre isimlendirilmiştir. Bu isimlendirmede düzen anlamında kullanılan ingilizce “arrangement” kelimesinin baş harfleri kullanılmıştır. İsimlendirmedeki 1 ve 2 ise farklı düzenleri temsil etmektedir. İsimlendirmenin ikinci

kısımında ise numunelerdeki farklı optik fiber oranlarını temsilen artış sırasıyla orantılı olarak 1, 2 ve 3 şeklinde isimlendirme yapılmıştır. Örneğin; %1 hacimsel yüzdeyle kısa doğrultuda optik fiber içeren AR1 grubu numunesi, AR1-1-K ismini almıştır. AR2 grubundan uzun doğrultuda %1 optik fiber içeren numuneler ise AR2-1-U ismini almıştır.

Bu deneysel çalışmada PMMA üniteleri içeren numune grubu PX olarak isimlendirilmiştir. PX numune grubunun üretiminde hacimsel yüzde olarak %4,6 PMMA ünite ve %95,4 beton kullanılmıştır. Numune boyutları 40 mm x 40 mm x 160 mm'dir.

Üretilen tüm numune gruplarını içeren tablo Şekil 3.3'te verilmiştir. Deneysel çalışmada üretilen numune grupları için aşağıdaki tabloda verilen isimler kullanılmıştır.



Şekil 3.3 : Üretilen numune tipleri.

3.3.1 REF numune grubu

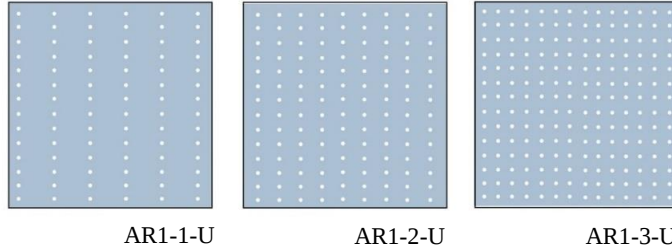
Işık geçiren elemanlar içeren diğer gruplarla karşılaştırmak amacıyla sadece betondan oluşan ve optik fiber içermeyen REF numune grubu üretilmiştir. REF grubu için numune boyutları diğer gruplarla aynı olup 40 mm, 40 mm ve 160 mm'dir. Bu grup için toplamda 6 adet numune üretilmiştir.

3.3.2 AR1 numune grubu

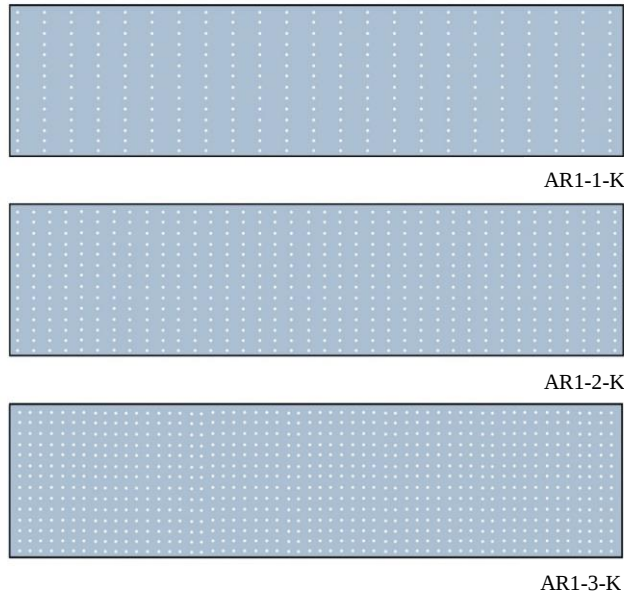
Optik fiber içeren AR1 grubu numunelerinde çizgisel bir optik fiber düzeni uygulanmıştır. Kısa ve uzun doğrultularda olmak üzere iki farklı doğrultu için optik

fiber yerleşimi uygulanmıştır. Üretimde kullanılan optik fiber çapı 0,5 mm'dir. %1, %1,6 ve %2,4 olmak üzere 3 farklı optik fiber oranına sahip numuneler sırasıyla AR1-1, AR1-2 ve AR1-3 olarak isimlendirilmiştir. Doğrultularına göre numuneler kısa doğrultu için AR1-1-K, AR1-2-K ve AR1-3-K, uzun doğrultu için AR1-1-U, AR1-2-U ve AR1-3-U isimlerini almıştır. 40 mm, 40 mm ve 160 mm boyutlarında optik fiber yerleşimlerine göre numune üretimleri yapılmıştır. Farklı optik fiber oranları ve doğrultuları için her numune tipinden 3 adet üretilmiştir

Numunelerin uzun doğrultusuna paralel olarak optik fiberlerin yerleştiği AR1 (U) grubu numunelerinin görünümüne ait çizim Şekil 3.4'te verilmiştir. AR1-1-K numuneleri üretiminde kısa doğrultuda %1 hacimsel yüzde için 324 adet optik fiber yerleştirilmiştir. AR1-2-K numunesi üretiminde kısa doğrultuda %1,6 hacimsel yüzde için 530 adet optik fiber ve AR1-3-K numunesi üretiminde kısa doğrultuda %2,4 hacimsel yüzde için 782 adet optik fiber yerleştirilmiştir (Şekil 3.5). Oluşturulan düzenlerde düşeyde sıra sayısı 14 olarak sabit tutulmuş yatayda optik fiberler arası mesafeler azaltılarak optik fiber oranları artırılmıştır.



Şekil 3.4 : AR1 grubu, uzun doğrultuda (U) optik fiber yerleşen numune tipleri.

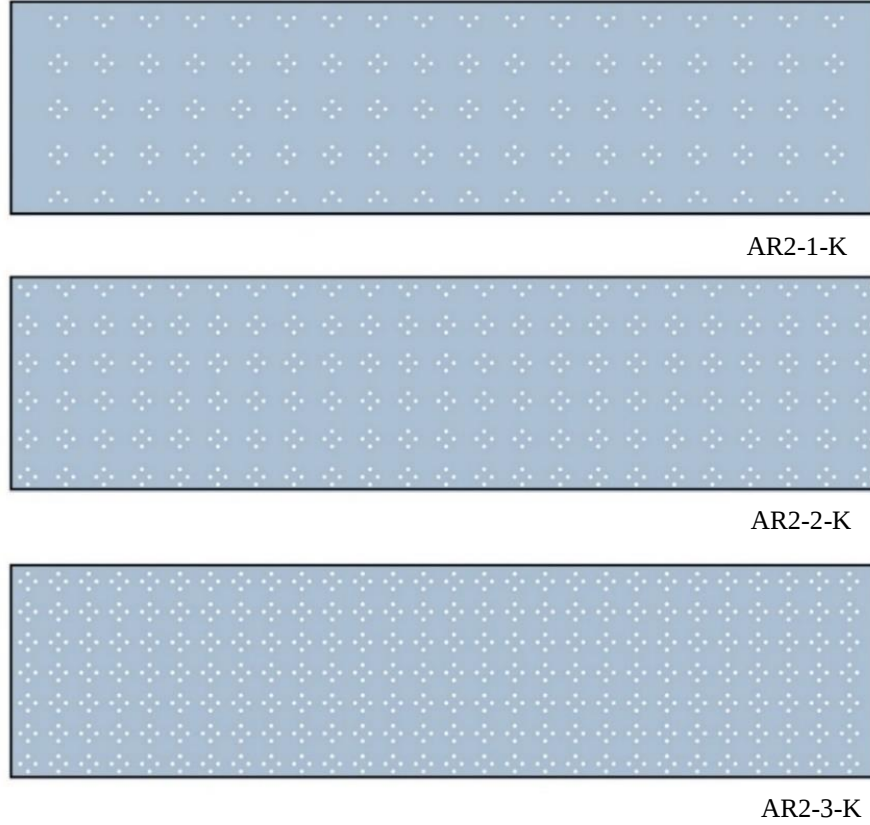


Şekil 3.5 : AR1 grubu, kısa doğrultuda (K) optik fiber yerleşen numune tipleri.

3.3.3 AR2 numune grubu

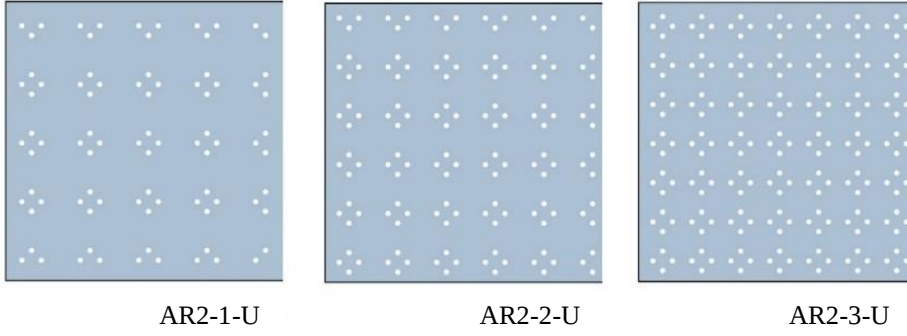
AR2 grubundaki numunelere AR1 grubundan farklı olarak demet biçimindeki optik fiberlerin tekrarıyla oluşturulan bir düzen uygulanmıştır. Üretimde kullanılan polimetilmetakrilat (PMMA) optik fiber çapı 0,5 mm'dir. %1, %1,6 ve %2,4 olmak üzere 3 farklı optik fiber oranına göre sırasıyla AR2-1, AR2-2 ve AR2-3 olarak isimlendirilmiştir. Kısa ve uzun doğrultularda olmak üzere iki farklı doğrultuda optik fiber yerleşimi uygulanmıştır.

Kısa doğrultu için %1, %1,6 ve %2,4 optik fiber oranları ve 40 mm x 40 mm x 160 mm numune boyutları kullanılarak üretim yapılmıştır (Şekil 3.6). Kısa doğrultuda optik fiber yerleşen numuneler isimlendirmede sonda K ile gösterilmiştir. Uzun doğrultu için ise U ile gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : AR2 grubu, kısa doğrultuda (K) optik fiber yerleşen numune tipleri.

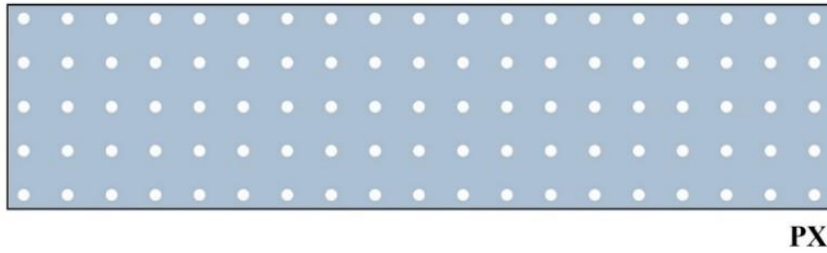
AR2-1-U numunelerinin üretiminde uzun doğrultuda %1 optik fiber (hacimsel) yüzdesi için 40 mm x 40 mm'lik bir yüzeye 84 adet optik fiber yerleşimi yapılmıştır. AR2-2-U numunesinde uzun doğrultuda %1,6 hacimsel yüzde için 130 adet optik fiber ve AR2-3-U numunesinde uzun doğrultuda %2,4 hacimsel yüzde için 195 adet optik fiber yerleşimi yapılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : AR2 grubu, uzun doğrultuda (U) optik fiber yerleşen numune tipleri.

3.3.4 PX numune grubu

PX numune grubu PMMA üniteler içermekte olup ışık geçiren tüpler düzenli bir şekilde yerleşmektedir. Numunelerde Fibrobeton Yapı Elemanları firmasından temin edilen 2 mm çaplı ve 42 mm yüksekliğe sahip polimetilmetakrilat (PMMA) tüplerden oluşan üniteler kullanılmıştır. Numuneler 40 mm, 40 mm ve 160 mm boyutlarında olup yaklaşık %4,6 oranında (hacimsel yüzde) şeffaf tüp içermektedir. PX grubu numunelerinde ışık geçiren tüplerin dağılımlarını gösteren çizim Şekil 3.8’de verilmiştir. 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarındaki numunelerin içerisinde 95 adet 2 mm çaplı polimetilmetakrilat (PMMA) tüp bulunmaktadır. PX grubunda ışık geçiren elemanlar, numunenin kısa doğrultusuna paralel olacak şekilde tek bir doğrultuda yerleştirilmiştir.



Şekil 3.8 : PX grubu, PMMA ünite içeren numune tipi.

3.4 Numunelerin Üretim Süreci

3.4.1 Numune tiplerine göre desenlerin oluşturulması

Belirlenen numune boyutları ve tiplerine göre farklı düzenlerin oluşturulması için Rhinoceros 3D ve AutoCAD yazılımları kullanılmıştır. 0,5 mm çapında optik fiber içeren AR-1 ve AR-2 grupları için Rhinoceros 3D ve Grasshopper 3D programları birlikte kullanılarak istenilen optik fiber düzenleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu çizimler AutoCAD programına aktararak kalıp tasarımı için gerekli düzenlemeler

yapılmıştır. Yapılan çizimlere ve belirlenen parametrelere ait şekiller Ek A'da verilmiştir.

3.4.2 Üretim yönteminin belirlenmesi

Numunelerin üretimi için Fibrobeton Yapı Elemanları firmasının Düzce'de bulunan üretim tesisleri ve laboratuvar olanaklarından yararlanılmıştır. Tüm numunelerin üretimine başlanmadan önce 0,5 mm optik fiber içeren AR1 ve AR2 grupları için küçük hacimde deneme dökümleri gerçekleştirilmiştir. Belirlenen düzenlerin uygulanabilmesi için farklı yöntemler kullanılarak uygun üretim yöntemi belirlenmiştir. Yapılan deneme çalışmalarında kullanılan ilk yöntem lazer kesim ile delik açılan PMMA levhaların ahşap kalıba yerleştirilmesi ve sonradan kapatılan kalıba beton dökümü şeklindedir. Ancak kullanılan bu ilk yöntemde optik fiberlerin istenilen düzende yerleşmediği görülmüştür bu yüzden farklı bir üretim yöntemi belirlenmiştir. Deneme çalışmasında üretim sürecine ait görseller Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.

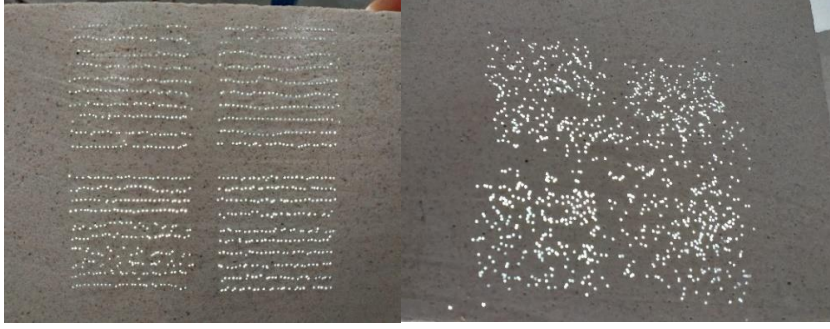


Şekil 3.9 : Deneme üretimi, kalıp hazırlanması.



Şekil 3.10 : Deneme üretimi, döküm yapılması.

Deneme üretiminde beton sertleştikten sonra kesim yapılmış ve optik fiberlerin numune uçlarında düzgün yerleşmiş olduğu ancak ortadan kesim yapıldığında istenilen yerleşim düzeninin elde edilemediği görülmüştür (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : Deneme üretimi, düzgün yerleşmemiş optik fiberler.

Yapılmış olan ilk deneme üretiminde optik fiberlerin düzgün yerleşmemesi nedeniyle ikinci bir yöntemle üretim yapılmıştır. Bu ikinci yöntemde, önceden ahşap kalıba sabitlenen metal çerçeveler yardımıyla optik fiberler 1 mm aralıklı çelik elek telinden karşılıklı olarak geçirilmiştir (Şekil 3.12).



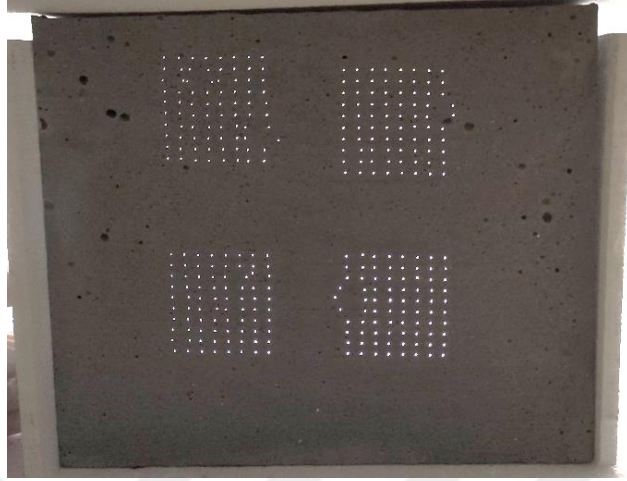
Şekil 3.12 : 2. Deneme üretimi, karşılıklı geçirilen optik fiberler.

İstenilen desen (düzen) oluşturulduktan sonra çerçevelerin bağlı olduğu düzeneğin ayarı yapılarak beton döküm işlemi için kalıbın etrafı kapatılmıştır (Şekil 3.13). İkinci deneme üretiminde kullanılan optik fiber oranı (hacimsel yüzde) %1'dir.



Şekil 3.13 : 2. Deneme üretimi, kalıp üstten görünümü.

2. deneme sonucu üretilen ışık geçiren beton, 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında kesilerek 4 adet eğilme numunesi elde edilmiştir. Şekil 3.14'te yapılan üretimde istenilen düzgün optik fiber yerleşimine ulaşıldığı görülmektedir.

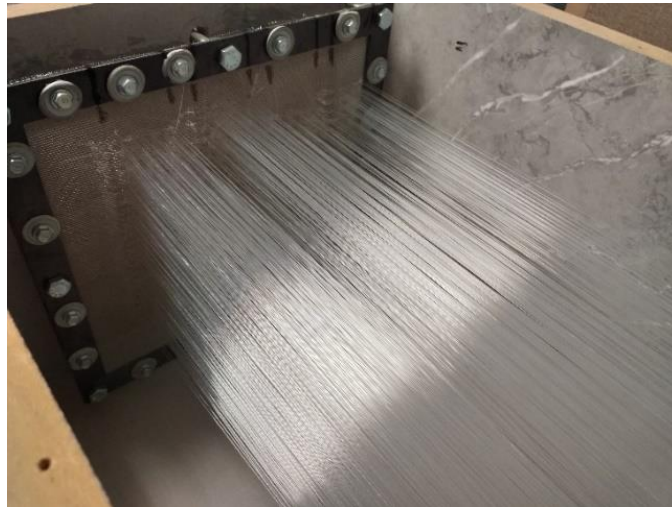


Şekil 3.14 : 2. Deneme üretimi, düzenli yerleşmiş optik fiberler.

3.4.3 Kalıpların hazırlanması

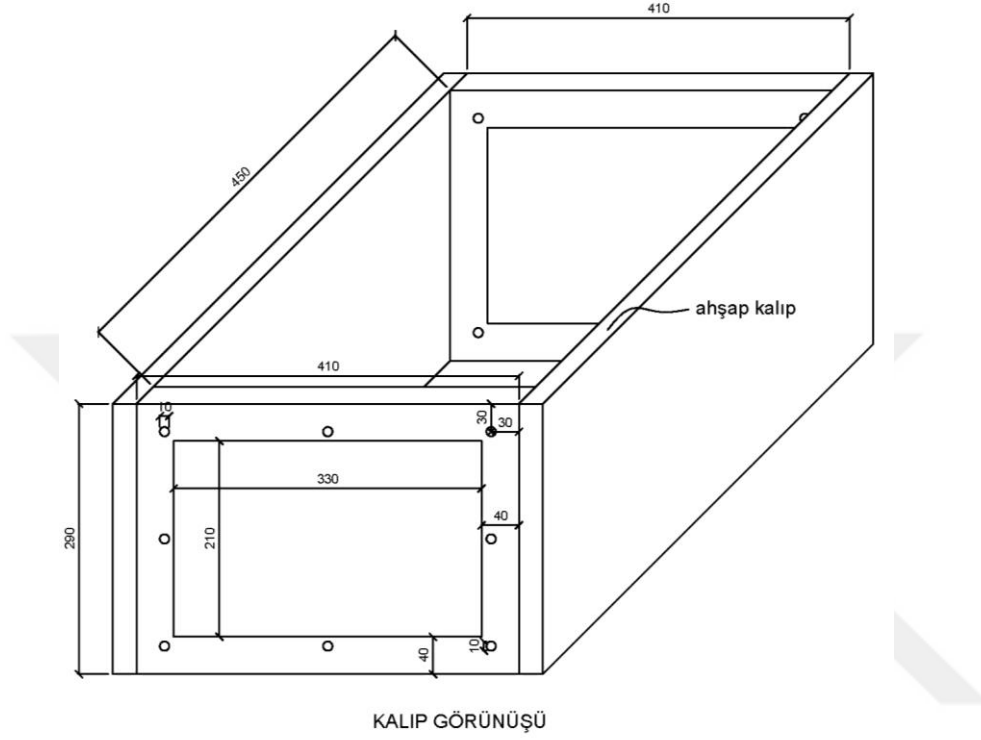
3.4.3.1 AR1 ve AR2 numune grupları

0,5 mm çaplı optik fiber ve PMMA ünite içeren numune grupları için farklı tipte kalıp üretimleri gerçekleştirilmiştir. 0,5 mm çaplı optik fiber içeren numune grubu (AR1 ve AR2) için kalıp hazırlıkları, deneme üretiminde belirlenen metoda göre yapılmıştır. Optik fiberlerin geçirileceği elek telinin bağlı olduğu metal çerçeve ve ahşap kalıp ayrı ayrı üretilmiştir. Daha sonra çerçeveler ahşap kalıba karşılıklı olarak sabitlenmiş ve optik fiberlerin örülmesi işlemine geçilmiştir (Şekil 3.15).

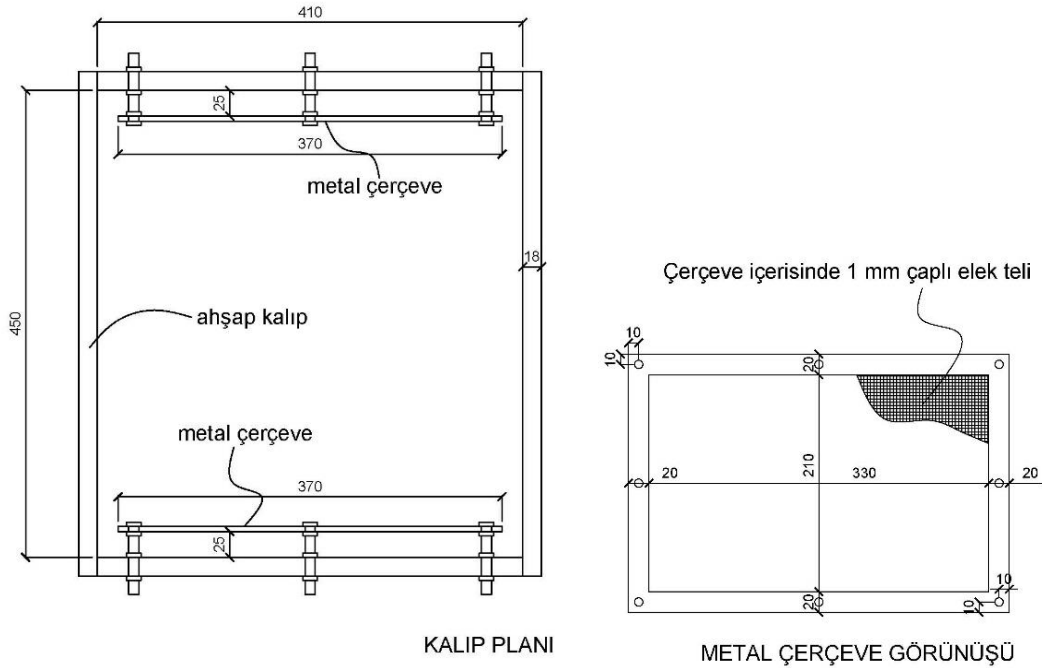


Şekil 3.15 : Karşılıklı olarak elek telinden geçirilen optik fiberler.

Belirlenen numune boyutları, sayıları ve kesim payları göz önüne alınarak her grup ve optik fiber yüzdesi için bir kalıp üretimi yapılmıştır. AR1 grubu için üretilen kalıp boyutları 290 mm, 410 mm ve 450 mm'dir. Üretilen kalıba ait çizimler Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.16 : Hazırlanan ahşap kalıbın üç boyutlu çizimi.



Şekil 3.17 : Hazırlanan kalıp planı ve metal çerçeve görünüşü.

Üretilen kalıp boyutları AR2 grubu için 290 mm, 310 mm ve 450 mm'dir. Kalıp genişlikleri ve metal çerçeve boyutları belirlenen numune sayılarına göre farklılaşmaktadır. Optik fiberlerin örülebilmesi için kalıplarda boşluklar bırakılmış örme işlemi bittikten sonra bu boşluklar ahşap plakalar yardımıyla kapatılmıştır (Şekil 3.18). Döküm işlemi yapılırken optik fiberler gerilerek düzgün bir yerleşim oluşması sağlanmıştır. Kalıbı beton dökümü öncesinde sağlamlaştırmak için kalıp etrafına ahşap çitalarla çerçeveleme yapılarak döküm işlemine hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.18 : Optik fiberlerin örülmesi sırasında kalıpta bırakılan boşluklar.



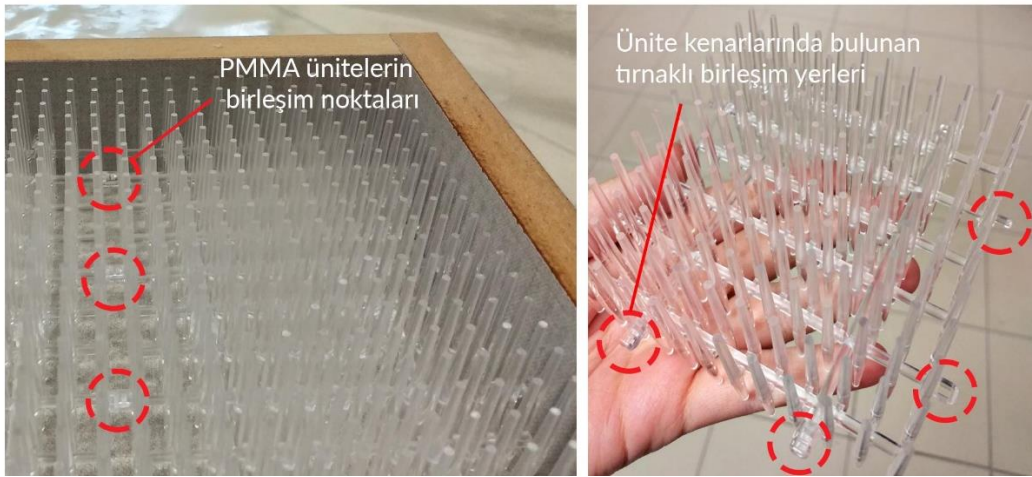
Şekil 3.19 : Hazırlanan kalıbın dıştan görünümü.

Belirlenen optik fiber yerleşimlerinin elek tellerinden karşılıklı olarak geçirilmesinin süresi optik fiber yüzdeleriyle orantılı olarak artmıştır. Kullanılan optik fiber yüzdesine göre bir kalıbın hazırlık süresi yaklaşık olarak 7-20 gün arasında değişmektedir.

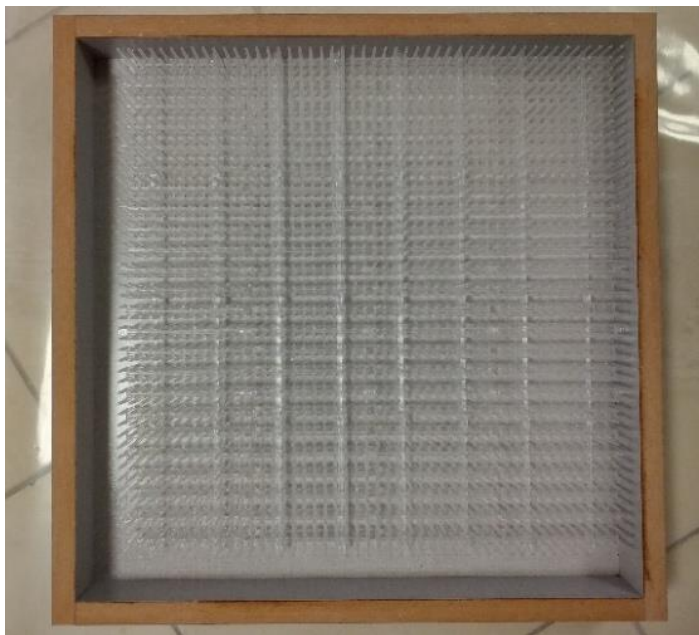
3.4.3.2 PX numune grubu

PX grubu üretimlerinde PMMA ışık geçiren hazır üniteler kullanılmıştır. Bu üniteler, birbirine geçirilebilen uçları sayesinde ve istenilen boyutta üretime izin vermektedir. PMMA ünitelerin 4 kenarında da bulunan tırnaklı uçlar sayesinde birbirleriyle kolayca birleştirilebilmektedir (Şekil 3.20). PX grubu için 466 mm x 466 mm x 45 mm boyutlarında 2 ahşap kalıp üretilmiştir. Kullanılan ışık geçiren eleman oranı (hacimsel yüzde) %4,6'dır.

PMMA üniteler birbirlerine geçirildikten sonra ahşap kalıba yerleştirilmiş ve beton dökümü için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.21). Kullanılan bir adet PMMA ünitenin boyutu 102 mm x 102 mm x 42 mm'dir.



Şekil 3.20 : PMMA ünitelerin birleşim noktaları.



Şekil 3.21 : Hazırlanan kalıbın üstten görünümü.

3.4.4 Beton dökümü

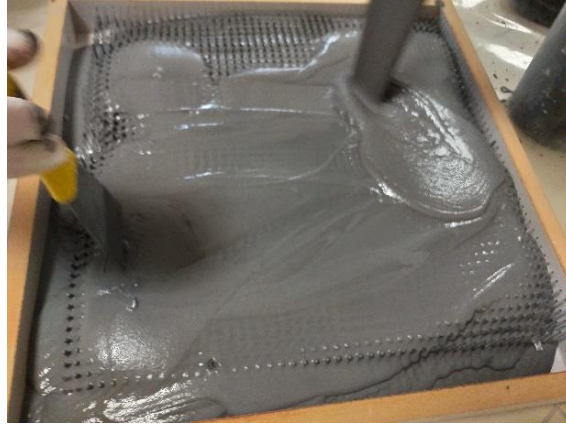
Kalıplar oluşturulduktan sonra her numune grubu için beton döküm işlemi yapılmıştır. Beton karışımının hazırlanması ve beton dökümü Fibrobeton Yapı Elemanları firması Düzce üretim tesisi AR-GE laboratuvarında gerçekleşmiştir. AR1 ve AR2 numune gruplarında, optik fiberlerin betonun dökülürken betonun ağırlığıyla kopmaması için seyrek olarak optik fiberlerin yerleştiği bölgelerden hassas bir şekilde döküm yapılmıştır (Şekil 3.22 ve Şekil 3.23). AR1 ve AR2 grupları için beton dökümü yapılırken betonun optik fiberlerin arasına iyice yerleşmesi için laboratuvarda bulunan beton vibrasyon masası kullanılmıştır. PX numune grubunun beton dökümüne ait görünüm Şekil 3.24’te verilmiştir.



Şekil 3.22 : Beton döküm işlemi (AR1 numune grubu).



Şekil 3.23 : AR2 numune grubu, beton dökümü sonrası görünüm.

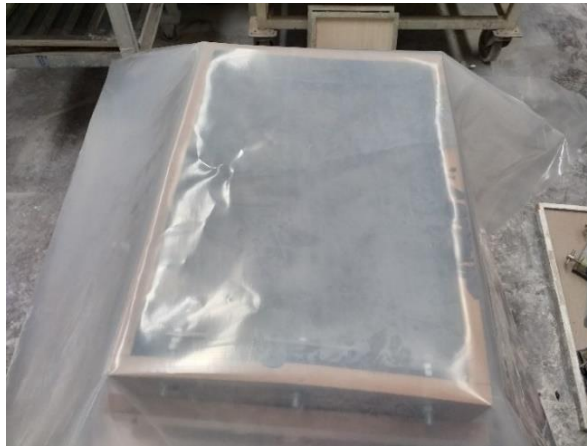


Şekil 3.24 : Beton döküm işlemi (PX numune grubu).

PX grubu üretiminde beton dökümü tamamlandıktan sonra yüzeyi düzeltmek amacıyla mastarlama işlemi yapılmıştır (Şekil 3.25). Her numune grubu için beton döküm işlemi sona erdikten sonra üretilen kalıbın üzeri plastik esaslı bir örtü ile kapalı olarak bekletilmiş, kalıp söküm işlemi yapılmıştır (Şekil 3.26). Betonun kürlenmesi laboratuvar ortamında sabit nem ve sıcaklıkta yapılmıştır.



Şekil 3.25 : Beton yüzeyinin düzeltilmesi - mastarlama.



Şekil 3.26 : Üretilen taze betonun üzerinin kapatılması.

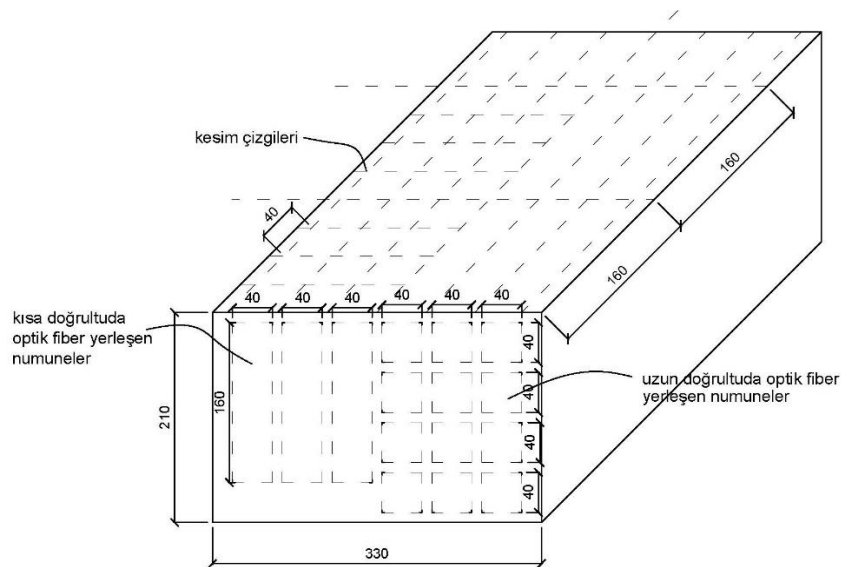
3.4.5 Kesim işlemi

Beton dökümü yapıldıktan ve üretilen ışık geçiren beton bloklar prizini aldıktan sonra her numune grubu için belirlenen 40 mm x 40 mm x 160 mm numune boyutlarına getirilmek üzere kesim işlemi uygulanmıştır. Numunelerin kesimi için Şekil 3.27’de görülen testereli kesim makinesi kullanılmıştır.

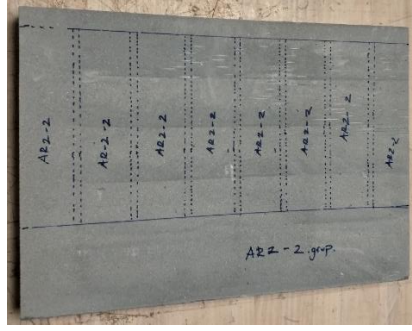


Şekil 3.27 : Kesim işleminin yapılması.

AR1 ve AR2 grupları için üretilen büyük boyuttaki ışık geçiren beton bloklar önce 40 mm kalınlıkta paneller halinde kesilmiştir. AR1 grubu için AutoCAD, bilgisayar destekli tasarım yazılımı kullanılarak çizilen kesim şablonu Şekil 3.28’de verilmiştir. Şekil 3.29’da, üretilmiş olan panel üzerinde kısa doğrultuda yerleşen optik fiberli AR2-2-K numunelerinin kesim şablonu gösterilmiştir. 40 mm kalınlığındaki panellere optik fiber doğrultularına göre kesim işlemi uygulanmış ve numuneler 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarına getirilmiştir.

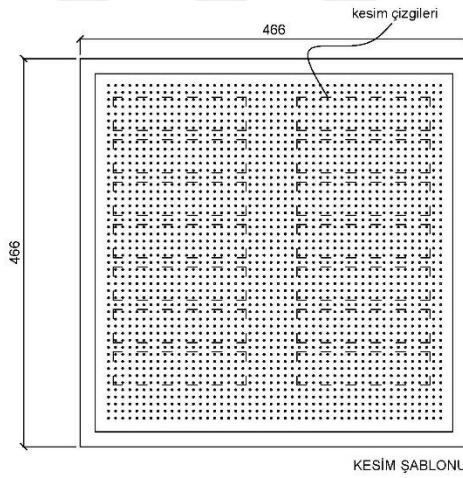


Şekil 3.28 : AR1 grubu için üretilen ışık geçiren beton bloğun kesim şablonu.



Şekil 3.29 : AR2 grubu için 40 mm kalınlığında kesilen bir panel üzerinde gösterilen kesim şablonu.

PX grubu numuneleri Şekil 3.30’da verilen kesim şablonuna uygun olarak kesilmiştir. PX grubu için 430 mm x 430 mm x 45 mm boyutlarında üretilen ışık geçiren beton bloktan 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında numuneler elde edilmiştir. PX grubu numunelerinde ünitelerin ışık geçirebilmesi için kesim öncesinde yüzey silme işlemi yapılması gerekmektedir. Bu yüzden panel yüksekliğinde oluşacak azalma hesaba katılarak 45 mm kalınlığında üretim yapılmış ve yüzey silme işlemi sonrası 40 mm kalınlığında ışık geçiren beton panel elde edilebilmiştir. Kesimi yapılan PX grubu numunelerinin görünümü Şekil 3.31’de verilmiştir.



Şekil 3.30 : Kesimi yapılan PX grubu numunelerinin üstten görünümü.



Şekil 3.31 : Kesimi yapılan PX grubu numunelerinin üstten görünümü.

3.5 Üretilen Numune Tipleri

Bu bölümde üretilmiş olan numune tipleri hakkında bilgiler verilecektir. Toplamda dört numune grubu üretilmiştir. Bunlar; REF numune grubu, AR1 numune grubu, AR2 numune grubu ve PX numune grubudur.

3.5.1 REF numune grubu

Optik fiber içeren numune gruplarıyla karşılaştırmak amacıyla optik fiber içermeyen REF numune grubu üretilmiştir. Dökümü yapılan ve sertleşen betondan 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında numuneler elde edilmiştir (Şekil 3.32). Üretilen numune sayısı 6 adettir.



Şekil 3.32 : REF grubu numunelerin görünümü.

3.5.2 AR1 numune grubu

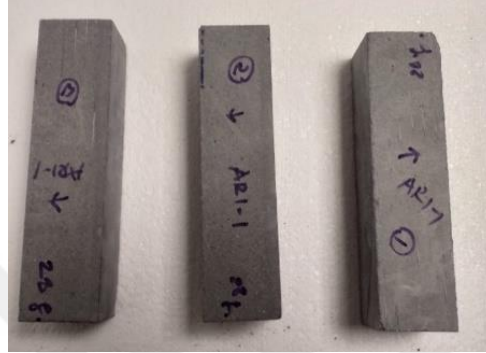
AR1 grubu numuneleri, her bir optik fiber yüzdesi için belirlenen numune sayılarına göre üretilen büyük boyutlardaki (21 cm x 33 cm x 45 cm) ışık geçiren betonun kesilmesiyle elde edilmiştir. Kısa doğrultuda ve uzun doğrultuda olmak üzere toplamda bir optik fiber yüzdesi için 24 adet numune üretilmiştir. Işık geçirgenlik testi için 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarındaki numunenin kesilmesiyle elde edilen üçer adet küp numune kullanılmıştır. Üretilen %1 optik fiber içeren AR1-1-K numunesine ait görünüm Şekil 3.33'te verilmiştir. AR1-1-U numunelerinin görünümleri Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'te verilmiştir.



Şekil 3.33 : AR1-1-K numunesi görünümü.



Şekil 3.34 : AR1-1-U numunesi görünümü.

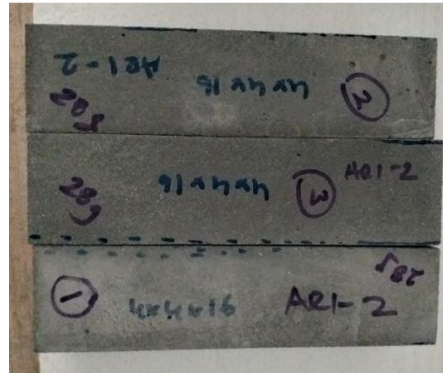


Şekil 3.35 : AR1-1-U numunelerinin üstten görünümü.

Üretilen AR1-2-K numunelerine ait görünümler Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de verilmiştir. %1,6 optik fiber oranına sahip olan AR1-2-K numunelerinde optik fiberler kısa doğrultuda yerleşmiştir. Üretilen AR1-2-U numunesine ait görünüm Şekil 3.38’de verilmiştir. %1,6 optik fiber oranına sahip olan AR1-2-U numunelerinde optik fiberler uzun doğrultuda yerleşmiştir.



Şekil 3.36 : AR1-2-K numunesi görünümü.

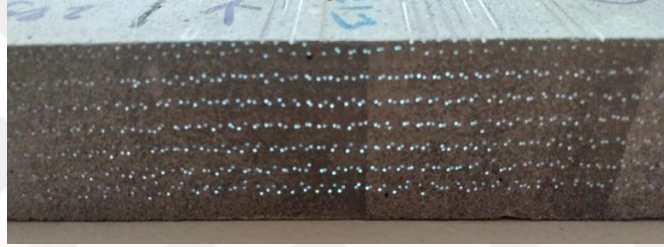


Şekil 3.37 : AR1-2-K numuneleri üstten görünümü.

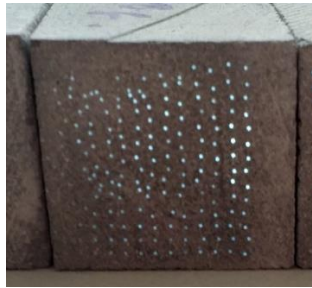


Şekil 3.38 : AR1-2-U numunesi görünümü.

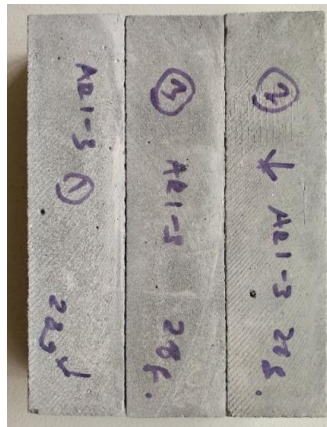
AR1-3 numune grubu için %2,4 optik fiber oranına sahip numuneler üretilmiştir. Kısa doğrultuda yerleşen optik fiberli AR1-3-K numunesinin görünümü Şekil 3.39’da verilmiştir. Uzun doğrultuda yerleşen optik fiberli AR1-3-U numunelerine ait görünüm Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’de verilmiştir.



Şekil 3.39 : AR1-3-K numunesi görünümü.



Şekil 3.40 : AR1-3-U numunesi görünümü.



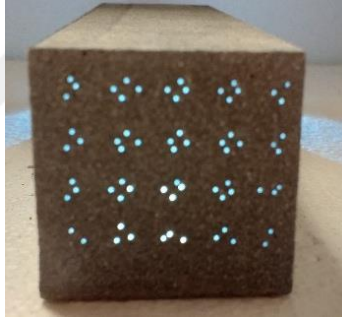
Şekil 3.41 : AR1-3-U numunelerinin üstten görünümü.

3.5.3 AR2 numune grubu

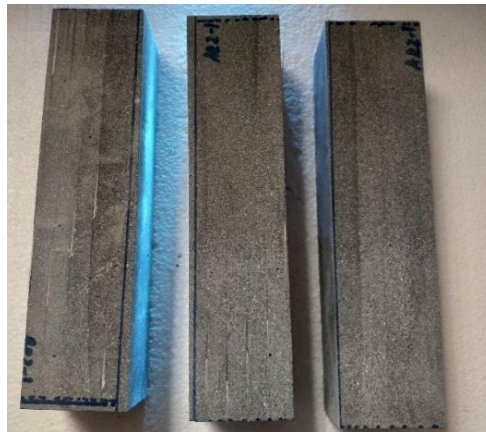
AR2 grubu numuneleri, belirlenen numune sayılarına göre üretilen büyük boyutlardaki (21 cm x 23 cm x 45 cm) ışık geçiren betonun kesilmesiyle elde edilmiştir. Her bir optik fiber yüzdesi (%1, %1,6 ve %2,4) ve bir doğrultuda yerleşim için üretilen numune sayısı 3 adettir. Işık geçirgenlik testi için 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarındaki numunenin kesilmesiyle elde edilen üçer adet küp numune kullanılmıştır. %1 oranında kısa doğrultuda optik fiber yerleşen AR2-1-K numunesine ait görünüm Şekil 3.42’de verilmiştir. %1 oranında uzun doğrultuda optik fiber yerleşen AR2-1-U numunesinin görünümleri Şekil 3.43 ve Şekil 3.44’te verilmiştir.



Şekil 3.42 : AR2-1-K numunesi görünümü.



Şekil 3.43 : AR2-1-U numunesi görünümü.

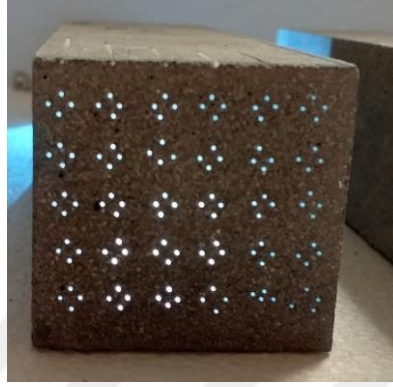


Şekil 3.44 : AR2-1-U numunelerinin üstten görünümü.

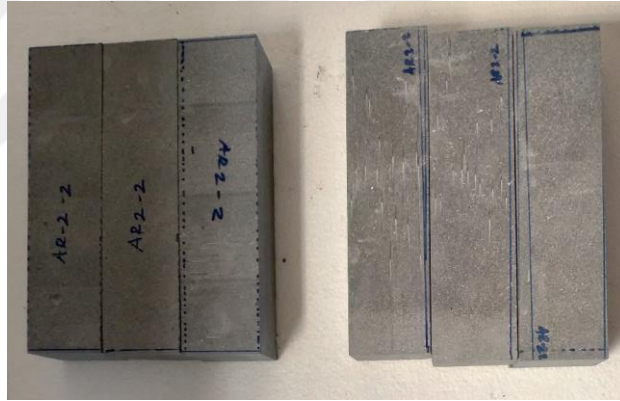
%1,6 oranında optik fiber içeren AR2-2-K ve AR2-2-U numunelerine ait görünümler Şekil 3.45-Şekil 3.47’de verilmiştir.



Şekil 3.45 : AR2-2-K numunesi görünümü.



Şekil 3.46 : AR2-2-U numunesi görünümü.



Şekil 3.47 : AR2-2-K ve AR2-2-U numunelerinin üstten görünümü.

%2,4 oranında kısa doğrultuda optik fiber yerleşen AR2-3-K numunesine ait görünüm Şekil 3.48’de verilmiştir. %2,4 oranında uzun doğrultuda optik fiber yerleşen AR2-3-U numunesinin görüntümleri Şekil 3.49 ve Şekil 3.50’de verilmiştir.



Şekil 3.48 : AR2-3-K numunesi görünümü.



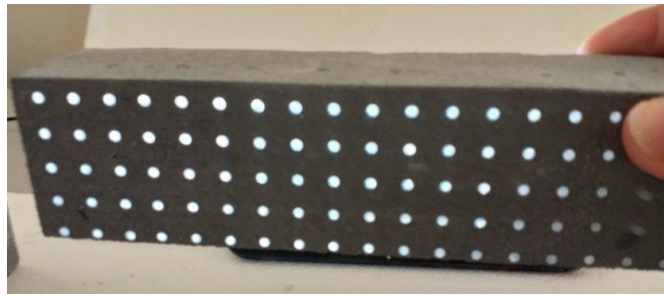
Şekil 3.49 : AR2-3-U numunesi görünümü.



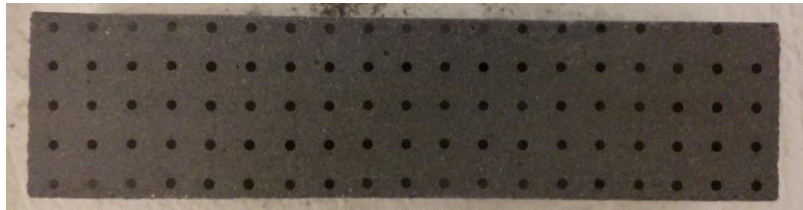
Şekil 3.50 : AR2-3-U numunelerinin üstten görünümü.

3.5.4 PX numune grubu

Üretilen PX grubu numuneleri yaklaşık %4,6 oranında ışık geçiren PMMA üniteler içermektedir. Beton döküldükten 7 gün sonra yüzey silme işlemi yapılarak şeffaf tüplerin ışık geçirmesi sağlanmıştır. 430 mm x 430 mm x 40 mm boyutlarında üretilen ışık geçiren betondan 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında numuneler elde edilmiştir. Üretilen numunelerin görünümü Şekil 3.51 ve Şekil 3.52’de verilmiştir.



Şekil 3.51 : PX grubu, numunenin önden görünümü.



Şekil 3.52 : PX grubu, numunenin üstten görünümü.

3.6 Deneysel Parametreler

Deneysel çalışmada üretilen numunelerin belirlenen parametrelere göre dayanım, durabilite özellikleri ve ışık geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Optik fiber içeren AR1 ve AR2 grupları için bu parametreler optik fiber düzeni, optik fiber oranı ve optik fiberlerin farklı doğrultularda yerleşmesidir. AR1 ve AR2 numune gruplarında optik fiber yerleşimi ve optik fiber oranına bağlı olarak ışık geçiren betonun özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Işık geçiren betonun durabilite özelliklerini belirlemek için AR1 grubu ve PX grubu numunelerinin donma-çözülme, ıslanma-kuruma ve yüksek sıcaklık etkileri sonrasında dayanımları incelenmiştir. Deneyler önceki bölümlerde verilen deneysel çalışma planına (Çizelge 3.10) göre uygulanmıştır. Üretilen numune gruplarına göre yapılan deneyler aşağıda Şekil 3.53'te verilmiştir.

REF Grup	AR1 Grubu	AR2 Grubu	PX Grubu
-7 ve 28 günlük basınç dayanım testi -7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi -Işık geçirgenlik testi	-28 günlük basınç dayanım testi -28 günlük eğilme dayanım testi -Işık geçirgenlik testi	-28 günlük basınç dayanım testi -28 günlük eğilme dayanım testi -Işık geçirgenlik testi	-7 ve 28 günlük basınç dayanım testi -7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi -Işık geçirgenlik testi
	-Donma-çözülme çevrimi sonrası dayanım testleri -Islanma-kuruma çevrimi sonrası dayanım testleri -Yüksek sıcaklık sonrası dayanım testleri ve ışık geçirgenlik testi		-Donma-çözülme çevrimi sonrası dayanım testleri -Islanma-kuruma çevrimi sonrası dayanım testleri -Yüksek sıcaklık sonrası dayanım testleri ve ışık geçirgenlik testi

Şekil 3.53 : Üretilen numune gruplarına göre yapılan deneyler.

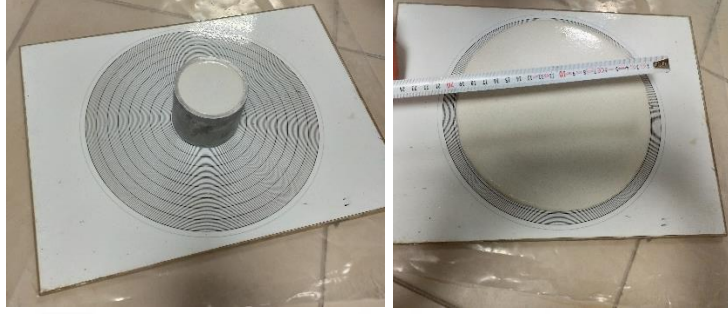
3.7 Uygulanan Deney Tipleri

Bu bölümde numunelere uygulanan deney tipleri genel olarak açıklanacaktır.

3.7.1 Çökme (Slump) deneyi

Çökme (Slump) deneyi, taze haldeki betonun kıvam ve işlenebilirliği ile ilgili bilgi edinmek amacıyla “TS-EN 12350-2:2019:Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi” standardına göre yapılmıştır. Çökme deneyi için Slump halkası, Slump tahtası ortasına yerleştirildikten sonra içerisine hazırlanan taze beton dökülmüştür. Slump halkası yukarı yönde (dik açı ile) kaldırılarak taze betonun Slump tahtası üzerinde yayılması sağlanmış ve bu yayılan miktarın ölçülmesi işlemi yapılmıştır. Yapılan okuma sonrası betonun kıvamı ile ilgili bilgi edinilmiştir.

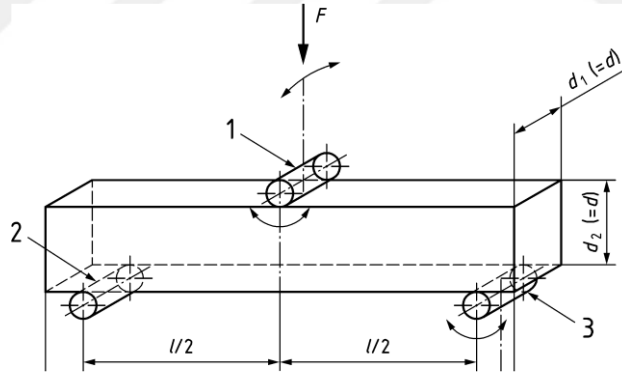
Standartta göre Çökme deneyi, 10 mm ile 210 mm arasında çökme değerine sahip betonların kıvamındaki değişimlere duyarlıdır. Bu sınırlar dışında, çökme değerinin ölçülmesi yoluyla kıvam tayini uygun değildir [40]. Yapılan deneyde belirlenen çökme değeri 195 mm'dir ve TS-EN 12350-2'de verilen sınırlar içinde kalmaktadır. Şekil 3.54'te yapılan deneye ait görseller verilmiştir.



Şekil 3.54 : Çökme (Slump) deneyinin yapılması.

3.7.2 Eğilme dayanımı deneyi

Işık geçiren betonun eğilme etkisi altındaki özelliklerini belirlemek amacıyla numunelere 3 noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır. 3 noktalı eğilme deneyinin şematik olarak gösterimi Şekil 3.55'te verilmiştir.



Şekil 3.55 : 3 noktalı eğilme deneyi şematik gösterimi [41].

Optik fiberli eğilme deney numuneleri (AR1 ve AR2) beton içerisine her iki yönde optik fiberlerin yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Böylelikle uzun ve kısa doğrultularda yerleşimi yapılan optik fiberlerin iki farklı durum için ışık geçiren betonun eğilme dayanımına etkisi incelenmiştir. Yapılan eğilme deneylerinde, TS EN 12390-5 Standardı (Beton-Sertleşmiş Beton Deneyler-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini) uygulanmıştır. Tüm yapılan eğilme dayanım deneylerinde boyutları 40 mm x 40 mm x 160 mm olan numunelere uygulanan yükleme hızı 0,05 MPa/sn'dir. Numune boyutları deney öncesinde ölçülmüş ve

okunan değerler kaydedilmiştir. Eğilme dayanımları belirlenen eğilme yükü ve boyutlarına göre ayrıca hesaplanmıştır. Eğilme dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan formül aşağıda Denklem 3.1’de verilmiştir. Denklemde yer alan f_{α} eğilme dayanımını (MPa), F maksimum yük değerini (N), l alt mesnetler arası mesafeyi (mm), d_1 ve d_2 ise kesitin eni ve yüksekliğini (mm) göstermektedir [41].

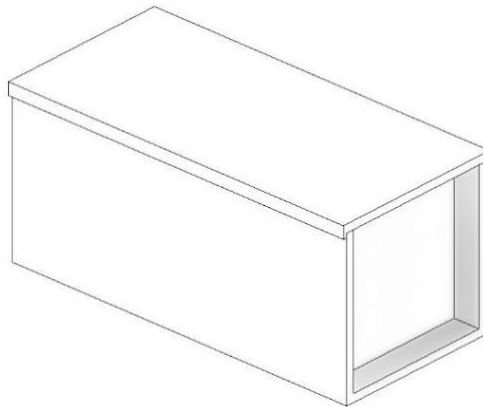
$$f_{\alpha,fl} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times d_1 \times d_2} \quad (3.1)$$

3.7.3 Basınç dayanımı deneyi

Üretilen ışık geçiren beton numunelerinin basınç etkisi altındaki özelliklerini belirlemek amacıyla basınç dayanım testi yapılmıştır. Yapılan basınç deneyleri TS EN 12390-3 Standardı (Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini) uygulanarak yapılmıştır. Uygulanan tüm basınç deneylerinde basınç yükü yükleme hızı 2,4 kN/sn’dir. Mevcut eğilme numunelerine eğilme deneyi uygulandıktan sonra numunenin iki tarafında kalan kp parçalara basınç kuvveti yüklenerek numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Basınç testleri kp numunelere uygulandığından AR1 ve AR2 grupları için optik fiber yerleşimlerinde bir doğrultu farklılığı söz konusu değildir.

3.7.4 Işık geçirgenlik deneyi

Üretilen numunelerin ışık geçirgenliklerini belirlemek için ışık geçirgenlik testi yapılmıştır. Deney uygulanmadan önce dışarıdan ışık geçirmeyecek şekilde bir düzenek üretilmiştir. Düzeneğin hazırlığında üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım programı (Revit) kullanılarak modelleme yapılmıştır (şekil 3.56).



şekil 3.56 : Işık geçirgenlik deneyi için hazırlanan düzeneğin 3 boyutlu modeli.

Üretilen düzeneğin boyutları 190 mm x 200 mm x 550 mm'dir. Numune ve ölçüm cihazı arası mesafe 10 cm ve 20 cm olarak belirlenip farklı mesafeler için ölçümler yapılmıştır. Işık kaynağı ve ölçüm cihazı (lüksmetre) arasına numuneler yerleştirilerek lüks (lux) cinsinden değerler okunmuş, ışık geçirgenlikleri belirlenmiştir. Işık geçirgenlik değerlerinin belirlenmesinde TS EN ISO 13468-1:2019 (Plastikler-Saydam malzemelerin toplam ışık geçirgenliğinin tayini) Standardında yer alan Denklem 3.2'de belirtilen formülden yararlanılmıştır. Denklemden verilen τ_t : toplam ışık geçirgenliğini (%), τ_2 numuneden geçen ışık miktarını, τ_1 ise numune yokken geçen ışık miktarını göstermektedir [42].

$$\tau_t = \frac{\tau_2}{\tau_1} \times 100 \quad (3.2)$$

Yapılan ışık geçirgenlik deneyinde boyutları 40 mm x 40 mm x 40 mm olan küp numuneler kullanılmıştır. Hazırlanan deney düzeneği Şekil 3.57'de gösterilmiştir.



Şekil 3.57 : Işık geçirgenlik deney düzeneği.

3.7.5 Durabiliteyi belirlemeye yönelik uygulanan yaşlandırma koşulları

Bu bölümde, durabiliteyi belirlemeye yönelik uygulanan hızlandırılmış yaşlandırma koşullarından bahsedilmiştir.

3.7.5.1 Islanma-kuruma çevrimleri

Işık geçiren betonun ıslanma-kuruma etkisi sonrası dayanım özelliklerini incelemek amacıyla üretilen iki grup (AR1 ve PX) için ıslanma-kuruma çevrimleri uygulanmıştır. Çevrimlerin uygulanması TS EN 12467+A2 Standardına (Lifli çimentodan yapılmış düz levhalar-mamul özellikleri ve deney yöntemleri) göre yapılmıştır. Standartta

belirlenen koşullara göre numuneler bir çevrim için 60 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde 6 saat kurumaya, ortam sıcaklığındaki suda 18 saat ıslanmaya maruz bırakılmıştır. Numunelere toplamda 50 çevrim uygulanmıştır. Islanma-kuruma çevrimleri sonrasında numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarını belirlemek için basınç ve eğilme testleri yapılmıştır.

3.7.5.2 Donma-çözülme çevrimleri

Işık geçiren betonun donma-çözülme etkisi sonrası dayanım özelliklerini incelemek amacıyla AR1 grubu ve PX grubu numunelerine ıslama-kuruma çevrimleri uygulanmıştır. Çevrimlerin uygulanmasında TS EN 12467+A2 Standardı (Lifli çimentodan yapılmış düz levhalar-mamul özellikleri ve deney yöntemleri) takip edilmiştir. Standartta belirtilen koşullara göre numuneler bir çevrim için -20 ± 4 °C sıcaklıkta 2 saate kadar donma, $+20\pm4$ °C sıcaklıkta 2 saate kadar suda çözölmeye maruz bırakılmıştır. Numunelere toplamda 100 çevrim uygulanmaktadır.

AR1 grubunda çevrimlerin uygulanmasında Fibrobeton A.Ş. Düzce AR-GE laboratuvarında bulunan Elektron marka tam otomatik donma-çözölme cihazı kullanılmıştır. Cihaz, yapılan çevrimleri otomatik olarak bilgisayara kaydetmekte ve herhangi bir elektrik kesintisi durumunda çevrimlere kaldığı yerden devam edebilmektedir. PX grubuna uygulanan donma-çözölme çevrimleri elle yapılmıştır. PX grubunda, bir çevrim için numuneler -20 °C'deki dondurucuda 2 saat, $+20$ °C'deki su dolu bir kaptan 2 saat bekletilmiş ve toplamda 100 çevrim uygulanmıştır. Donma-çözölme çevrimleri sonrasında numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarını belirlemek için basınç ve eğilme testleri yapılmıştır.

3.7.5.3 Yüksek sıcaklık etkisi

Üretilen ışık geçiren betonun artan sıcaklık etkisi altındaki özelliklerini belirlemek için numuneler yaklaşık 150 °C sıcaklığa 1 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Numuneler maksimum 250 °C kapasiteli etüvde 150 °C'de 1 saat boyunca kalmıştır. Kullanılan etüvün ısınma hızı yaklaşık 4 °C/dakika'dır. Yüksek sıcaklık uygulanan numune grupları AR1 ve PX gruplarıdır. Numunelere bir sıcaklık değeri uygulanmadan önce optik fiberlerin teknik özelliklerindeki sınırlara göre 70 °C sonrasında erimeye başlayacağı düşünölerek beton içerisindeki erime durumları belirlenmeye çalışılmıştır. PMMA ünitelerin teknik bilgi formuna ulaşamadığından deneysel yöntem ile erimeye başladığı sıcaklığın belirlenmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca 0,5 mm çaplı optik fiberler ve 2 mm çapındaki PMMA tüpler 70 °C-120 °C sıcaklıklar arasında 1 saat süreyle etüve konularak hangi sıcaklık değerinden sonra belirgin boy değişimi olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.58).



Şekil 3.58 : Optik fiberlerin etüve konulması.

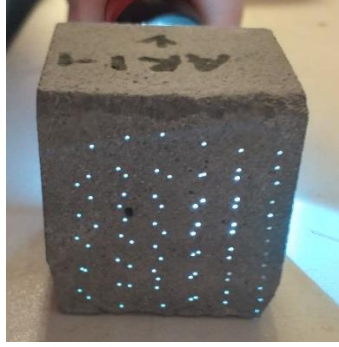
2 mm çapındaki PMMA tüplerin boy ölçümleri kumpas yardımıyla yapılmış ve boy değişimleri kaydedilmiştir. Yaklaşık 42 mm boyunda olan PMMA tüplerde 100 °C’den sonra belirgin boy değişimleri gözlenmiştir. Her sıcaklık değeri için 3 adet PMMA tüpte yapılan okumalarda 70 °C’de boy değişimi ve erime gözlenmemiştir. 80 °C’de tüplerde ortalama 0,006 mm kısalma, 90 °C’de ortalama 0,66 mm kısalma, 100 °C’de ortalama 1,37 mm kısalma ve gözle görülür biçimde erime gözlenmiştir. Tüplerde 110°C için ortalama 2,38 mm kısalma ve gözle görülür biçimde erime, 120 °C için ortalama 2,96 mm kısalma ve gözle görülür biçimde erime olmuştur. Şekil 3.59’da 110 °C sıcaklıktan sonra PMMA tüplerde oluşan kısalma, sıcaklığa maruz kalmayan referansla karşılaştırıldığında gözle dahi ayırt edilebilmektedir.



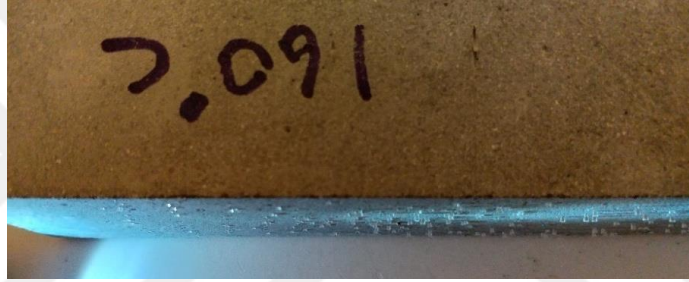
Şekil 3.59 : 110 °C sıcaklıktan sonra PMMA tüplerde kısalma.

Beton içerisine yerleşen optik fiber ve PMMA ünitelerin erimesini gözlemlemek amacıyla farklı sıcaklık değerleri için numuneler etüve yerleştirilmiştir. Numuneler 80 °C-160 °C sıcaklık aralığında 10’ar °C artırılarak sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Her uygulanan sıcaklık için 1 adet numune 1 saat etüvde bırakılmıştır. 90°C ve 110°C

sıcaklığa maruz kalan numunelerde gözle görülür biçimde optik fiberlerde erime ve betonda çatlak gözlenmemiştir (Şekil 3.60). 160 °C sıcaklığa 1 saat boyunca maruz kalan 0,5 mm optik fiber içeren numunede optik fiberlerin gözle ayırt edilebilir biçimde beton dışına doğru çıktığı gözlenmiştir (Şekil 3.61).



Şekil 3.60 : 90 °C sıcaklığa maruz kalmış numune.

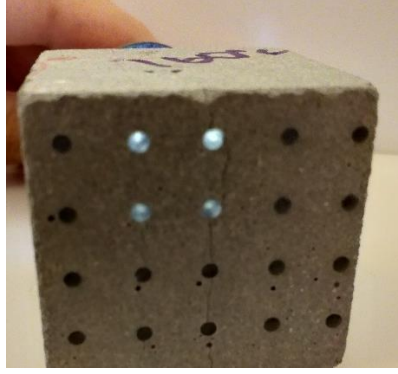


Şekil 3.61 : 160 °C sıcaklığa maruz kalmış numune.

PMMA ünite içeren numunelerde ise 150 °C sıcaklık sonrasında tüpler arasında betonda çatlaklar ve tüplerin yüzeylerinde erime gözlenmiştir (Şekil 3.62). PMMA ünite içeren bir küp numuneye 160 °C sıcaklık uygulandıktan sonra tüpler arasında betonda çatlaklar ve tüplerin yüzeylerinde erime gözlenmiştir (Şekil 3.63). Bunların sonucunda gözle görülür biçimde optik fiber ve PMMA ünitelerde erimenin gözlenmeye başladığı 150 °C sıcaklık değerinde belirlenen numune gruplarına (AR1 ve PX) yüksek sıcaklık deneyleri uygulanmıştır.



Şekil 3.62 : 150 °C sıcaklığa maruz kalmış numune.



Şekil 3.63 : 160 °C sıcaklığa maruz kalmış numune.

3.8 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Bu bölümde deneylerde kullanılan cihazlar tanıtılacaktır.

3.8.1 Kuru hava etüvü

Islanma-kuruma çevrimlerinin uygulanmasında numunelerin kurumasını sağlamak için ve yüksek sıcaklık deneylerinde Nüve marka FN400 kuru hava etüvü kullanılmıştır. Etüvün sıcaklık çalışma aralığı +5 °C ile +250 °C'dir. Programlanabilir PID mikroişlemcili kontrol sistemi bulunmaktadır. Etüvün teknik özelliklerine ait detaylı bilgiler Çizelge 3.11'de verilmiştir [43]. Kullanılan etüvün görünümü Şekil 3.64'te verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Etüvün teknik özellikleri [43].

Sıcaklık çalışma aralığı	+5 °C - +250 °C
Raf sayısı	2/7
Kurulu güç	800 W
Hücre hacmi	44 L
İç yüzey yapısı	Anodik oksidasyonlu alüminyum
Dış yüzey yapısı	Elektrostatik toz boyalı çelik sac
İç ölçüler	420 mm x 320 mm x 360 mm



Şekil 3.64 : FN400 etüv görünümü.

3.8.2 Donma-çözülme cihazı

Donma-çözülme çevrimlerinin uygulanması için Elektron marka tam otomatik donma-çözülme cihazı kullanılmıştır. PLC (Programmable Logic Controller) ve bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Cihaz ile 15 adım 999 kez çevrim yapılabilmektedir. Cihaz, numuneleri havada dondurup suda çözmektedir. Çözme suyu sıcaklığı deney boyunca sabit tutulmaktadır. Cihaz -20 °C'ye kadar donma, +30 °C'ye kadar suda çözme işlemi uygulayabilmektedir. Yapılan deneyler bilgisayar yardımıyla arşivlenebilmektedir. Ayrıca cihaz elektrik kesintilerinde deneye kalındığı yerden devam edilebilmektedir [44]. Kullanılan donma-çözülme cihazının görünümü Şekil 3.65'te verilmiştir.



Şekil 3.65 : Donma-çözülme cihazı görünümü.

3.8.3 Beton basınç dayanım deney presi

Beton basınç dayanım testlerinde UTEST marka 3000 kN kapasiteli EN kaynaklı basınç dayanım deney presi kullanılmıştır. Cihaza ait teknik özellikler Çizelge 3.12'de verilmiştir [45].

Çizelge 3.12 : Basınç dayanım presi teknik özellikleri [45].

Model	UTC-4730
Kapasite	3000 kN
Gövde tipi	Kaynaklı yan duvarlı
Alt yükleme plakası boyutu	Ø 300 mm
Küresel yataklı üst yükleme plakası boyutu	Ø 300 mm
Piston çapı	300 mm
Maksimum piston hareketi (Stroke)	50 mm
Alt-üst yükleme plakaları arası maksimum dikey açıklık	340 mm
Yatay açıklık	415 mm
Boyutlar (en x boy x yükseklik)	505 mm x 540 mm x 1050 mm
Ağırlık	1010 kg

Kullanılan cihazın görünümü aşağıda Şekil 3.66’da verilmiştir.



Şekil 3.66 : EN kaynaklı beton basınç dayanım deney presi.

3.8.4 Beton eğilme dayanım deney presi

Beton eğilme dayanım testlerinde UTEST markasına ait UTC-5556 model 300 kN kapasiteli servo kontrollü otomatik eğilme deney presi kullanılmıştır. Eğilme deney presine ait teknik özellikler Çizelge 3.13’te verilmiştir [46].

Çizelge 3.13 : Eğilme deney presi teknik özellikleri [46].

Kapasite Doğruluk sınıfı	Sınıf 1 kalibrasyon Kapasitenin %1’inden başlayan Sınıf 1 kalibrasyon (TS EN ISO 7500-1)
Kuvvet ölçüm aralığı	3-300 kN
Hız aralığı (deplasman)	0,01 mm/dakika-50 mm/dakika
Hız aralığı (yük)	Numune rijitliğine bağlıdır.
İki kolon arası açıklık (ön/kenar)	900/300 mm
Maksimum dikey açıklık	450 mm (aksesuarsız)
Maksimum piston hareket mesafesi	250 mm
Güç	1500 W
Elektrik gereksinimi	220-240 V, 50-60 Hz
Maksimum çalışma basıncı	280 bar
Boyutlar (gövde)	1200 mm x 600 mm x 2045 mm
Ağırlık- gövde (yaklaşık)	3000 kg

Deneyde kullanılan cihazın görünümü Şekil 3.67’de verilmiştir.



Şekil 3.67 : Servo kontrollü otomatik eğilme deney presi.

3.8.5 Lüksmetre (Luxmeter)

Numunelerin ışık geçirgenliklerini ölçmek için ortamdaki ışık şiddetini belirlemeye yarayan PCE-174 lüksmetre cihazı kullanılmıştır. PCE-174 ışık şiddeti ölçer, lux ve footcandle okumalarını ölçmek için hassas bir cihazdır. Cihaza ait teknik özellikler Çizelge 3.14'te verilmiştir [47]. Kullanılan cihazın görünümü Şekil 3.68'de verilmiştir.

Çizelge 3.14 : PCE-174 lüksmetre teknik özellikleri [47].

Ölçüm aralığı	40,00 / 400,0 / 4000 / lüks 40,00 / 400,0 klüks 40,00 / 400,0 / 4000 / fc 40,00 kfc
Çözünürlük	0,01 / 0,1 / 1 / 10 / 100 Lüks 0,01 / 0,1 / 1 / 10 FootCandle
Hassasiyet	%±5 ölçüm değeri ±10 Dijit (<10.000 lüks) %±10 ölçüm değeri ±10 Dijit (>10.000 lüks)
Yeniden üretilebilirlik	%± 3
Depolama	16.000 değer
Kayıt aralığı	2 saniye ile 99 saniye arası
Aşım göstergesi	OL =aşırı yük
Ekran-güncellemesi	Saniyede 1,5
Çevresel koşullar	0 ... 40 °C / %80 n.o.
Ekran	3¾ basamaklı LCD ekran
Güç kaynağı	9 V Blok pil
Boyut	Cihaz: 206 mm x 95 mm x 45 mm Işık sensörü: 115 mm x 60 mm x 20 mm Kablo uzunluğu: yaklaşık 95 cm
Ağırlık	265 g
Standartlar	Güvenlik: IEC-1010-1; EN 61010-1 EMC: EN 50081-1; DIN 5031'e göre EN 50082-1; DIN 5032



Şekil 3.68 : Lüksmetre cihazı görünümü.

3.8.6 Dijital kumpas

Numunelerin boyutlarının ölçülmesinde Insize marka 150 mm dijital kumpas kullanılmıştır. Cihazın kullanım kılavuzunda yer alan bilgilere göre kumpas hassasiyeti $\pm 0,03$ mm'dir. Çalışma sıcaklığı 0-40 °C arasındadır. Kullanılan kumpasın görünümü Şekil 3.69'da verilmiştir.



Şekil 3.69 : Dijital kumpasın görünümü.

3.8.7 Hassas terazi

Numunelerin ağırlık ölçümünde Precisa marka 320 XB serisi 3200 C model hassas terazi kullanılmıştır (Şekil 3.70). Terazi hassasiteyi 0,01 gr'dır. Terazi kapasitesi ise 3200 gr'dır. Tava boyutu 170 mm x 170 mm'dir [48].



Şekil 3.70 : Hassas terazi görünümü.

3.9 Üretilen Numune Gruplarına Göre Uygulanan Deneyler

Bu bölümde hazırlanan numune gruplarına uygulanan deneylere detaylı olarak değinilecektir.

3.9.1 Referans numune grubuna uygulanan deneyler

3.9.1.1 REF grubu, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deneyi

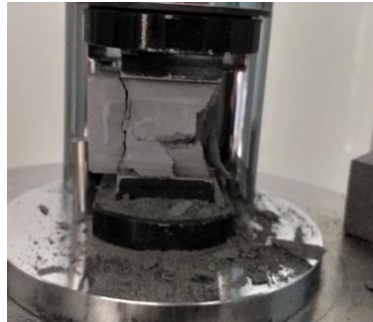
REF grubu için üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları belirlenmiştir. Optik fiber içermeyen REF grubunda her deney tipi için üçer adet numune üretilmiştir. Yapılan 28 günlük eğilme deneyine ait görünüş Şekil 3.71’de verilmiştir.



Şekil 3.71 : REF grubu, 28 günlük eğilme dayanım testi.

3.9.1.2 REF grubu, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyi

Optik fiber içermeyen REF grubu için üretilen üçer adet numunenin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Eğilme numunelerine eğilme testi uygulandıktan sonra numunenin iki tarafından 40 mm x 40 mm’lik bir yüzey alanına basınç testi uygulanmıştır. Yapılan 28 günlük basınç testine ait görsel Şekil 3.72’de verilmiştir.



Şekil 3.72 : REF grubu, 28 günlük basınç dayanım testi.

3.9.1.3 REF grubu ışık geçirgenlik testi

REF grubu numuneleri 28 günlük dayanımlarına ulaştıktan sonra küp numuneler halinde kesilerek ışık geçirgenlik testi için hazırlanmıştır. Önceden hazırlanan test

düzenine yerleştirilen küp numunelerin aydınlanma şiddeti değerleri lüks biriminde ölçülmüştür. 40 mm x 40 mm x 40 mm boyutlarında 3 adet küp numune için ölçüm yapılmıştır. Ölçüm cihazı ve küp numuneler arasında 10 cm ve 20 cm mesafe bırakılarak farklı mesafeden ölçümler yapılmıştır. Yapılan ışık geçirgenlik deneyine ait görsel Şekil 3.73'te verilmiştir.

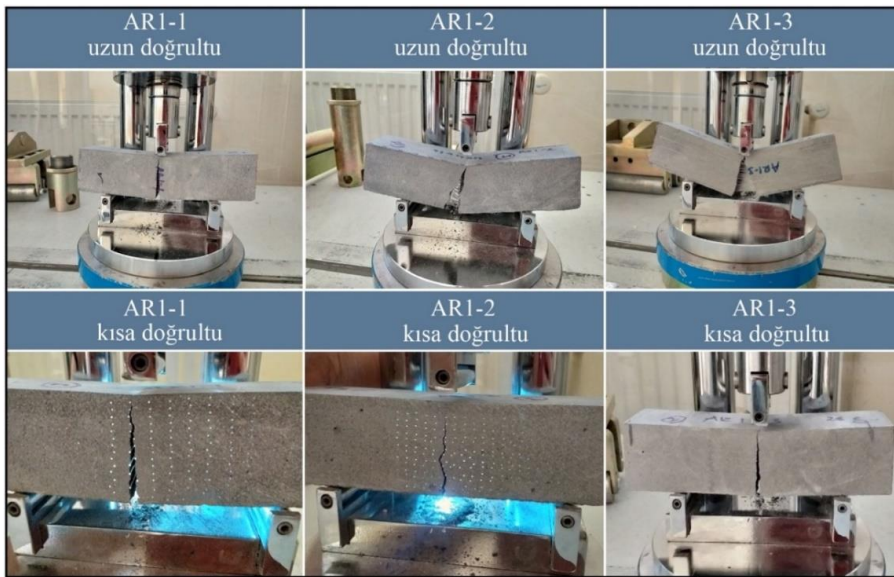


Şekil 3.73 : REF grubu numunesi, ışık geçirgenlik testi.

3.9.2 AR1 numune grubuna uygulanan deneyler

3.9.2.1 AR1 grubu, 28 günlük eğilme dayanımı deneyi

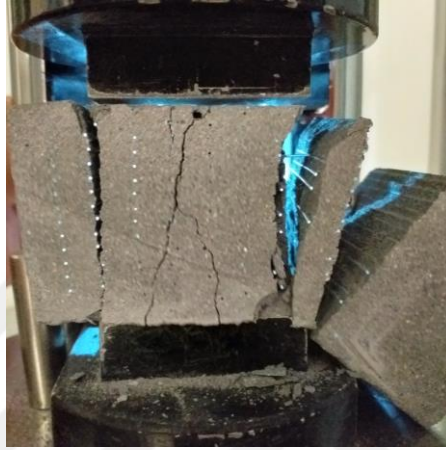
AR1 numune grubu için üretilen 3 farklı optik fiber yüzdesine sahip numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları belirlenmiştir. Uygulanan eğilme yönü optik fiber doğrultularına diktir. Uzun ve kısa doğrultuda optik fiber içeren numuneler için ayrı yapılan eğilme deneyleri sonucunda elde edilen dayanım değerleriyle optik fiber doğrultusuna göre bir karşılaştırma yapılmıştır. AR1 grubunda 28 günün sonunda test edilen numune sayısı 18 adettir. Yapılan 28 günlük eğilme deneylerine ait görüşler Şekil 3.74'te verilmiştir.



Şekil 3.74 : AR1 numune grubu, 28 günlük eğilme dayanım testleri.

3.9.2.2 AR1 grubu, 28 günlük basınç dayanımı deneyi

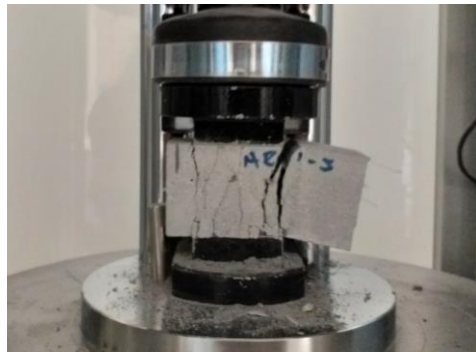
AR1 numune grubu için üretilen 3 farklı optik fiber yüzdesine sahip numunelerin 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Eğilme numunelerine eğilme testi uygulandıktan sonra numunenin 40 mm x 40 mm'lik yüzey alanına sahip kısmına, numunenin her iki tarafı için basınç kuvveti uygulanmıştır. Yapılan basınç testleri numune içerisindeki optik fiber doğrultularına dik olarak uygulanmıştır. Yapılan 28 günlük basınç testlerine ait görünüşler Şekil 3.75-Şekil 3.77'de verilmiştir.



Şekil 3.75 : AR1-1-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.



Şekil 3.76 : AR1-2-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.



Şekil 3.77 : AR1-3-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.

3.9.2.3 AR1 grubu, ışık geçirgenlik testi

AR1 grubu numuneleri 28 günlük dayanımlarına ulaştıktan sonra küp numuneler halinde kesilerek ışık geçirgenlik testi için hazırlanmıştır. Hazırlanan test düzeneğine yerleştirilen numunelerin aydınlanma şiddeti değerleri lüks (lux) biriminde ölçülmüştür. Deneyde ışık kaynağı olarak 82 W halojen lamba kullanılmıştır. Ölçüm cihazı olarak PCE-174 model lüksmetre kullanılmıştır. AR1-1, AR1-2 ve AR1-3 numuneleri için her bir gruptan üçer adet 40 mm x 40 mm x 40 mm boyutunda küp numune olmak üzere toplamda 9 adet numunede ölçüm yapılmıştır. Ölçüm cihazı ve küp numuneler arasında 10 cm ve 20 cm mesafe bırakılarak farklı mesafeden ölçümler yapılmıştır. Yapılan ışık geçirgenlik deneyine ait görünüşler Şekil 3.78 ve Şekil 3.79'da verilmiştir.



Şekil 3.78 : Işık geçirgenlik deney düzeneği.



Şekil 3.79 : AR1 grubu numuneleri, ışık geçirgenlik testi.

3.9.2.4 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası yapılan deneyler

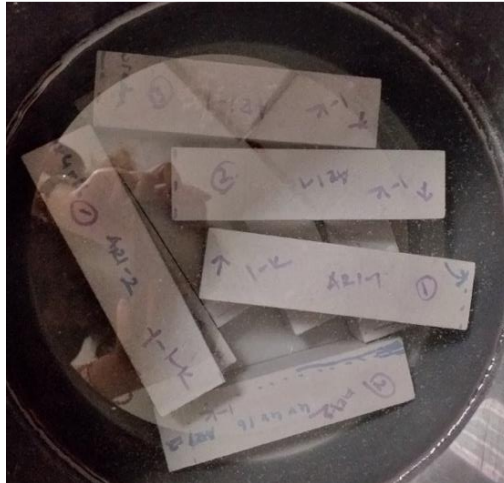
AR1 grubu numunelerine durabiliteyi belirlemeye yönelik hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrasında yapılan deneyler; ıslanma-kuruma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkileri sonrası uygulanan eğilme ve basınç dayanım deneyleridir.

AR1 grubu, ıslanma-kuruma çevrimi sonrası yapılan dayanım testleri

Islanma-kuruma çevrimi için AR1 grubu numuneleri TS EN 12467 Standardına göre 60 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde 6 saat kurumaya, ortam sıcaklığındaki suda 18 saat ıslanmaya maruz bırakılmıştır (Şekil 3.80 ve Şekil 3.81). AR1 grubundan AR1-1-K, AR1-2-K, AR1-3-K ve AR1-1-U, AR1-2-U ve AR1-3-U numunelerinden 3 adet olmak üzere ıslanma-kuruma çevrimleri uygulanmıştır. Islanma-kuruma çevrimi uygulanmadan önce numune boyları ve ağırlıkları ölçülmüştür.

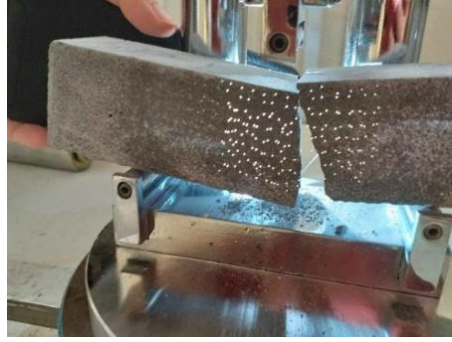


Şekil 3.80 : Etüvde kurumaya bırakılan AR1 grubu numuneleri.

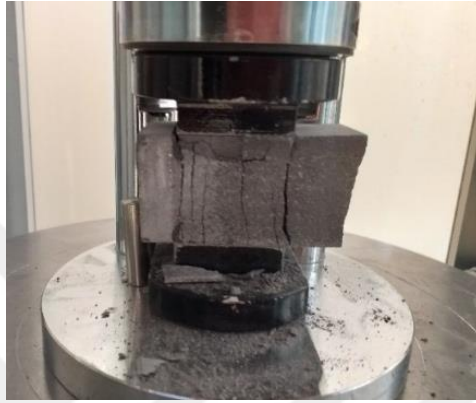


Şekil 3.81 : Islanmaya bırakılan AR1 grubu numuneleri.

Uygulanan 50 çevrim sonrasında numunelere eğilme ve basınç testleri yapılmıştır. Yapılan eğilme ve basınç testlerine ait görünüşler Şekil 3.82 ve Şekil 3.83'te verilmiştir.



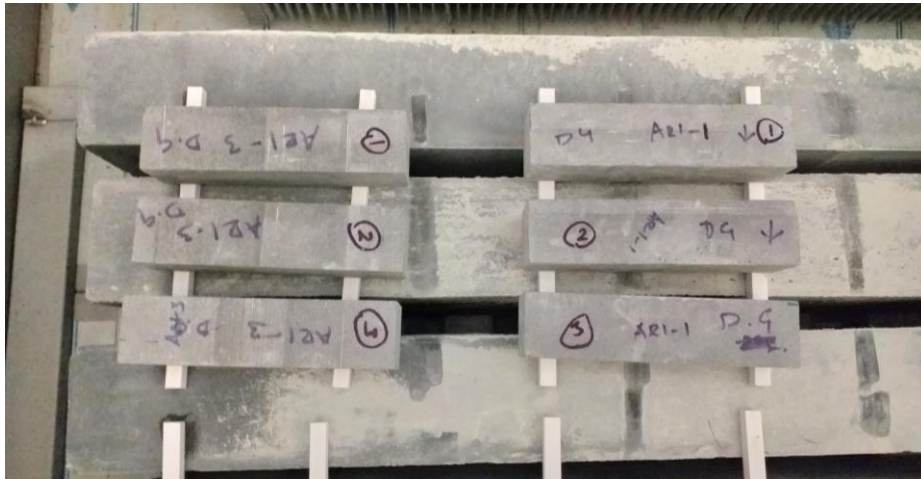
Şekil 3.82 : Numuneye uygulanan eğilme dayanımı testi (AR1-2-K).



Şekil 3.83 : Numuneye uygulanan basınç dayanımı testi (AR1-2-K).

AR1 grubu, donma-çözülme çevrimi sonrası yapılan dayanım testleri

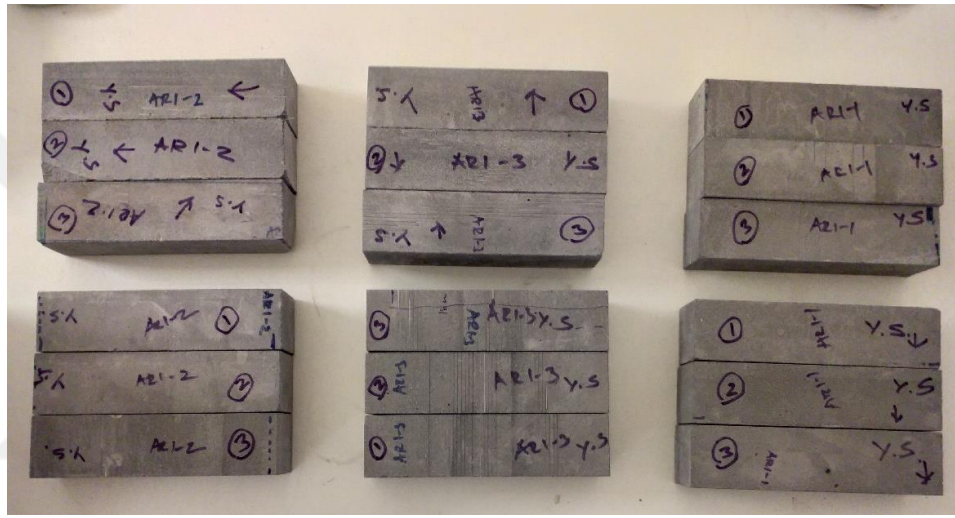
AR1 grubu numunelerine TS EN 12467 Standardına göre donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Standartta belirtilen koşullara göre numuneler -20 ± 4 °C sıcaklıkta 2 saate kadar donmaya, $+20 \pm 4$ °C sıcaklıkta 2 saate kadar suda çözülmeye bırakılmıştır (Şekil 3.84). 100 çevrim sonunda 7-14 gün ortam koşullarında ve 2 gün suda bekletildikten sonra dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Çevrim uygulanan numunelerin eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir.



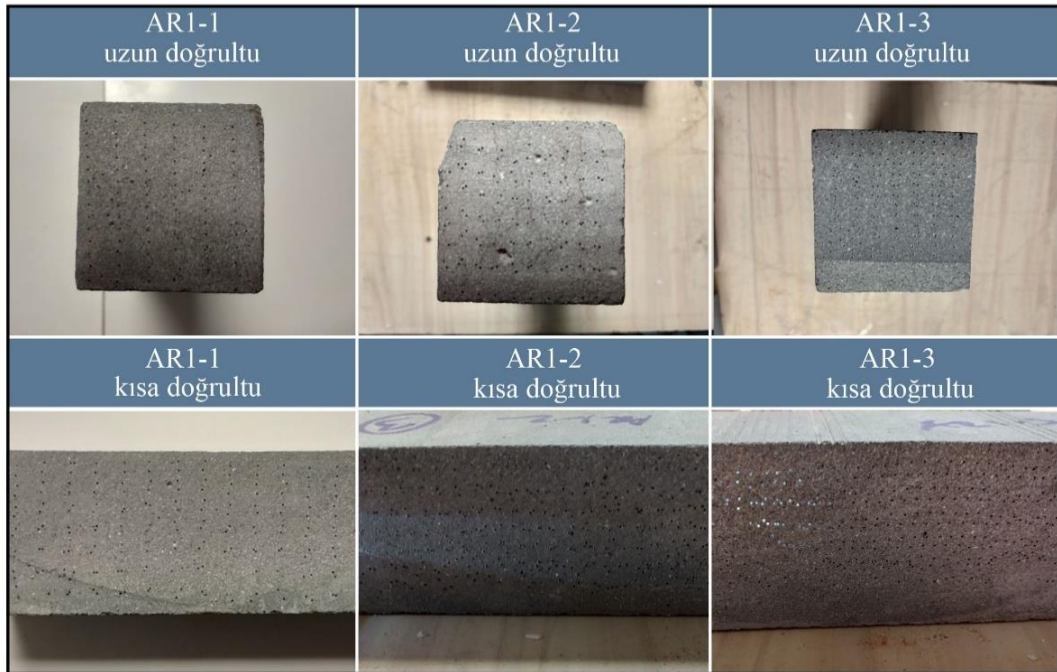
Şekil 3.84 : Donma-çözülme cihazına bırakılan AR1 grubu numuneleri.

AR1 grubu, yüksek sıcaklık etkisi sonrası yapılan testler

Yüksek sıcaklığın optik fiber içeren numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarına olan etkisini belirlemek amacıyla AR1 grubu numuneleri, Nüve marka FN400 model etüvde 1 saat boyunca 150 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yapılan deney sonucunda AR1 grubu numunelerinde beton ve optik fiber yüzeyleri gözle kontrol edilmiştir. Yüksek sıcaklık uygulanmadan önce ve sonra numunelerin boy ölçümleri ve ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin ışık geçirgenlik değerleri, eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi öncesine ve sonrasına ait numune görüntüleri Şekil 3.85 ve Şekil 3.86’da yer almaktadır.



Şekil 3.85 : Yüksek sıcaklık uygulanmadan önceki numune görüntüleri.



Şekil 3.86 : Yüksek sıcaklık uygulandıktan sonraki numune görüntüleri.

Yüksek sıcaklık uygulandıktan sonra numunelere yapılan basınç dayanımı testine ait görünüm Şekil 3.87’de, yapılan eğilme testine ait görünüm Şekil 3.88’de, ışık geçirgenlik testine ait görünüm Şekil 3.89’da verilmiştir.



Şekil 3.87 : Numuneye uygulanan eğilme dayanımı testi (AR1-2-K).



Şekil 3.88 : Numuneye uygulanan basınç dayanımı testi (AR1-2-K).



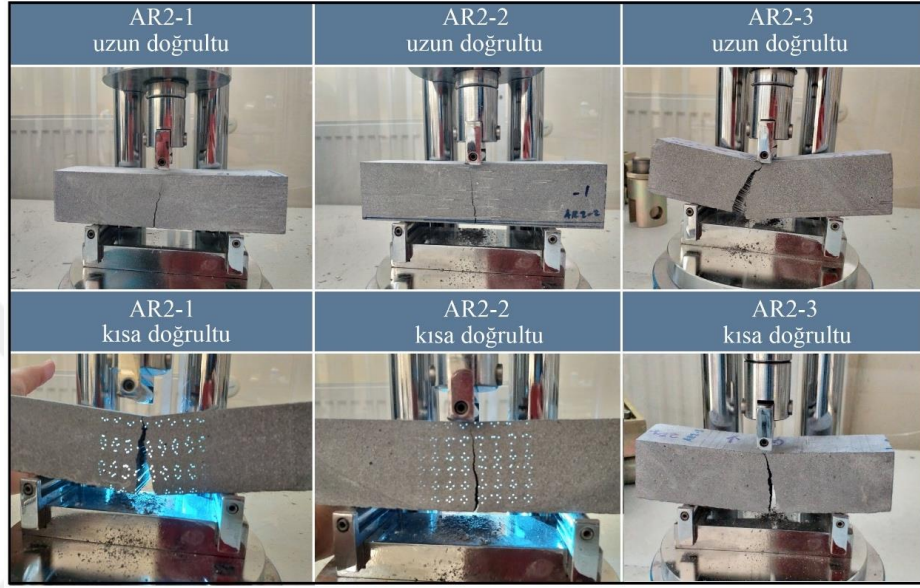
Şekil 3.89 : Numuneye uygulanan ışık geçirgenlik testi (AR1-1-K).

3.9.3 AR2 numune grubuna uygulanan deneyler

3.9.3.1 AR2 grubu, 28 günlük eğilme dayanımı deneyi

AR2 grubu için üretilen 3 farklı optik fiber yüzdesine sahip numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları belirlenmiştir. Yapılan eğilme testlerinde optik fiber doğrultusuna dik olarak kuvvet uygulanmıştır. Eğilme testleri 3 noktalı eğilme testi düzeninde yapılmıştır. Uzun ve kısa doğrultuda optik fiber içeren numuneler için ayrı yapılan

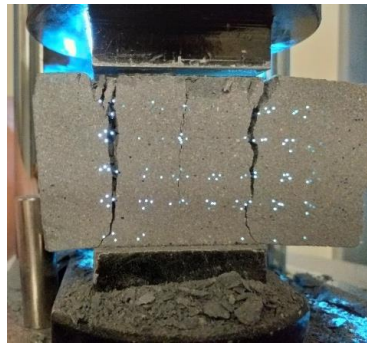
eğilme deneyleri sonucunda elde edilen dayanım değerleriyle optik fiber doğrultusuna göre bir karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan eğilme deneylerinde TS EN 12390-5 Standardı (Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini) uygulanmıştır. Her farklı tip için üçer adet numune üretildiğinden toplamda AR2 grubundan 28 gün sonunda test edilen numune sayısı 18 adettir. Yapılan 28 günlük eğilme deneylerine ait görünüşler Şekil 3.90’da verilmiştir.



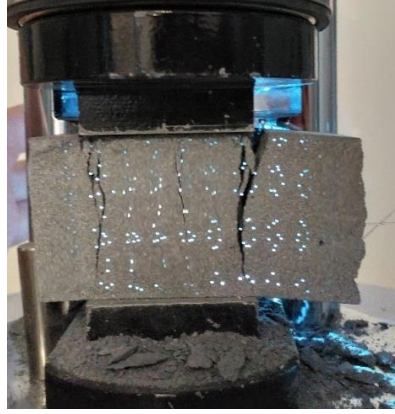
Şekil 3.90 : AR2 grubu numuneleri, 28 günlük eğilme dayanım testi.

3.9.3.2 AR2 grubu, 28 günlük basınç dayanımı deneyi

AR2 grubu için üretilen 3 farklı optik fiber yüzdesine sahip numunelerin 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Eğilme numunelerine eğilme testi uygulandıktan sonra numunenin 40 mm x 40 mm’lik yüzey alanına sahip kısmına numunenin her iki tarafı için basınç kuvveti uygulanmıştır. Yapılan basınç testleri numune içerisindeki optik fiber doğrultularına dik olarak uygulanmıştır. Yapılan 28 günlük basınç testlerine ait görünüşler Şekil 3.91-Şekil 3.93’te verilmiştir.



Şekil 3.91 : AR2-1-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.



Şekil 3.92 : AR2-2-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.



Şekil 3.93 : AR2-3-K numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.

3.9.3.3 AR2 grubu, ışık geçirgenlik testi

AR2 grubu numuneleri 28 günlük dayanımlarına ulaştıktan sonra küp numuneler halinde kesilerek ışık geçirgenlik testi için hazırlanmıştır. Önceden hazırlanan test düzeneğine yerleştirilen numunelerin aydınlanma şiddeti değerleri lüks (lux) biriminde ölçülmüştür. Deneyde ışık kaynağı olarak 82W halojen lamba kullanılmıştır. AR2-1, AR2-2 ve AR2-3 gruplarının her birinden üçer adet 40 mm x 40 mm x 40 mm boyutunda küp numune olmak üzere toplamda 9 adet numunede ölçüm yapılmıştır. Ölçüm cihazı ve küp numuneler arasında 10 cm ve 20 cm mesafe bırakılarak farklı mesafelerden ölçümler yapılmıştır. Yapılan ışık geçirgenlik deneyine ait görsel Şekil 3.94'te verilmiştir.



Şekil 3.94 : AR2 grubu numuneleri, ışık geçirgenlik testi.

3.9.4 PX numune grubuna uygulanan deneyler

3.9.4.1 PX grubu, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deneyi

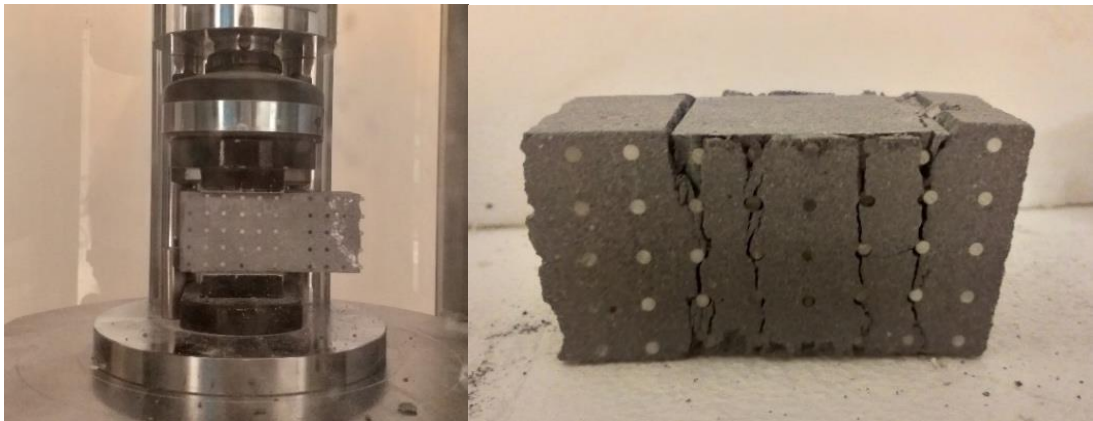
PX grubu için üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları belirlenmiştir. 2 mm çapındaki PMMA tüpler içeren numunelerden her deney tipi için üçer adet numune üretilmiştir. Eğilme testinde kuvvet yönü tüplerin yerleşimine diktir. Yapılan 28 günlük eğilme deneyine ait görünüm Şekil 3.95'te verilmiştir.



Şekil 3.95 : PX grubu numunesi, 28 günlük eğilme dayanım testi.

3.9.4.2 PX grubu, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyi

PX grubu için üretilen üçer adet numunenin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Numunelere eğilme dayanım testi uygulandıktan sonra numunenin 40 mm x 40 mm'lik yüzey alanına basınç testi uygulanmıştır. Yapılan basınç testlerinde kuvvet, numune içerisinde bulunan tüplerin yerleşim doğrultularına dik olacak şekilde uygulanmıştır. 28 günlük basınç testine ait görseller Şekil 3.96'da verilmiştir.



Şekil 3.96 : PX numunesi, 28 günlük basınç dayanım testi.

3.9.4.3 PX grubu, ışık geçirgenlik testi

PX grubu numuneleri 28 günlük dayanımlarına ulaştıktan sonra küp numuneler halinde kesilerek ışık geçirgenlik testi için hazırlanmıştır. Hazırlanan test düzeneğine yerleştirilen numunelerin aydınlanma şiddeti değerleri lüks (lux) biriminde ölçülmüştür. Deneyde ışık kaynağı olarak 82W halojen lamba kullanılmıştır. Ölçüm cihazı olarak PCE-174 model lüksmetre kullanılmıştır. 40 mm x 40 mm x 40 mm boyutlarında 3 adet küp numune için ölçüm yapılmıştır. Ölçüm cihazı ve küp numuneler arasında 10 cm ve 20 cm mesafe bırakılarak farklı mesafelerden ölçümler yapılmıştır. Yapılan ışık geçirgenlik deneyine ait görsel Şekil 3.97’de verilmiştir.



Şekil 3.97 : PX grubu numunesi, ışık geçirgenlik testi.

3.9.4.4 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası yapılan deneyler

PX grubu numunelerine durabiliteyi belirlemeye yönelik hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrasında yapılan deneyler; ıslanma-kuruma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkileri sonrası uygulanan eğilme ve basınç dayanım deneyleridir.

PX grubu, ıslanma-kuruma çevrimi sonrası yapılan dayanım testleri

Islanma-kuruma çevrimi için PX grubu numuneleri TS EN 12467 Standardına göre 60 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde 6 saat kurumaya, ortam sıcaklığındaki suda 18 saat ıslanmaya maruz bırakılmıştır (Şekil 3.98 ve Şekil 3.99).



Şekil 3.98 : Etüvde kurumaya bırakılan PX grubu numuneleri.



Şekil 3.99 : Islanmaya bırakılan PX grubu numuneleri.

Uygulanan 50 çevrim sonrasında numunelere eğilme ve basınç dayanım testleri yapılmıştır. Yapılan eğilme ve basınç testlerine ait görseller Şekil 3.100 ve Şekil 3.101’de verilmiştir.



Şekil 3.100 : Numuneye uygulanan eğilme dayanımı testi.



Şekil 3.101 : Numuneye uygulanan basınç dayanımı testi.

PX grubu, donma-çözülme çevrimi sonrası yapılan dayanım testleri

PX grubu numunelerine TS EN 12467 Standardına göre donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Donma-çözülme deneyi için bu gruptan 3 adet numuneye çevrimler uygulanmıştır. Standartta belirtilen koşullara göre numuneler -20 ± 4 °C sıcaklıkta 2 saate kadar donmaya, $+20\pm 4$ °C sıcaklıkta 2 saate kadar suda çözölmeye bırakılmıştır.

PX grubu numunelerinin çevrimleri donma-çözülme cihazı kullanılmadan elle yapılmıştır. Numuneler her çevrimde 2 saat boyunca -20 ± 4 °C sıcaklıkta dondurucuda bekletilmiş ve 2 saat $+20\pm4$ °C sıcaklıktaki suda bekletilmiştir (Şekil 3.102 ve Şekil 3.103).



Şekil 3.102 : Donma çevrimi.

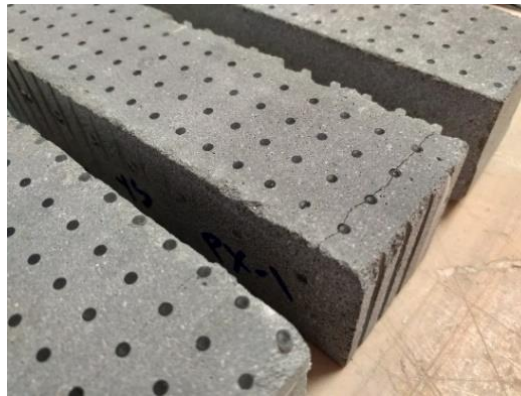


Şekil 3.103 : Çözülme çevrimi.

100 çevrim sonunda 7-14 gün ortam koşullarında ve 2 gün suda bekletildikten sonra numuneler eğilme ve basınç dayanım testlerine tabi tutulmuştur.

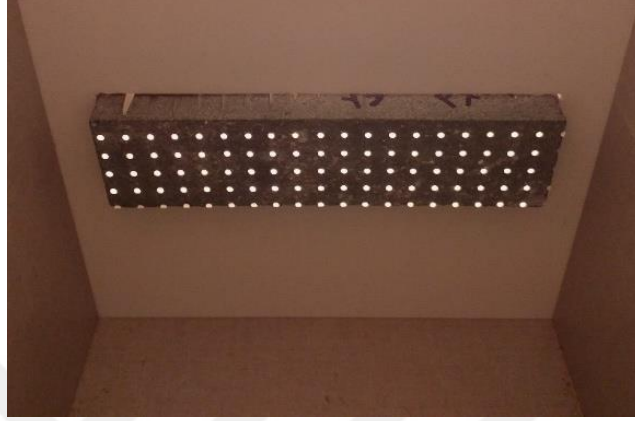
PX grubu, yüksek sıcaklık etkisi sonrası yapılan testler

Yüksek sıcaklığın numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarına olan etkisini belirlemek amacıyla 3 adet numune, 1 saat boyunca 150 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yapılan deney sonucunda PX grubu numunelerinde beton ve PMMA tüplerin erime durumu görsel olarak kontrol edilmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklık uygulandıktan sonra görünüşleri Şekil 3.104'te verilmiştir.

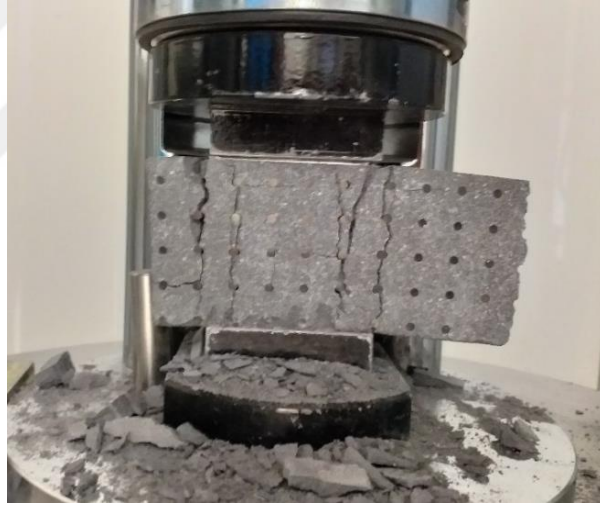


Şekil 3.104 : Yüksek sıcaklık uygulandıktan sonraki numune görünüşleri.

Deney sonrası PMMA tüplerde erime olduğu ve betonda şeffaf tüpler doğrultusunda çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. Sıcaklık etkisi uygulanmadan önce ve sonra numunelerin boy ve ağırlık değerleri kaydedilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası numunelerin ışık geçirgenlik değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.105). Sonrasında numunelere eğilme ve basınç dayanım testleri uygulanmıştır (Şekil 3.106).



Şekil 3.105 : Yüksek sıcaklık uygulanmadan önce yapılan ışık geçirgenlik testi.



Şekil 3.106 : Numuneye uygulanan basınç dayanımı testi.

3.10 Deney Sonuçları

3.10.1 REF grubu deney sonuçları

Optik fiber içermeyen REF grubu numunelerinin sonuçları bu bölümde verilmiştir.

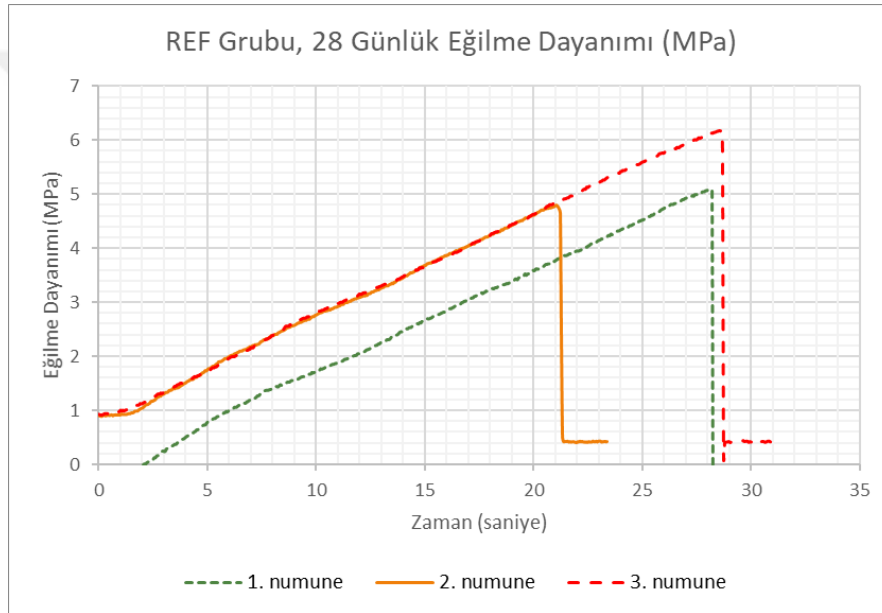
3.10.1.1 REF grubu 7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları

Optik fiber içermeyen REF numune grubunun 7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları Çizelge 3.15’te verilmiştir.

Çizelge 3.15 : REF numune grubu, eğilme dayanım testi sonuçları.

Numune tipi	Deney tipi	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
REF	7 günlük eğilme testi	3	3,82	1,70
REF	28 günlük eğilme testi	3	5,22	2,27

Üretilen numunelere 7. gün ve 28. günde uygulanan eğilme testleri sonucunda REF numune grubunun 7 günlük ortalama eğilme dayanımının 3,82 MPa, 28 günlük ortalama eğilme dayanımının 5,22 MPa olduğu bulunmuştur. Yapılan 28 günlük eğilme deneylerine ait dayanım-zaman grafiği Şekil 3.107’de verilmiştir.



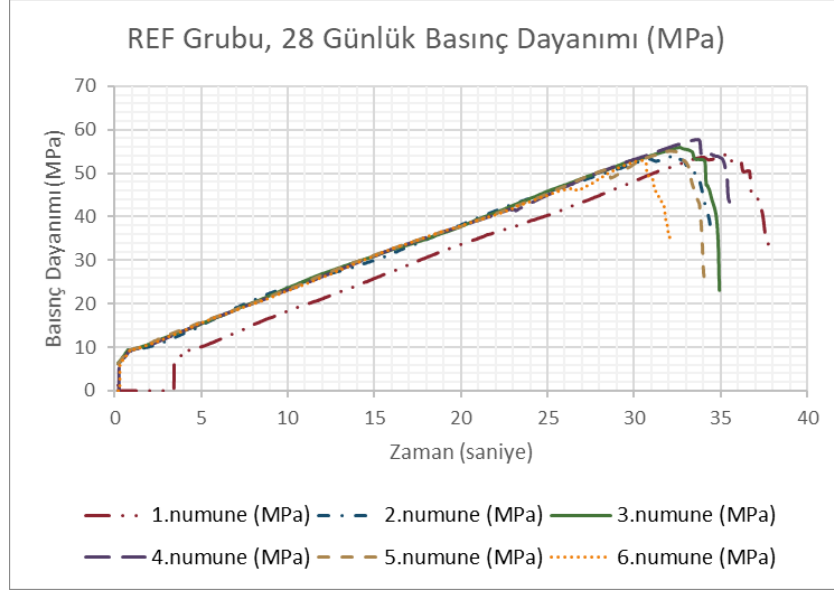
Şekil 3.107 : REF grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.

3.10.1.2 REF grubu 7 ve 28 günlük basınç testi sonuçları

REF numune grubuna ait 7 ve 28 günlük basınç dayanım testi sonuçları Çizelge 3.16’da verilmiştir. REF numune grubunun 7 günlük basınç dayanımı 47,46 MPa ve 28 günlük basınç dayanımı 54,98 MPa’dır. Yapılan 28 günlük basınç dayanımı deneyine ait grafik Şekil 3.108’de verilmiştir.

Çizelge 3.16 : REF grubu, basınç dayanım testi sonuçları.

Numune tipi	Deney tipi	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
REF	7 günlük basınç testi	6	47,46	75,61
REF	28 günlük basınç testi	6	54,98	88,91



Şekil 3.108 : REF grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.

Yapılan 7 ve 28 günlük dayanım testlerine ait tüm sonuçlar Ek B’de ve 7. gün dayanım grafikleri Ek C’de verilmiştir.

3.10.1.3 REF grubu ışık geçirgenlik testi sonuçları

REF numune grubu için üretilen 40 mm x 40 mm x 40 mm boyutlarındaki küp numunelerin ışık geçirgenlikleri ölçülmüştür. Lüks metre cihazı ile ölçülen aydınlanma şiddeti değerleri lüks (lux) biriminde okunarak kaydedilmiştir. Ölçüm cihazından numuneye olan mesafe 10 cm ve 20 cm için okunan ortalama τ_2 değeri “0” olduğundan numunelerin ışık geçirgenlikleri de %0 değerini almıştır. Doğal olarak, REF grubu numuneleri optik fiber içermediğinden ışık geçirgenlik özelliği de bulunmamaktadır.

3.10.2 AR1 grubu deney sonuçları

AR1 grubu numunelerine ait deney sonuçları bu bölümde verilmiştir.

3.10.2.1 AR1 grubu, 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları

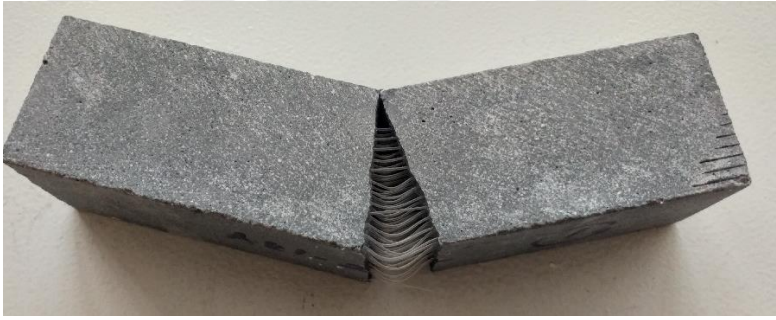
AR1 grubundan sırasıyla %1, %1,6 ve %2,4 oranında optik fiber içeren AR1-1-K, AR1-2-K, AR1-3-K ve AR1-1-U, AR1-2-U, AR1-3-U numunelerinin, 28 günlük ortalama eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 3.17’de verilmiştir. Optik fiberlerin uzun ve kısa doğrultuda yerleşmesiyle elde edilen numunelerin sonuçları ayrı olarak belirtilmiştir. Yapılan testler sonucunda AR1-1-K numunelerinin 28 günlük ortalama eğilme dayanımı 6,29 MPa, AR1-1-U numunelerinin ortalama eğilme dayanımı ise 7,13 MPa olarak bulunmuştur. AR1-2-U numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı

7,70 MPa, AR1-2-K numunelerinin 6,93 MPa, AR1-3-U numunelerinin 8,11 MPa ve AR1-3-K numunelerinin ortalama eğilme dayanımının 6,44 MPa olduğu bulunmuştur.

Çizelge 3.17 : AR1 grubu, 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları.

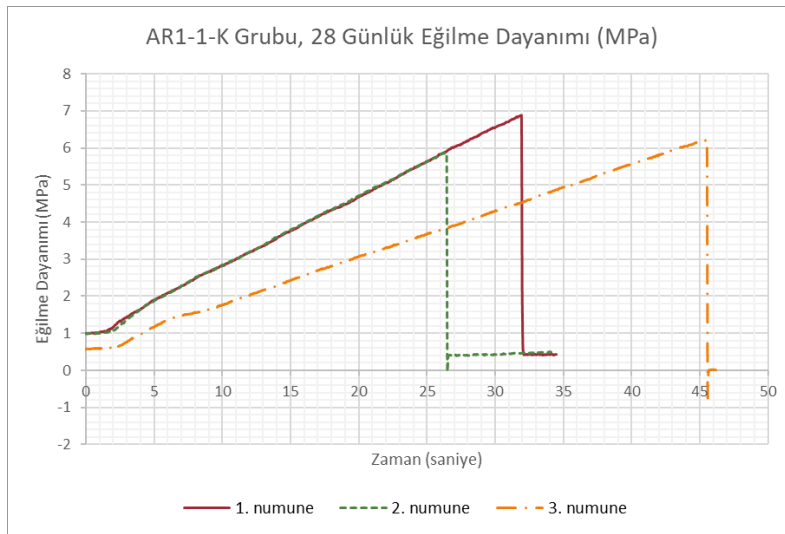
	Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
Uzun doğrultu	AR1-1-U	1	3	7,13	3,23
	AR1-2-U	1,6	3	7,70	3,31
	AR1-3-U	2,4	3	8,11	3,79
Kısa doğrultu	AR1-1-K	1	3	6,29	2,69
	AR1-2-K	1,6	3	6,93	2,93
	AR1-3-K	2,4	3	6,44	2,91

Uzun doğrultuda optik fiberlerin yerleştiği numunelerde eğilme deneyleri sırasında eğilme yüküyle birlikte betonun kırıldığı ancak optik fiberlerin kopmadığı görülmüştür (Şekil 109).

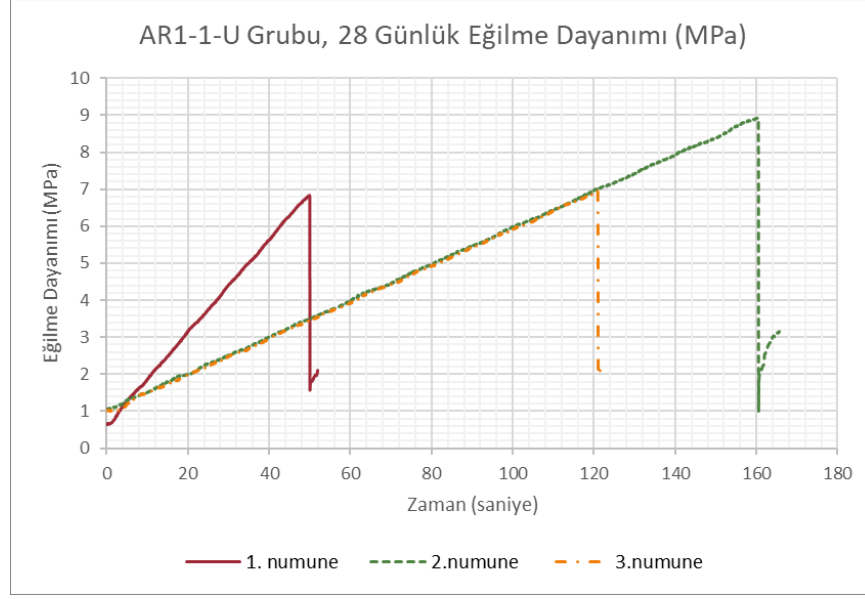


Şekil 3.109 : AR1 grubu (U) numunesi, eğilme deneyi sonrası görünüm.

Yapılan deneylerden AR1-1-K ve AR1-1-U numunelerine ait gerilme-zaman grafikleri Şekil 3.110 ve Şekil 3.111’de verilmiştir.



Şekil 3.110 : AR1-1-K numuneleri, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



Şekil 3.111 : AR1-1-U numuneleri, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.

Yukarıda belirtildiği üzere optik fiberlerin uzun doğrultuda yerleşmesi ve optik fiberlerin kopmaması nedeniyle Şekil 3.111'deki eğilme dayanım-zaman grafiğinde AR1-1-U numunelerinin eğilme dayanımlarının maksimum eğilme dayanımına ulaştıktan sonra sıfır olmadığı görülmektedir.

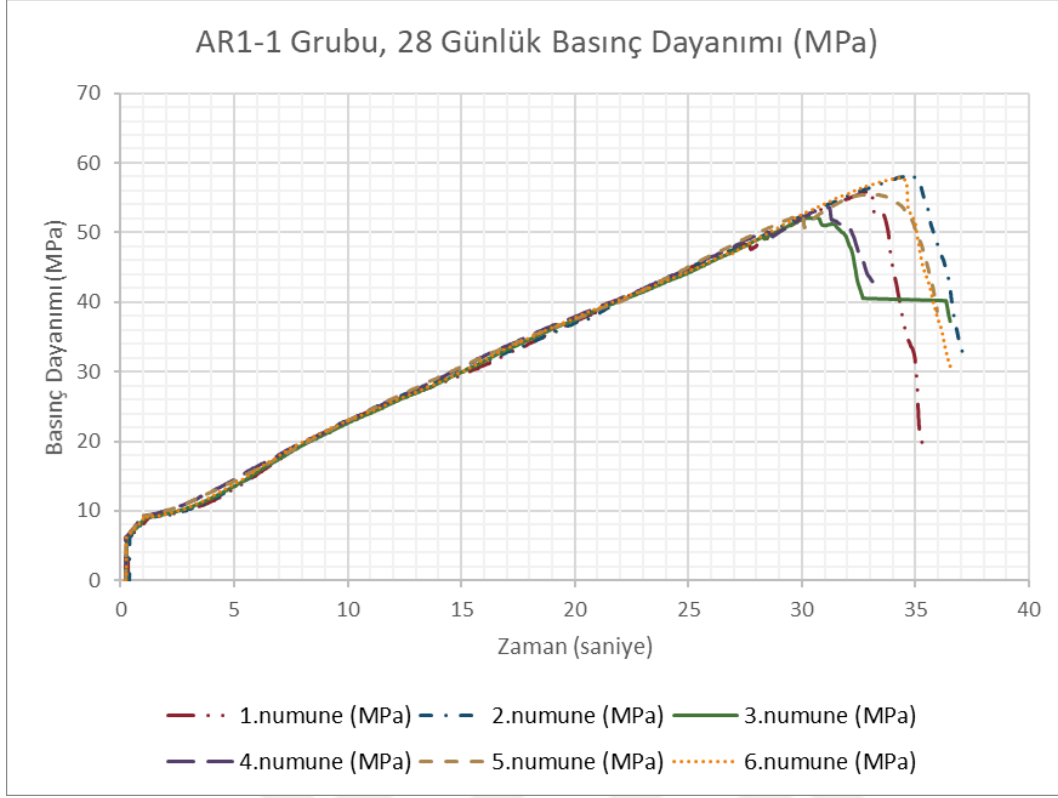
AR1-1, AR1-2 ve AR1-3 grupları numunelerine ait deney sonuçları Ek B'de ve AR1-2 ve AR1-3 gruplarına ait dayanım grafikleri Ek C'de verilmiştir.

3.10.2.2 AR1 grubu 28 günlük basınç dayanım testi sonuçları

AR1 grubundan sırasıyla %1, %1,6 ve %2,4 oranında optik fiber içeren AR1-1, AR1-2 ve AR1-3 gruplarının 28 günlük basınç dayanım testi sonuçları Çizelge 3.18'de verilmiştir. Elde edilen 6 değer ortalama alınmış ve AR1-1 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 54,79 MPa olarak hesaplanmıştır. AR1-2 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 52,29 MPa ve AR1-3 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 41,24 MPa olarak bulunmuştur. Yapılan AR1-1 grubu basınç deneylerine ait dayanım-zaman grafiği Şekil 3.112'de verilmiştir. AR1-1, AR1-2 ve AR1-3 grupları numunelerine ait sonuçlar Ek B'de ve basınç dayanımı-zaman grafikleri Ek C'de verilmiştir.

Çizelge 3.18 : AR1 grubu, 28. gün basınç dayanım testi sonuçları.

Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
AR1-1	1	6	54,79	89,89
AR1-2	1,6	6	52,29	84,43
AR1-3	2,4	6	41,24	68,20



Şekil 3.112 : AR1-1 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.

3.10.2.3 AR1 grubu ışık geçirgenlik testi sonuçları

AR1 numune grubundan sırasıyla %1, %1,6 ve %2,4 oranında optik fiber içeren AR1-1, AR1-2 ve AR1-3 tipleri için üretilen 40 mm x 40 mm x 40 mm boyutlarındaki küp numunelerin ışık geçirgenlikleri ölçülmüştür. Lüksmetre cihazı ile ölçülen aydınlanma şiddeti değerleri lüks (lux) cinsinden okunarak kaydedilmiştir. Işık geçirgenliğini hesaplamak için TS EN ISO 13468-1:2019 (Plastikler- Saydam malzemelerin toplam ışık geçirgenliğinin tayini- Bölüm 1: Tek- Işın demetli cihaz) Standardında yer alan Denklem 3.2’de belirtilen formülden yararlanılmıştır. Denklemde verilen τ_t toplam ışık geçirgenliğini (%), τ_2 numuneden geçen ışık miktarını, τ_1 ise numune yokken geçen ışık miktarını göstermektedir.

$$\tau_t = \frac{\tau_2}{\tau_1} \times 100 \quad (3.2)$$

Ölçüm cihazından numuneye olan mesafe 10 cm ve 20 cm için okunan ortalama τ_2 ve τ_1 değerleri Çizelge 3.19’da verilmiştir. Çizelgedeki değerler, her numune tipi için 3 adet numuneden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.19 : AR1 grubu, ışık geçirgenlik testi sonuçları.

Ölçüm cihazından olan mesafe	Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	τ_2 (lüks)	τ_t - ışık geçirgenliği (%)	τ_1 (lüks)
10 cm	AR1-1	1	3	17,06	0,45	3801,33
	AR1-2	1,6	3	20,86	0,55	3801,33
	AR1-3	2,4	3	49,31	1,30	3801,33
20 cm	AR1-1	1	3	1,22	0,09	1353,33
	AR1-2	1,6	3	1,69	0,12	1353,33
	AR1-3	2,4	3	6,62	0,49	1353,33

3.10.2.4 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası deney sonuçları

AR1 grubu ıslanma-kuruma çevrimi sonrası deney sonuçları

AR1 numune grubundan AR1-1, AR1-2 ve AR1-3 tiplerinin ıslanma-kuruma çevrimleri sonrasında basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Her numune tipi için 3 adet numuneye eğilme testi ve basınç testi yapılmıştır. Islanma-kuruma çevrimleri uygulandıktan sonraki numune görünüşleri Şekil 3.113-Şekil 3.118 arasında verilmiştir. Islanma-kuruma çevrimleri uygulandıktan sonra numunelerde çatlak oluşumu görülmemiştir. Ancak optik fiber çevresinde beyaz bir tabakalaşma olduğu görülmüştür (Şekil 3.119). Gözle kontrol yapıldıktan sonra numunelerin ağırlık ve boy ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra numunelere eğilme ve basınç dayanım testleri uygulanmıştır.



Şekil 3.113 : AR1-1-U numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.



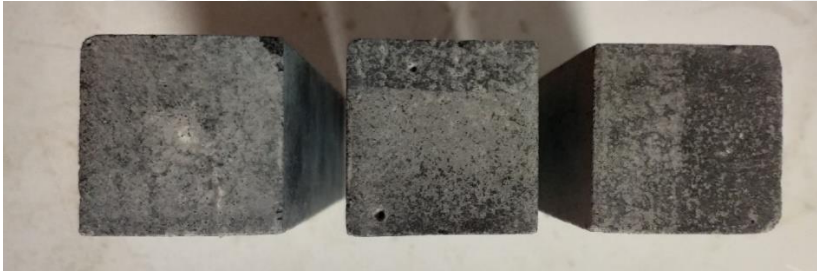
Şekil 3.114 : AR1-1-K numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.



Şekil 3.115 : AR1-2-U numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.



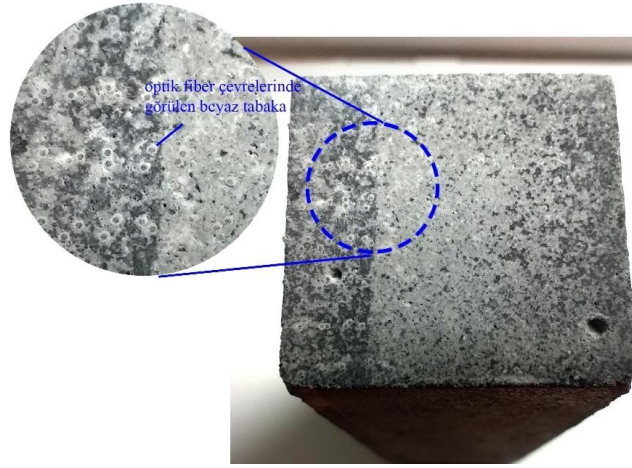
Şekil 3.116 : AR1-2-K numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.



Şekil 3.117 : AR1-3-U numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.



Şekil 3.118 : AR1-3-K numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüm.



Şekil 3.119 : Islanma-kuruma sonrası optik fiber çevrelerinde görülen beyaz tabaka.

Numunelere hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulandıktan sonra yapılan basınç dayanım testi sonuçları Çizelge 3.20’de verilmiştir. Ortalama basınç dayanımları, AR1-1 için 48,26 MPa, AR1-2 için 50,80 MPa ve AR1-3 için ise 37,97 MPa değerlerini almıştır. Uzun ve kısa doğrultuda yerleştirilen optik fiberli numuneler için yaşlandırma koşulları sonrası elde edilen ortalama eğilme dayanımları Çizelge 3.21’de verilmiştir.

Çizelge 3.20 : AR1 grubu, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanım testi sonuçları.

Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
AR1-1	1	6	48,26	80,48
AR1-2	1,6	6	50,80	80,89
AR1-3	2,4	6	37,97	64,09

Çizelge 3.21 : AR1 grubu, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası eğilme dayanım testi sonuçları.

	Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
Uzun doğrultu	AR1-1-U	1	3	7,03	3,20
	AR1-2-U	1,6	3	8,08	3,43
	AR1-3-U	2,4	3	8,40	4,00
Kısa doğrultu	AR1-1-K	1	3	6,05	2,97
	AR1-2-K	1,6	3	6,66	2,77
	AR1-3-K	2,4	3	4,48	2,03

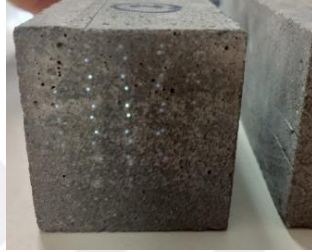
AR1 grubu donma-çözülme çevrimi sonrası deney sonuçları

AR1 grubundan AR1-1, AR1-2 ve AR1-3 numunelerinin donma-çözülme çevrimleri sonrasında basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrimleri sonrasındaki numunelerin görünüşleri Şekil 3.120 - Şekil 3.125’te verilmiştir.

Uygulanan çevrimler sonrasında numunelerde çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Ancak optik fiber çevrelerinde beyaz renkte bir tabakalaşma görülmüştür (Şekil 3.126).



Şekil 3.120 : AR1-1-K numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm.



Şekil 3.121 : AR1-1-U numunesi, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm.



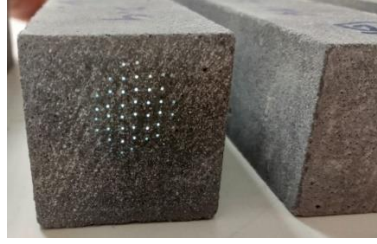
Şekil 3.122 : AR1-2-K numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm.



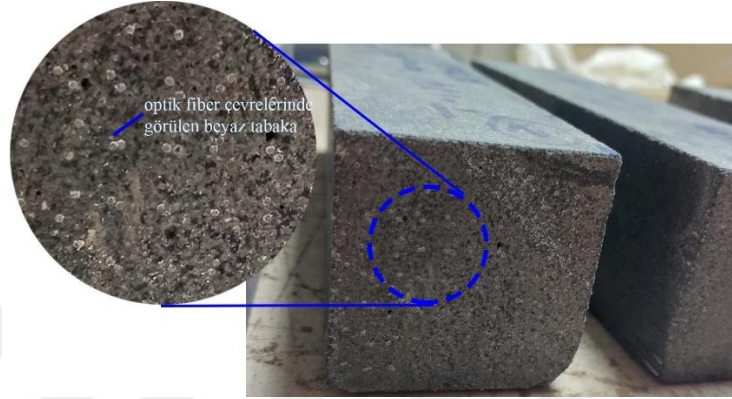
Şekil 3.123 : AR1-2-U numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm.



Şekil 3.124 : AR1-3-K numunesi, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm.



Şekil 3.125 : AR1-3-U numunesi, donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüm.



Şekil 3.126 : Donma-çözülme sonrası optik fiber çevrelerinde görülen beyaz tabaka.

Donma-çözülme çevrimleri sonrasında yapılan basınç dayanım testinin sonuçları Çizelge 3.22’de verilmiştir. Ortalama basınç dayanımları, AR1-1 için 38,94 MPa, AR1-2 için 46,93 MPa ve AR1-3 için ise 39,46 MPa olarak bulunmuştur. Uzun ve kısa doğrultuda yerleştirilen optik fiberli numuneler için yaşlandırma koşulları sonrası belirlenen ortalama eğilme dayanımları Çizelge 3.23’te verilmiştir.

Çizelge 3.22 : AR1 grubu, donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanım testi sonuçları.

Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
AR1-1	1	6	38,94	64,98
AR1-2	1,6	6	46,93	73,98
AR1-3	2,4	6	39,46	66,02

Çizelge 3.23 : AR1 grubu, donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanım testi sonuçları.

	Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
Uzun doğrultu	AR1-1-U	1	3	8,12	3,72
	AR1-2-U	1,6	3	7,81	3,47
	AR1-3-U	2,4	3	7,42	3,5
Kısa doğrultu	AR1-1-K	1	3	5,87	2,68
	AR1-2-K	1,6	3	6,41	2,64
	AR1-3-K	2,4	3	5,51	2,53

AR1 grubu yüksek sıcaklık etkisi sonrası deney sonuçları

AR1 grubundan farklı optik fiber yüzdeleri için üretilen numunelerin yüksek sıcaklık uygulandıktan sonra dayanımları belirlenmiştir. AR1-1-K, AR1-2-K, AR1-3-K ve AR1-1-U, AR1-2-U, AR1-3-U numunelerinden üçer adet numune yüksek sıcaklığa tabi tutulmuştur. Numunelere yüksek sıcaklık uygulandıktan ve 24 saat havada soğumaya bırakıldıktan sonra ışık geçirgenlikleri ve dayanımları belirlenmiştir.

AR1-1-K, AR1-2-K, AR1-3-K numunelerine yüksek sıcaklık uygulanmadan önce ve sonra ışık geçirgenlikleri belirlenmiştir (Şekil 3.126). Yapılan deneyde numuneler ve ölçüm cihazı arası mesafe 10 cm olup kullanılan ampulün gücü 82 Watt'tır.



Şekil 3.127 : AR1-1-K numunesi, yüksek sıcaklık etkisi öncesi ışık geçirgenlik deneyi.

Yüksek sıcaklık uygulanmadan önceki ve sonraki durum için ölçülen ışık geçirgenlik değerleri Çizelge 3.24'te verilmiştir.

Çizelge 3.24 : AR1 grubu (kısa doğrultu), yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası ışık geçirgenlik testi sonuçları.

Yüksek sıcaklık etkisi	Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	τ_2 (lüks)	τ_1 - ışık geçirgenliği (%)
Önce	AR1-1-K	1	3	12,29	0,24
	AR1-2-K	1,6	3	25,06	0,49
	AR1-3-K	2,4	3	51,31	1,00
Sonra	AR1-1-K	1	3	2,61	0,05
	AR1-2-K	1,6	3	3,97	0,08
	AR1-3-K	2,4	3	6,89	0,13

Çizelgede τ_2 numuneden geçen ışık miktarını, τ_1 toplam ışık geçirgenliğini (%) göstermektedir. Numune yokken ölçüm cihazına düşen aydınlanma şiddeti değeri ise 5111 lüks (lux)'tür. Yüksek sıcaklık uygulanmadan önce numunelerde ölçülen ışık geçirgenlik değeri AR1-1-K için %0,24, AR1-2-K için %0,49 ve AR1-3-K için

%1'dir. Yüksek sıcaklık uygulandıktan sonra bulunan ışık geçirgenlik değerleri ise AR1-1-K için %0,05, AR1-2-K için %0,08 ve AR1-3-K için %0,13'tür. Yüksek sıcaklık uygulandıktan sonra AR1-1-K numunesinin ışık geçirgenlik testine ait görsel Şekil 3.128'de verilmiştir.



Şekil 3.128 : AR1-1-K numunesi, yüksek sıcaklık sonrası ışık geçirgenlik deneyi.

Uzun ve kısa doğrultuda yerleştirilen optik fiberli numuneler için yüksek sıcaklık sonrası belirlenen ortalama eğilme dayanımları Çizelge 3.25'te verilmiştir. Numunelere eğilme dayanım testi yapıldıktan sonra kalan her iki parçası kullanılarak numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Yapılan basınç testleri sonucu ortalama basınç dayanımları Çizelge 3.26'da verilmiştir.

Çizelge 3.25 : AR1 grubu, yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım testi sonuçları.

	Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
Uzun doğrultu	AR1-1-U	1	3	4,51	2,07
	AR1-2-U	1,6	3	4,57	2,03
	AR1-3-U	2,4	3	4,34	2,00
Kısa doğrultu	AR1-1-K	1	3	4,18	1,87
	AR1-2-K	1,6	3	4,09	1,73
	AR1-3-K	2,4	3	3,12	1,47

Çizelge 3.26 : AR1 grubu, yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım testi sonuçları.

Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
AR1-1	1	6	48,10	76,96
AR1-2	1,6	6	46,81	74,90
AR1-3	2,4	6	37,62	60,19

Yüksek sıcaklık etkisi sonrasına ait numune görünimleri Şekil 3.129- Şekil 3.132'de verilmiştir. Uygulanan yüksek sıcaklık etkisi sonrasında numune yüzeylerinde çatlak

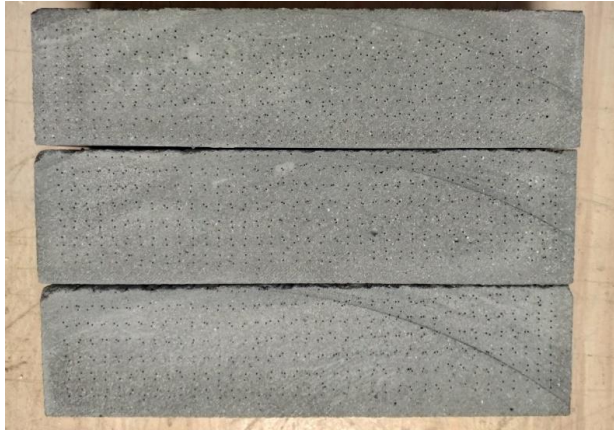
oluşumu gözlenmemiştir. Ancak kısa doğrultuda yerleşen optik fiberlerin az da olsa numunenin bir tarafından dışa doğru çıktığı ve optik fiberlerde erime gerçekleştiği gözlenmiştir (Şekil 3.133). Uzun doğrultuda optik fiberlerin yerleştiği numunelerde, yüksek sıcaklık etkisi sonrası optik fiberlerde erime ve kısalma gözlenmiştir (Şekil 3.134).



Şekil 3.129 : AR1-1-U numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.



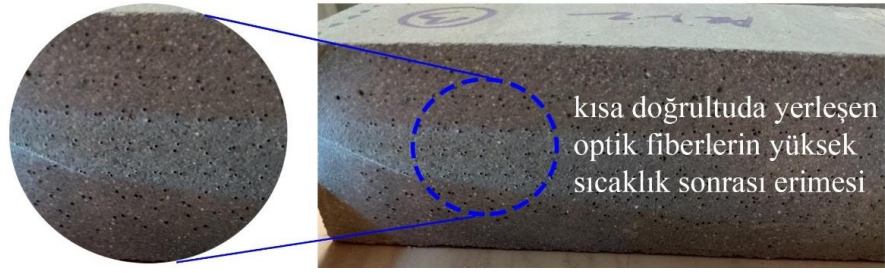
Şekil 3.130 : AR1-1-K numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.



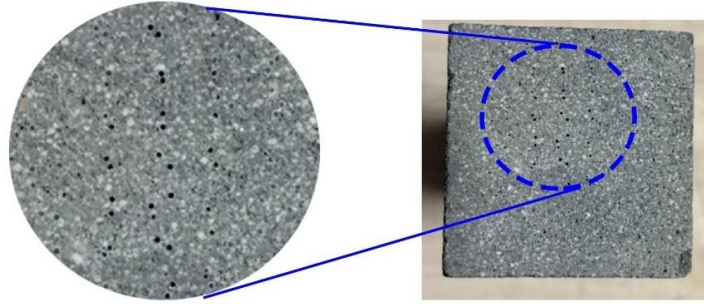
Şekil 3.131 : AR1-2-K numuneleri, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.



Şekil 3.132 : AR1-3-K numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.



Şekil 3.133 : AR1-2-K numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.



Şekil 3.134 : AR1-2-U numunesi, yüksek sıcaklık sonrası görünüm.

3.10.3 AR2 grubu deney sonuçları

AR2 numune grubuna ait deney sonuçları bu bölümde verilmiştir.

3.10.3.1 AR2 grubu, 28 günlük eğilme testi sonuçları

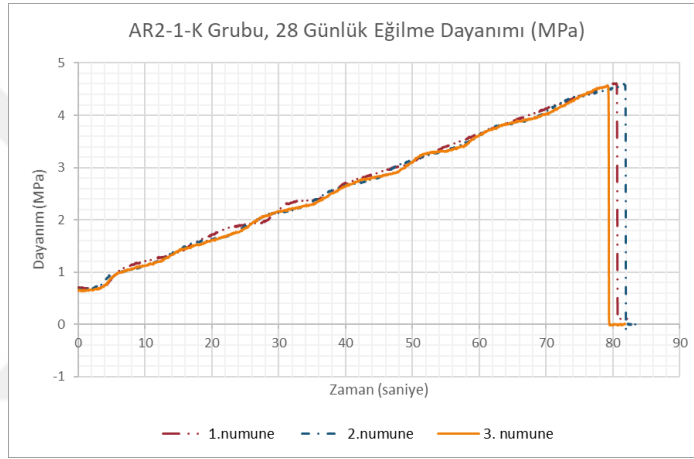
AR2 numune grubundan sırasıyla %1, %1,6 ve %2,4 oranında optik fiber içeren numunelerin 28 günlük ortalama eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 3.27’de verilmiştir. Optik fiberlerin uzun ve kısa doğrultuda yerleşmesiyle elde edilen numunelerin eğilme dayanımı sonuçları tabloda ayrı olarak belirtilmiştir.

Çizelge 3.27 : AR2 grubu, 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları.

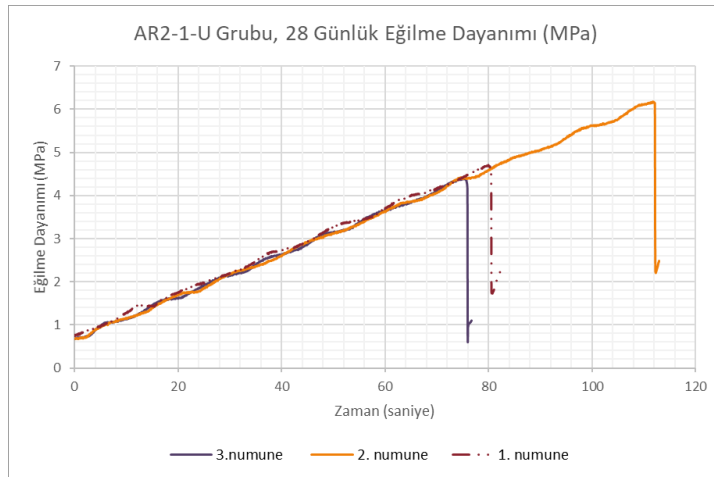
	Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
Uzun doğrultu	AR2-1-U	1	3	5,19	2,02
	AR2-2-U	1,6	3	5,47	2,20
	AR2-3-U	2,4	3	6,23	2,63
Kısa doğrultu	AR2-1-K	1	3	4,66	2,07
	AR2-2-K	1,6	3	4,52	1,88
	AR2-3-K	2,4	3	5,72	2,60

Yapılan testler sonucunda AR2-1-K numunelerinin ortalama eğilme dayanımı 4,66 MPa olarak bulunmuştur. AR2-1-K numunelerine ait 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği Şekil 3.135’te verilmiştir. AR2-1-U numunelerinin ortalama eğilme

dayanımı 5,19 MPa olarak bulunmuştur. AR2-1-U numunelerine ait 28 günlük dayanım gerilme-zaman grafiği Şekil 3.136’da verilmiştir. AR1 grubunda olduğu gibi uzun doğrultuda optik fiberlerin yerleştiği AR2 grubu numunelerinde de optik fiberlerin kopmamasından kaynaklı olarak maksimum eğilme dayanımına ulaştıktan sonra numunelerin eğilme dayanımları sıfır olmamıştır. AR2-2-K numunelerinin 28 günlük ortalama eğilme dayanımı 4,52 MPa, AR2-2-U numunelerinin ortalama eğilme dayanımı ise 5,47 MPa değerini almıştır. AR2-3-K numunelerinin ortalama eğilme dayanımı 5,72 MPa, AR2-3-U numunelerinin ortalama eğilme dayanımı ise 6,23 MPa değerini almıştır. AR2 grubu numunelerine ait tüm deney sonuçları Ek B’de, eğilme dayanımı-zaman grafikleri Ek C’de verilmiştir



Şekil 3.135 : AR2-1-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



Şekil 3.136 : AR2-1-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.

3.10.3.2 AR2 grubu 28 günlük basınç testi sonuçları

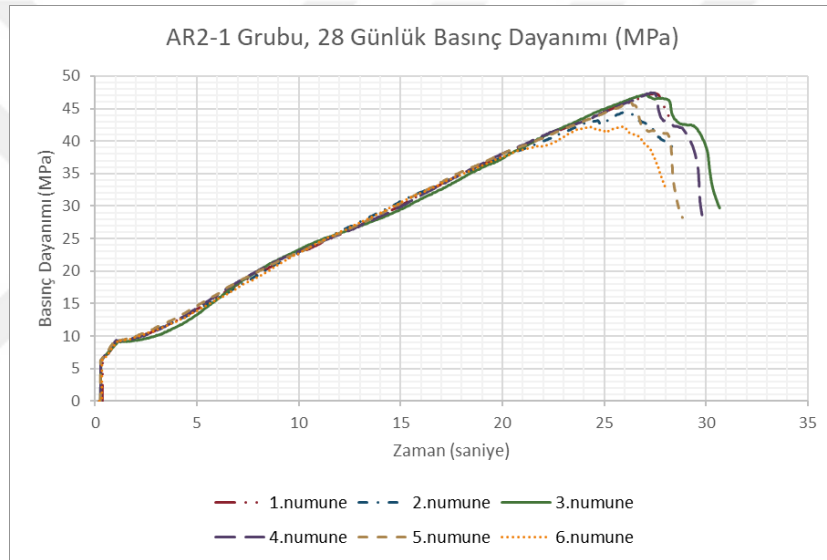
AR2 grubundan sırasıyla %1, %1,6 ve %2,4 oranında optik fiber içeren AR2-1, AR2-2 ve AR2-3 gruplarının 28 günlük ortalama basınç dayanımı sonuçları Çizelge 3.28’de

verilmiştir. AR2-1 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 46,16 MPa olarak hesaplanmıştır. AR2-2 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 45,24 MPa ve AR2-3 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 42,04 MPa olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.28 : AR2 grubu, 28 günlük basınç dayanım testi sonuçları.

Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
AR2-1	1	6	46,16	74,77
AR2-2	1,6	6	45,24	72,34
AR2-3	2,4	6	42,04	69,94

Yapılan AR2-1 grubu 28 günlük basınç deneylerine ait dayanım-zaman grafiği Şekil 3.137’de verilmiştir.



Şekil 3.137 : AR2-1 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.

3.10.3.3 AR2 grubu ışık geçirgenlik testi sonuçları

AR2 grubundan sırasıyla %1, %1,6 ve %2,4 oranında optik fiber içeren AR2-1, AR2-2 ve AR2-3 tipleri için üretilen 40 x 40 x 40 mm boyutlarındaki küp numunelerin ışık geçirgenlikleri ölçülmüştür. Lüksmetre cihazı ile ölçülen aydınlanma şiddeti değerleri lüks (lux) cinsinden okunarak kaydedilmiştir. Işık geçirgenliğini hesaplamak için TS EN ISO 13468-1:2019 (Plastikler- Saydam malzemelerin toplam ışık geçirgenliğinin tayini- Bölüm 1: Tek- Işın demetli cihaz) Standardında bulunan Denklem 3.2’de belirtilen formülden yararlanılmıştır. Ölçüm cihazından numuneye olan mesafe 10 cm ve 20 cm için okunan ortalama τ_2 ve τ_1 değerleri Çizelge 3.29’da verilmiştir. Çizelgedeki değerler, her numune tipi için 3 adet olmak üzere ölçülen değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.29 : AR2 grubu, ışık geçirgenlik testi sonuçları.

Ölçüm Cihazından Olan Mesafe	Numune tipi	Optik fiber oranı (%)	Numune sayısı	τ_2 (lux)	τ_t - ışık geçirgenliği (%)	τ_1 (lux)
10 cm	AR2-1	1	3	26,71	0,70	3801
	AR2-2	1,6	3	34,73	0,91	3801
	AR2-3	2,4	3	55,66	1,46	3801
20 cm	AR2-1	1	3	2,34	0,17	1353
	AR2-2	1,6	3	4,48	0,33	1353
	AR2-3	2,4	3	8,42	0,62	1353

3.10.4 PX grubu deney sonuçları

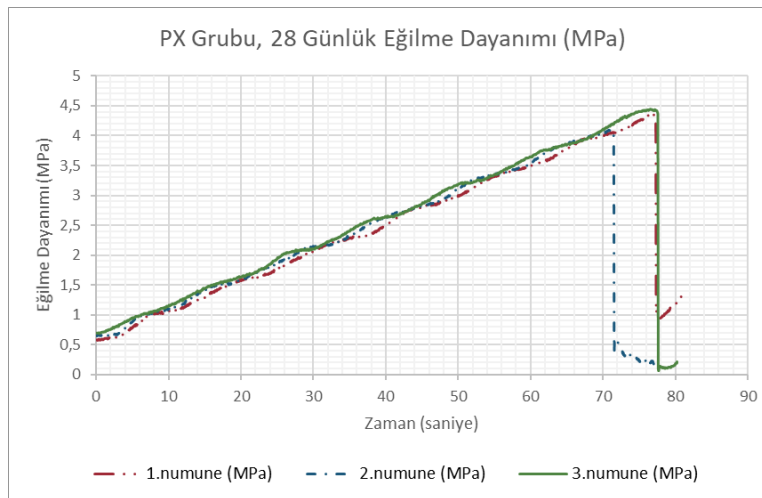
3.10.4.1 PX grubu 7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları

PX grubunun 7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları Çizelge 3.30’da verilmiştir.

Çizelge 3.30 : PX grubu, 7 ve 28 günlük eğilme dayanım testi sonuçları.

Numune tipi	Deney tipi	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
PX	7 günlük eğilme testi	3	2,88	1,23
PX	28 günlük eğilme testi	3	4,52	1,83

Deneyler için üçer adet üretilen numunelere 7. gün ve 28. gün uygulanan eğilme testleri sonucunda PX grubunun 7 günlük ortalama eğilme dayanımı 2,88 MPa, 28 günlük ortalama eğilme dayanımı 4,52 MPa olarak bulunmuştur. Yapılan eğilme deneylerine ait dayanım-zaman Şekil 3.138’de verilmiştir.



Şekil 3.138 : PX grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.

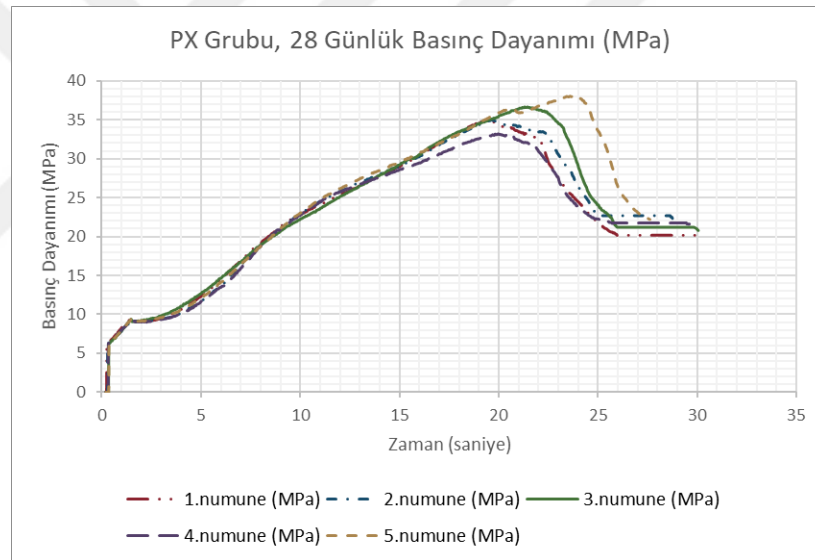
3.10.4.2 PX grubu 7 ve 28 günlük basınç testi sonuçları

Yapılan testler sonrası PX grubunun 7 günlük ortalama basınç dayanımı 31,92 MPa, 28 günlük ortalama basınç dayanımı 37,43 MPa olarak bulunmuştur. PX grubuna ait 7 ve 28 günlük basınç dayanım testi sonuçları Çizelge 3.31’de verilmiştir.

Çizelge 3.31 : PX grubu, basınç dayanım testi sonuçları.

Numune tipi	Deney tipi	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
PX	7 günlük basınç testi	6	31,92	51,07
PX	28 günlük basınç testi	6	37,43	56,90

Yapılan basınç dayanım deneylerine ait dayanım-zaman grafiği Şekil 3.139’da verilmiştir.



Şekil 3.139 : PX grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.

3.10.4.3 PX grubu ışık geçirgenlik testi sonuçları

PX grubu için üretilen 40 mm x 40 mm x 40 mm boyutlarındaki küp numunelerin ışık geçirgenlikleri ölçülmüştür. Lüksmetre cihazı ile ölçülen aydınlanma şiddeti değerleri lux birimi cinsinden okunarak kaydedilmiştir. Işık geçirgenliğini hesaplamak için TS EN ISO 13468-1:2019 (Plastikler- Saydam malzemelerin toplam ışık geçirgenliğinin tayini- Bölüm 1: Tek- Işın demetli cihaz) Standardında bulunan Denklem 3.2’de belirtilen formülden yararlanılmıştır. Ölçüm cihazından numuneye olan mesafe 10 cm ve 20 cm için okunan ortalama τ_2 ve τ_1 değerleri Çizelge 3.32’de verilmiştir. Çizelgedeki τ_2 değerleri 3 adet numune için ölçülen değerlerin ortalaması alınarak

hesaplanmıştır. Yapılan ışık geçirgenlik testi düzeneğine ait görünüm Şekil 3.140'ta verilmiştir.

Çizelge 3.32 : PX grubu, ışık geçirgenlik testi sonuçları.

Ölçüm cihazından olan mesafe	Numune tipi	Lif oranı (%)	Numune sayısı	τ_2 (lüks)	τ_t - ışık geçirgenliği (%)	τ_1 (lüks)
10 cm	PX	4,6	3	148,40	3,90	3801
20 cm	PX	4,6	3	24,62	1,82	1353

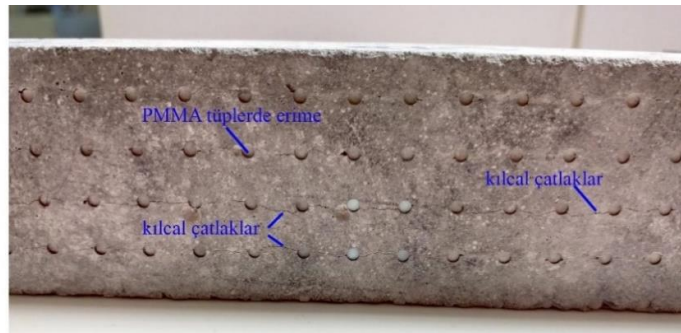


Şekil 3.140 : PX grubu, ışık geçirgenlik testi düzeneği.

3.10.4.4 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası deney sonuçları

PX grubu, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası deney sonuçları

PX grubu numunelerinin ıslanma-kuruma çevrimleri uygulandıktan sonra ağırlık ve boy değişimlerine bakılmış, basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Numunelerde boy değişimi gözlenmemiştir. Numunelere ıslanma-kuruma çevrimleri uygulanırken kuruma çevriminden etkilendiği ve numune yüzeylerinde kılcal çatlaklar oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Numunelere uygulanan 50 çevrim sonrasında betonda çatlak oluşumu ve PMMA tüp yüzeylerinde erime olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.141). Betondaki çatlamların yatay ve düşey yönlerde şeffaf tüp doğrultularında oldukları tespit edilmiştir (Şekil 3.142).



Şekil 3.141 : PMMA tüp yüzeyinde görülen erime ve betondaki kılcal çatlaklar.



Şekil 3.142 : PMMA tüp doğrultularında yatay ve düşey yönde oluşan çatlaklar.

Eğilme dayanımını belirlemek için 3 adet numuneye ve basınç dayanımı için ise 6 adet numuneye test yapılmıştır. Islanma-kuruma etkisi uygulandıktan sonra numunelere yapılan basınç dayanım testi sonucu Çizelge 3.33'te ve eğilme dayanım testi sonucu Çizelge 3.34'te verilmiştir. Numuneye dayanım testi yapıldıktan sonra iç yüzeyine ait görünüm Şekil 3.143'te verilmiştir. Görselde beton içerisinde PMMA tüplerin yerleştiği izler görülmektedir.

Çizelge 3.33 : PX grubu, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanım testi sonucu.

Numune tipi	Lif oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
PX	4,6	6	29,41	45,90

Çizelge 3.34 : PX grubu, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası eğilme dayanım testi sonucu.

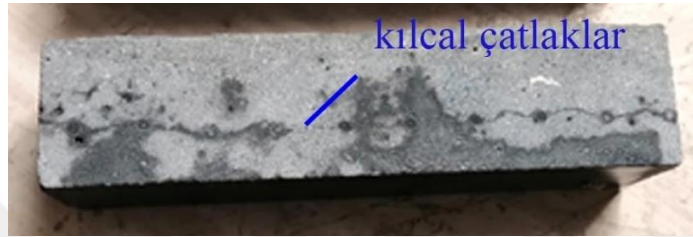
Numune tipi	Lif oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
PX	4,6	6	1,96	0,80



Şekil 3.143 : Islanma-kuruma çevrimleri sonrası test yapılan numunenin iç yüzeyine ait görünüm.

PX grubu, donma-çözülme çevrimleri sonrası deney sonuçları

PX grubu numunelerine donma-çözülme çevrimleri uygulandıktan sonra numunelerin boy ve ağırlık ölçümleri yapılmış, basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrimleri sonrasında numunelerde boy değişimi gözlenmemiştir. Ayrıca numune üst yüzeylerinde PMMA tüpler arasında çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Ancak PMMA ünitelerin bağlantısını sağlayan kısımda kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir (Şekil 3.144). Donma-çözülme çevrimleri uygulandıktan sonrası numune görünüşleri Şekil 3.145'te verilmiştir.



Şekil 3.144 : Numunede donma-çözülme çevrimleri sonrası oluşan çatlak.



Şekil 3.145 : Numunelerin donma-çözülme çevrimleri sonrası görünüşleri.

Donma-çözülme çevrimleri sonrası yapılan basınç dayanım testinin sonucu Çizelge 3.35'te ve eğilme dayanım testinin sonucu Çizelge 3.36'da verilmiştir. Numunelerin basınç dayanımı 49,89 MPa, eğilme dayanımı ise 3,27 MPa bulunmuştur.

Çizelge 3.35 : PX grubu, donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanım testi sonucu.

Numune tipi	Lif oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
PX	4,6	6	33,10	49,89

Çizelge 3.36 : PX grubu, donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanım testi sonucu.

Numune tipi	Lif oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
PX	4,6	3	3,27	1,28

PX grubu yüksek sıcaklık etkisi sonrası deney sonuçları

PX grubu numunelerine 150 °C sıcaklık uygulandıktan sonra dayanımlarının ve ışık geçirgenliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sıcaklık etkisi uygulanmadan önce ve sonra numunelerin ışık geçirgenlik değerleri ölçülmüştür. Böylelikle yüksek sıcaklığın numunenin ışık geçirgenliğine bir etkisi olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Yüksek sıcaklık deneyi uygulanmadan önceki ve sonraki durum için ölçülen ışık geçirgenlik değerleri Çizelge 3.37’de verilmiştir. Yapılan deneyde numuneler ve ölçüm cihazı arası mesafe 10 cm olup kullanılan ampulün gücü 82 Watt’tır. Çizelgedeki τ_2 numuneden geçen ışık miktarını, τ_1 toplam ışık geçirgenliğini (%) göstermektedir. Numune yokken ölçüm cihazına düşen ışık miktarı ise 5111 lüks (lux)’tür.

Çizelge 3.37 : PX grubu, yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası ışık geçirgenlik testi sonuçları.

Yüksek sıcaklık etkisi	Numune tipi	Lif oranı (%)	Numune sayısı	τ_2 (lüks)	τ_1 -ışık geçirgenliği (%)
Önce	PX	4,6	3	99,35	1,94
Sonra	PX	4,6	3	62,50	1,22

Yüksek sıcaklık deneyi uygulanmadan önce numunelerin ölçülen ışık geçirgenlik değeri %1,94’tür. Yüksek sıcaklık deneyi uygulandıktan ve numuneler 24 saat havada soğumaya bırakıldıktan sonra ölçülen ışık geçirgenlik değeri ise %1,22’dir. Yapılan deneye ait görünüm Şekil 3.146’da verilmiştir.



Şekil 3.146 : Yüksek sıcaklık sonrası uygulanan ışık geçirgenliği testi.

PX grubundan 3 adet numuneye yüksek sıcaklık deneyi uygulandıktan sonra numunelerin eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Deney sonrasında belirlenen ortalama eğilme ve basınç dayanımları Çizelge 3.38 ve Çizelge 3.39’da verilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası PX grubu numunelerinin ortalama basınç dayanımı 32,88 MPa ve ortalama eğilme dayanımı 2,20 MPa olarak bulunmuştur. Yaşlandırma etkileri sonrası PX grubu numunelerinin dayanım testleri ile ilgili sonuçlar Ek B’de ve grafikler Ek C’de verilmiştir.

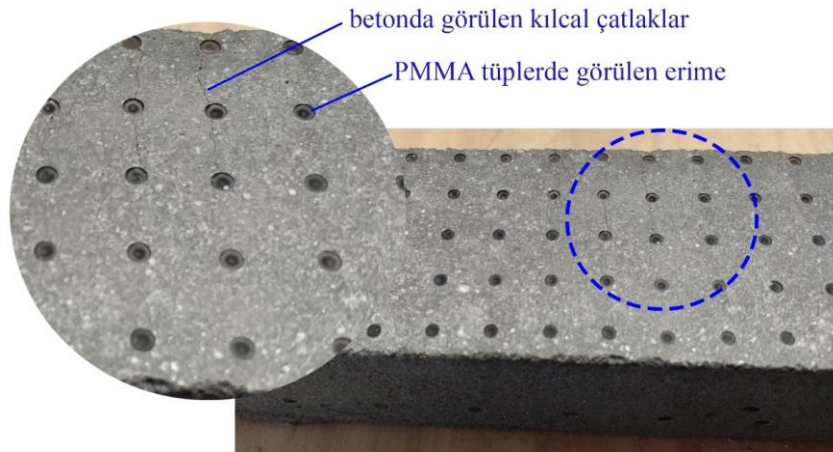
Çizelge 3.38 : PX grubu, yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım testi sonucu.

Numune tipi	Lif oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Basınç kuvveti (kN)
PX	4,6	6	32,88	52,60

Çizelge 3.39 : PX grubu, yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım testi sonucu.

Numune tipi	Lif oranı (%)	Numune sayısı	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme (kN)
PX	4,6	3	2,20	0,95

Yüksek sıcaklık deneyi uygulandıktan sonra numunelerde PMMA tüpler arasında betonda kılcal çatlaklar oluştuğu ve tüplerde erime olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.147).



Şekil 3.147 : Yüksek sıcaklık sonrası PMMA tüplerde erime ve betonda oluşan çatlaklar.

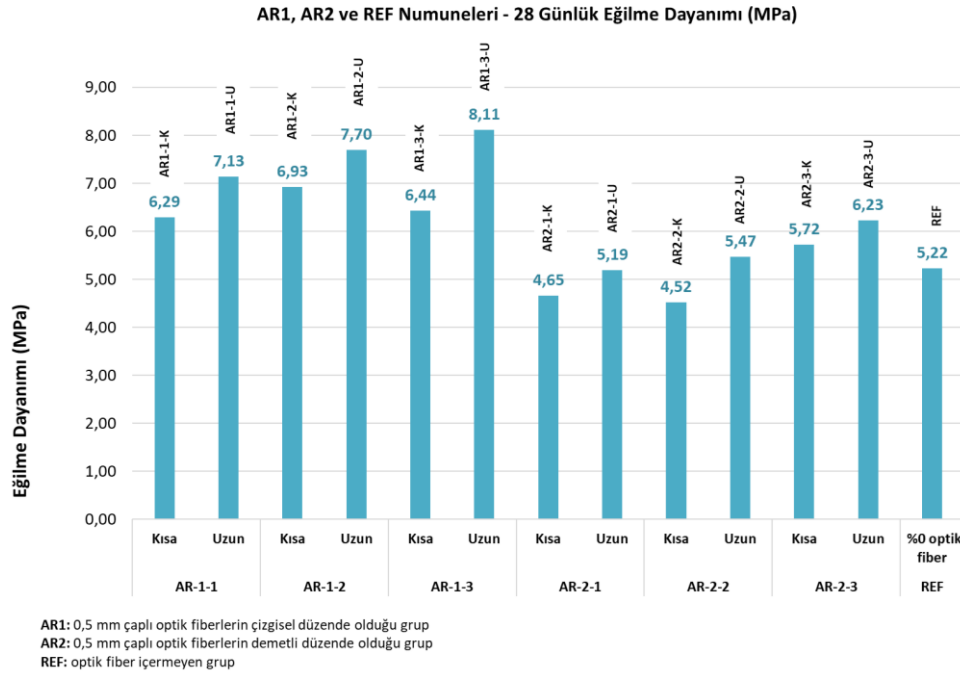
4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 REF, AR1 ve AR2 Grubu 28 Günlük Dayanımlarının Karşılaştırılması

Optik fiber içermeyen REF grubu, çizgisel düzende optik fiber içeren AR1 grubu, dörtlü optik fiber demeti düzenine sahip olan AR2 grubunun 28 günlük dayanımları karşılaştırılmıştır.

4.1.1 Eğilme dayanımı

Karşılaştırması yapılan REF, AR1 ve AR2 numuneleri kullanılan beton karışımı ve numune boyutları bakımından aynı özellikleri taşımaktadır. Optik fiber içeren AR1 ve AR2 grubu numuneleri optik fiber yüzdesi bakımından aynı özelliklere sahiptir ancak optik fiber düzeni bakımından farklılık göstermektedir. AR1 ve AR2 gruplarında her numune tipinin eğilme dayanımı belirlenirken, numune içerisine uzun ve kısa doğrultularda yerleştirilen optik fiberlerin dayanıma etkisi olup olmadığı da araştırılmıştır. Numunelerin 28 günlük ortalama eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.1’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1 : AR1, AR2 ve REF gruplarının 28 günlük eğilme dayanımları.

Optik fiber içermeyen REF grubunun 28 günlük ortalama eğilme dayanımı 5,22 MPa'dır. REF grubunun eğilme dayanımıyla (5,22 MPa) kıyaslandığında optik fiberlerin kısa doğrultuda yerleştirildiği AR1-1-K numunesinde 28 günlük ortalama eğilme dayanımının %20,50 daha fazla, AR1-2-K numunesinde %32,76 fazla, AR1-3-K numunesinde %23,37 fazla, AR2-1-K numunesinde %10,73 az, AR2-2-K numunesinde %13,41 az ve AR2-3-K numunesinde % 9,58 daha fazla olduğu sonucu çıkarılmıştır. Optik fiberlerin uzun doğrultuda yerleştirildiği AR1 ve AR2 gruplarının 28 günlük eğilme dayanımları, REF grubu numunelerinin eğilme dayanımına (5,22 MPa) göre kıyaslandığında; AR1-1-U numunesinde eğilme dayanımının %36,59 daha fazla, AR1-2-U numunesinde %47,51 fazla, AR1-3-U numunesinde %55,36 fazla, AR2-1-U numunesinde %0,57 az, AR2-2-U numunesinde %4,79 fazla ve AR2-3-U numunesinde %19,35 daha fazla olduğu sonucu çıkarılmıştır.

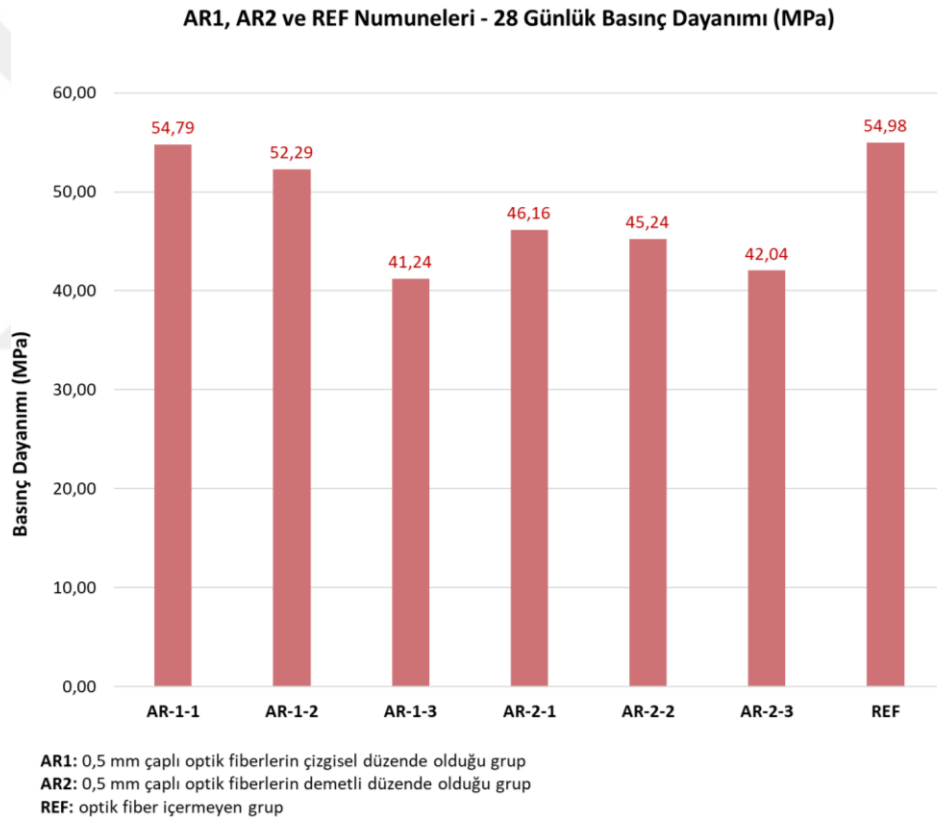
Sonuç olarak AR1 grubunda uzun doğrultuda optik fiber yerleştirilen numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarının kısa doğrultuda optik fiber yerleştirilen numunelere göre ortalama %16,80 daha fazla olduğu bulunmuştur. AR2 grubunda ise uzun doğrultuda optik fiber yerleştirilen numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarının kısa doğrultuda optik fiber yerleştirilen numunelere göre ortalama %13,76 daha fazla olduğu bulunmuştur. Optik fiberler uzun doğrultuda numune içersine yerleştirildiğinde betonun eğilme dayanımına katkı sağlamaktadır. Ancak optik fiberler pürüzsüz bir yapıya sahip olduğundan eğilme yükü etkisiyle betondan sıyrılabilir. Uzun doğrultuda optik fiberlerin yerleştiği numunelerde eğilme deneyleri sırasında eğilme yüküyle birlikte betonun kırıldığı ancak optik fiberlerin kopmadığı görülmüştür. Dayanım-zaman grafiklerinde bu yüzden AR1 (U) ve AR2 (U) gruplarının eğilme dayanımlarının maksimum eğilme değerine ulaştıktan sonra sıfır olmadığı görülmektedir.

Optik fiberlerin çizgisel düzende ve kısa doğrultuda yerleştirildiği AR1 grubu (K) numunelerinin eğilme dayanımlarının AR2 grubuna göre ortalama %33,63 daha fazla olduğu bulunmuştur. Optik fiberlerin uzun doğrultuda yerleştirildiği AR1 grubu (U) numunelerinin eğilme dayanımlarının AR2 grubuna göre ortalama %36,11 daha fazla olduğu bulunmuştur. Bunun sebebinin AR2 grubunda uygulanan dörtlü optik fiber düzeninde iki optik fiber arası en az mesafenin 1,5 mm olmasından, AR1 grubunda ise

en az 2,3 mm olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Optik fiberler arası mesafenin sık olması numunelerin eğilme dayanımlarını azaltmaktadır.

4.1.2 Basınç dayanımı

Karşılaştırması yapılan AR1, AR2 ve REF grup numuneleri, kullanılan beton karışımı ve numune boyutları bakımından aynı özellikleri taşımaktadır. Optik fiber içeren AR1 ve AR2 grubu numuneleri optik fiber yüzdeleri bakımından aynı özelliklere sahiptir ancak optik fiber düzeni bakımından farklılık göstermektedir. Basınç dayanımları incelenen numunelerin şeklinin küp olması nedeniyle optik fiberlerde doğrultu farklılığı söz konusu değildir. Numunelerin 28 günlük ortalama basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.2’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.2 : AR1, AR2 ve REF grupları 28 günlük basınç dayanımları.

28 günlük ortalama basınç dayanımı AR1-2 numunesi için 52,29 MPa, AR1-3 numunesi için 41,24 MPa, AR2-1 numunesi için 46,16 MPa, AR2-2 numunesi için 45,24 MPa ve AR2-3 numunesi için 42,04 MPa’dır. AR1 grubu numunelerinin ortalama basınç dayanımlarının AR2 grubunun ortalama basınç dayanımlarına göre %11 daha fazla olduğu sonucu çıkarılmıştır. Bunun sebebinin optik fiberlerin birbirleriyle olan mesafeleriyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. AR1 grubunda optik

fiberler arası en az mesafe 2,3 mm, AR2 grubunda ise en az 1,5 mm'dir. Optik fiberlerin sık yerleştirilmesinin beton dağılımının homojenliğine olumsuz etkisi olduğu ve AR2 grubu numunelerinin basınç dayanımlarında daha az bir değer elde edilmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

Optik fiber oranı arttıkça AR1 ve AR2 grubu numunelerinin basınç dayanımlarında %25'e varan azalmalar olmuştur. AR1-3 ve AR2-3 numuneleri en fazla optik fiber oranına (%2,4) ve en az basınç dayanımına sahip numune gruplarıdır. AR1-3 grubunun basınç dayanımı AR1-1 grubuna göre kıyaslandığında %25 azalma olmuştur. AR2-3 grubunun basınç dayanımı AR2-1 grubuna göre kıyaslandığında, optik fiber oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımlarında %9 azalma olmuştur.

%1 optik fiber oranına sahip AR1-1 numunelerinin basınç dayanımının (54,79 MPa) optik fiber içermeyen REF grup numunelerinin basınç dayanımının (54,98 MPa) birbirine çok yakın değerler aldığı grafikte görülmektedir. AR1 grubu ve AR2 grubunun basınç dayanımları, optik fiber içermeyen REF grubu numunelerinin basınç dayanımına göre (54,98 MPa) kıyaslandığında; AR1-1 numunesinin %0,33, AR1-2 numunesinin %4,89, AR1-3 numunesinin %24,99, AR2-1 numunesinin %16,04, AR2-2 numunesinin %17,72, AR2-3 numunesinin %23,54 daha az olduğu görülmüştür. Optik fiber içermeyen REF grubu en yüksek basınç dayanım değerine sahiptir. Optik fiber içeren numunelerin basınç dayanımlarında optik fiber oranındaki artışa bağlı olarak %25'e varan azalmalar olmuştur.

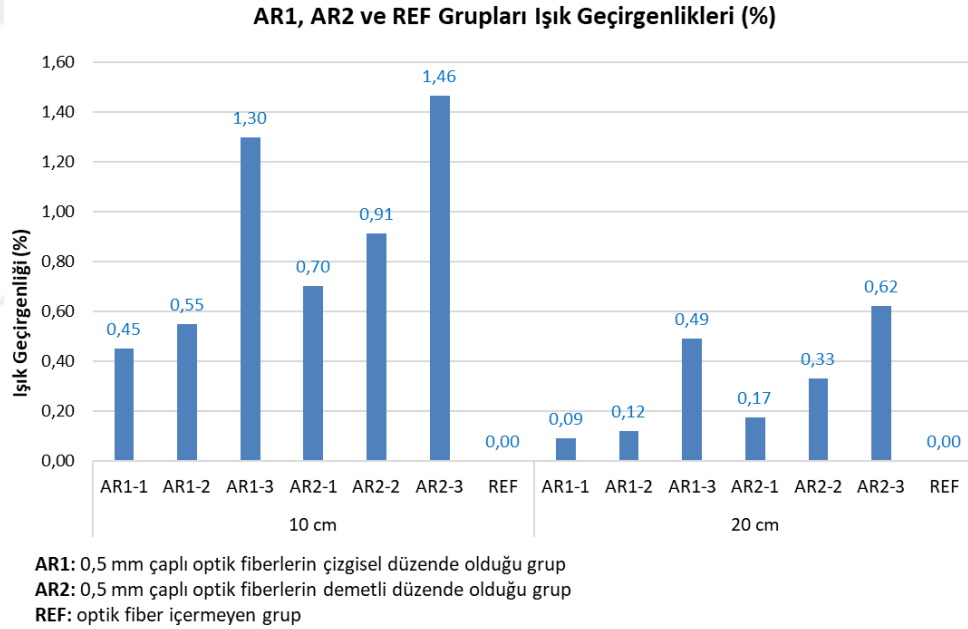
4.2 REF, AR1 ve AR2 Grubu Işık Geçirgenliklerinin Karşılaştırılması

REF, AR1 ve AR2 grubu numunelerinin ışık geçirgenlikleri, numuneden ölçüm cihazına olan mesafe 10 cm ve 20 cm olan durumlar için belirlenmiştir. Optik fiber oranları; AR1-1 ve AR2-1 numunelerinde %1, AR1-2 ve AR2-2 numunelerinde %1,6, AR1-3 ve AR2-3 numunelerinde %2,4'tür. AR1, AR2 ve REF numune gruplarının ışık geçirgenlikleri (%) Şekil 4.3'te karşılaştırılmıştır. REF grubu optik fiber içermediğinden ışık geçirgenlik özelliği bulunmamaktadır.

Şekil 4.3'te verilen sütun grafikte AR2 grubunun ışık geçirgenlik değerlerinin her iki ölçüm mesafesi için de AR1 grubundan fazla olduğu görülmektedir. 10 cm için AR1-1 grubu değerlerinin %AR2-1 grubuna göre %35 daha az, AR1-2 grubunun %AR2-2

grubuna göre %39 daha az, AR1-3 grubunun AR2-3'e göre %10 daha az olduğu bulunmuştur. 20 cm için AR1-1 grubu numunelerinin AR2-1 grubuna göre %47 daha az, AR1-2 grubunun AR2-2 grubuna göre %64 daha az, AR1-3 grubunun AR2-3 grubu numunelerine göre %21 daha az ışık geçirgenliğine sahip olduğu bulunmuştur. AR2 grubunun ışık geçirgenliklerinin AR1 grubundan fazla olmasının sebebinin optik fiberlerin AR2 grubunda birbirlerine daha yakın mesafelerde bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Numuneler içerisindeki optik fiber oranları arttıkça ışık geçirgenlik değerleri artmaktadır. En fazla optik fiber oranına (%2,4) sahip olan AR1-3 ve AR2-3 grupları en fazla ışık geçirgenlik değerlerine sahiptir. En düşük optik fiber oranına (%1) sahip olan AR1-1 ve AR2-1 numuneleri de en düşük ışık geçirgenlik değerlerine sahiptir.



Şekil 4.3 : AR1, AR2 ve REF gruplarının ışık geçirgenliklerinin (%) karşılaştırılması.

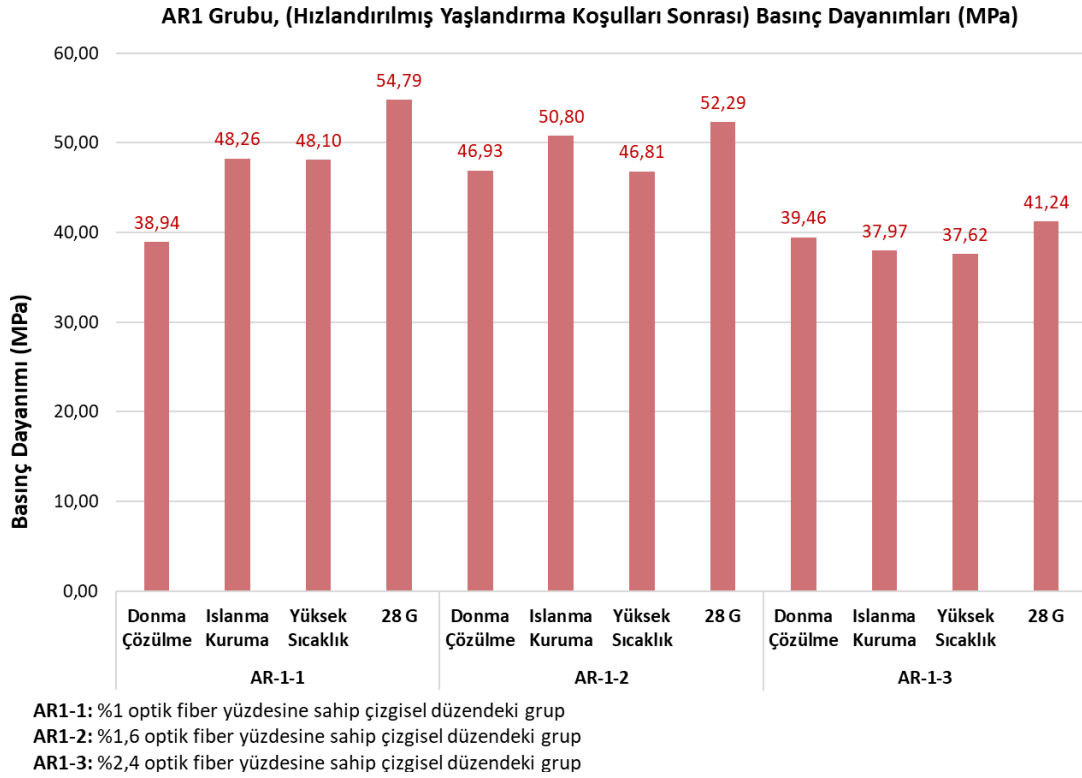
Numune ve ölçüm cihazı arasındaki mesafe arttıkça belirlenen ışık geçirgenlik değerlerinde %80'e varan düşüşler olduğu görülmüştür. 10 cm'de belirlenen ışık geçirgenlikleri AR1-1 için %0,45, AR1-2 için %0,55, AR1-3 için %1,30, AR2-1 için %0,70, AR2-2 için %0,91 ve AR2-3 için %1,46 değerini almıştır. 20 cm'de belirlenen ışık geçirgenlikleri AR1-1 için %0,09, AR1-2 için %0,12, AR1-3 için %0,49 AR2-1 için %0,17, AR2-2 için %0,33 ve AR2-3 için %0,62 değerini almıştır. Ölçüm cihazı ve numune arası mesafe 10 cm'den 20 cm'e çıkarıldığında ışık geçirgenlik değerlerinde AR1-1 numune grubunda %80 azalma, AR1-2 grubunda %78 azalma,

AR1-3 grubunda %62 azalma, AR2-1 grubunda %75 azalma, AR2-2 grubunda %63 azalma, AR2-3 grubunda %57 azalma olduğu bulunmuştur.

4.3 Hızlandırılmış Yaşlandırma Koşullarının AR1 Grubu Özelliklerine Etkisi

4.3.1 Dayanıma etkisi

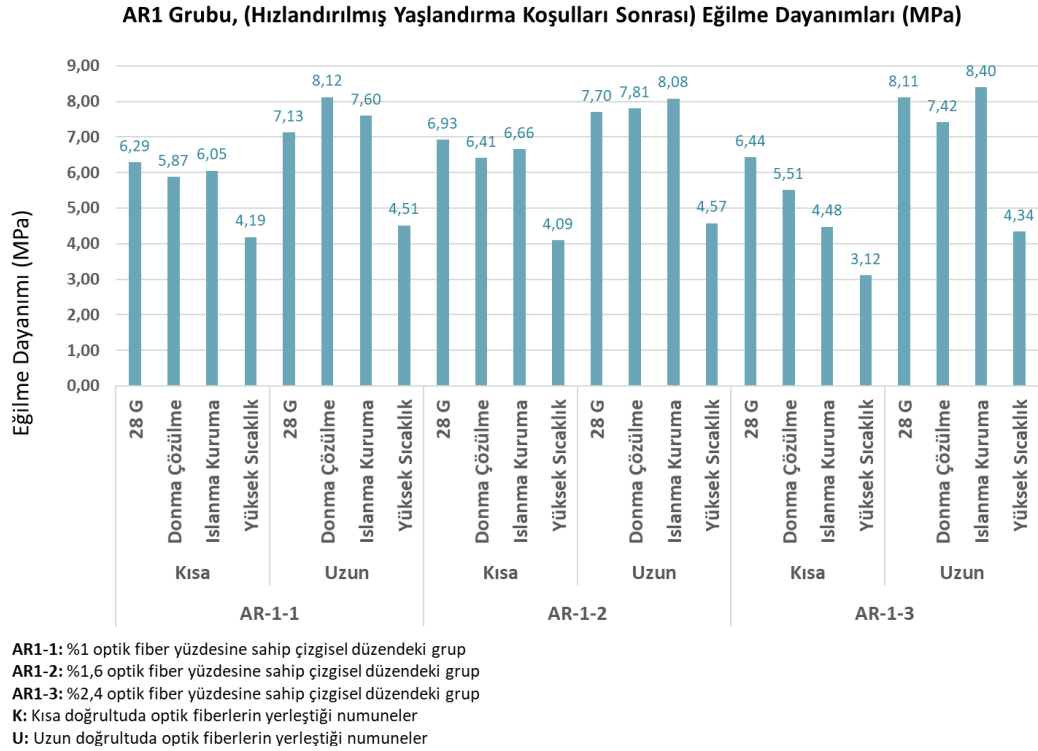
Optik fiber içeren ışık geçiren betonun (AR1 grubu) ıslanma-kuruma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme ve basınç dayanımlarındaki değişim incelenmiştir. AR1 grubu numunelerinin hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrasında basınç ve eğilme dayanımları belirlenerek 28 günlük dayanımlarıyla kıyaslaması yapılmıştır. Kıyaslanan basınç dayanımlarına ait sütun grafik Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : AR1 grubu, hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının numunelerin basınç dayanımına etkisi.

AR1-1 grubu numunelerinin 28 günlük basınç dayanımıyla kıyaslandığında donma-çözülme etkisiyle numunelerin ortalama basınç dayanımında %28,93 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %11,92 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %12,21 azalma olduğu bulunmuştur. AR1-2 grubu numunelerinin 28 günlük basınç dayanımıyla kıyaslandığında donma-çözülme etkisiyle numunelerin ortalama basınç dayanımında

%10,25 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %2,85 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %10,48 azalma olduğu bulunmuştur. AR1-3 grubu numunelerinin 28 günlük basınç dayanımıyla kıyaslandığında donma-çözülme etkisiyle numunelerin ortalama basınç dayanımında %4,32 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %7,93 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %8,78 azalma olduğu bulunmuştur. AR1 grubu numunelerinin basınç dayanımlarında donma-çözülme etkisiyle %4-29 arasında azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %2-12 arasında azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %8-12 arasında azalma olmuştur. Uygulanan koşullar sonrasında numunelerin basınç dayanımları birbirlerine yakın değerler almıştır. Örneğin, AR1-1 grubu için ıslanma-kuruma sonrası belirlenen ortalama basınç dayanımı 48,26 MPa, yüksek sıcaklık sonrası belirlenen ortalama basınç dayanımı 48,10 MPa'dır. Numunelerin basınç dayanımlarına bakıldığında en fazla düşüşün AR1-1 grubundaki numunelerde donma-çözülme etkisiyle, AR1-2 ve AR1-3 grubunda ise yüksek sıcaklık etkisiyle olduğu görülmektedir. Bu yüzden elde edilen verilerle hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrasında numunelerin basınç dayanımının, uygulanan koşullar ve optik fiber oranı ile ilişkisi net olarak belirlenememiştir. AR1 grubu numunelerinin hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası eğilme dayanımları ve 28 günlük dayanımlarının karşılaştırılması ise Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 : AR1 grubu, hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının numunelerin eğilme dayanımına etkisi.

Şekil 4.5’de verilen sütun grafikte 28 günlük eğilme dayanımıyla kıyaslandığında AR1-1-K numuneleri için donma-çözülme etkisiyle numunelerin eğilme dayanımında %6,68 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %3,82 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %33,39 azalma olduğu bulunmuştur. AR1-1-U numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı ile kıyaslandığında donma-çözülme etkisi sonrası AR1-1-U numunelerinin eğilme dayanımında %13,88 artış, ıslanma-kuruma etkisi sonrası %6,59 artış, yüksek sıcaklık etkisiyle %36,75 azalma olduğu bulunmuştur. AR1-2-K numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımıyla kıyaslandığında donma-çözülme etkisi sonrası AR1-2-K numunelerinin eğilme dayanımında %7,50 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %3,90 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %40,98 azalma olduğu görülmüştür. AR1-2-U numuneleri için 28 günlük eğilme dayanımıyla kıyaslandığında donma-çözülme etkisi sonrası numunelerin eğilme dayanımında %1,43 artış, ıslanma-kuruma etkisi sonrası %4,94 artış, yüksek sıcaklık etkisiyle %40,65 azalma olduğu bulunmuştur. AR1-3-K numuneleri için 28 günlük eğilme dayanımıyla kıyaslandığında donma-çözülme etkisi sonrası numunelerin ortalama eğilme dayanımında %14,44 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %30,43 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %51,55 azalma olduğu görülmüştür. AR1-3-U numuneleri için 28 günlük eğilme dayanımıyla kıyaslandığında donma-çözülme etkisi sonrası numunelerin ortalama eğilme dayanımında %8,51 azalma, ıslanma-kuruma etkisi sonrası %3,58 artış, yüksek sıcaklık etkisiyle %46,69 azalma olduğu bulunmuştur.

Sonuçlar değerlendirildiğinde uzun doğrultuda optik fiberlerin yerleştiği numunelerin donma-çözülme ve ıslanma-kuruma çevrimlerinden olumsuz etkilenmediği ancak yüksek sıcaklık etkisiyle numunelerin eğilme dayanımının %47’ye kadar düştüğü sonucu çıkarılmıştır. Optik fiberlerin uzun doğrultuda yerleşmesinin numunelerin eğilme dayanımına olumlu etkisi olduğu ancak yüksek sıcaklık etkisiyle numune içerisindeki optik fiberlerin erimesiyle bu etkisini kaybettiği düşünülmüştür. Kısa doğrultuda optik fiber yerleşen numune gruplarının sonuçları incelendiğinde, donma-çözülme etkisiyle numunelerin eğilme dayanımlarında %6-14 arasında azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %4-%30 arasında azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %33-52 arasında azalma olduğu bulunmuştur. Kısa doğrultuda optik fiber yerleşen numunelerin eğilme dayanımlarında da en fazla düşüş yüksek sıcaklık etkisiyle olmuştur. Bu sebeple, ışık geçiren beton numunelerinin eğilme dayanımlarında sıcaklık etkisinin önemli bir parametre olduğu sonucu çıkarılmıştır.

4.3.2 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası ağırlık ve boy değişimleri

AR1 grubu numunelerinin yaşlandırma etkileri uygulanmadan önce ve sonra boy ve ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Yaşlandırma koşulları sonrasında numunelerin boylarında bir değişim olmamıştır. Kısa doğrultuda optik fiber yerleşen AR1 grubu numunelerine ait değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : AR1 grubu, ağırlık ölçümleri (K: kısa doğrultu).

Kısa doğrultuda optik fiber yerleşen gruplarda			Kütle (gr)		
		Numune	Önce	Sonra	Fark
Yüksek sıcaklık etkisi	AR1-1-K	1.numune	504,51	497,93	-6,58
		2.numune	528,09	518,99	-9,10
		3.numune	495,44	485,72	-9,72
	AR1-2-K	1.numune	490,99	482,47	-8,52
		2.numune	497,84	487,71	-10,13
		3.numune	496,21	485,68	-10,53
	AR1-3-K	1.numune	514,80	502,28	-12,52
		2.numune	517,00	505,04	-11,96
		3.numune	517,56	507,25	-10,31
Donma çözülme etkisi	AR1-1-K	1.numune	527,97	536,99	+9,02
		2.numune	529,85	536,98	+7,13
		3.numune	529,37	541,50	+12,13
	AR1-2-K	1.numune	497,10	505,41	+8,31
		2.numune	502,21	510,66	+8,45
		3.numune	497,76	504,92	+7,16
	AR1-3-K	1.numune	513,58	516,13	+2,55
		2.numune	519,40	519,63	+0,23
		3.numune	530,24	534,85	+4,61
Islanma kuruma etkisi	AR1-1-K	1.numune	523,58	543,47	+19,89
		2.numune	538,54	556,22	+17,68
		3.numune	529,09	548,90	+19,81
	AR1-2-K	1.numune	495,40	512,10	+16,70
		2.numune	505,13	519,24	+14,11
		3.numune	505,29	512,05	+6,76
	AR1-3-K	1.numune	514,65	534,74	+20,09
		2.numune	514,11	531,50	+17,39
		3.numune	515,35	533,38	+18,03

Numunelerin ağırlıklarında yüksek sıcaklık sonrasında azalma, donma-çözülme ve ıslanma-kuruma etkileri sonrasında artış görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası AR1-1-K numuneleri ağırlıklarında ortalama 8,47 gr azalma, AR1-2-K numunelerinde ortalama 9,73 gr azalma ve AR1-3-K numunelerinde ortalama 11,60 gr azalma olmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası AR1 grubu (K: kısa doğrultu) numunelerinin ağırlıklarındaki bu azalma %1,66-2,25 arasındadır. Donma-çözülme

etkisi sonrası AR1-1-K numune ağırlıklarında ortalama 9,43 gr artış, AR1-2-K numunelerinde ortalama 7,97 gr artış ve AR1-3-K numunelerinde ortalama 2,46 gr artış olmuştur. Donma-çözülme etkisi sonrası AR1 (K) grubu numunelerinin ağırlıklarındaki bu artış %0,47-1,78 arasındadır. Islanma-kuruma etkisi sonrası AR1-1-K numuneleri ağırlıklarında ortalama 19,13 gr artış, AR1-2-K numunelerinde ortalama 12,52 gr artış ve AR1-3-K numunelerinde ortalama 18,50 gr artış olmuştur. Islanma-kuruma etkisi sonrası AR1 (K) grubu numunelerinin ağırlıklarındaki bu artış %2,50-3,61 arasındadır.

Uzun doğrultuda optik fiber yerleşen AR1 grubu numunelerine ait değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

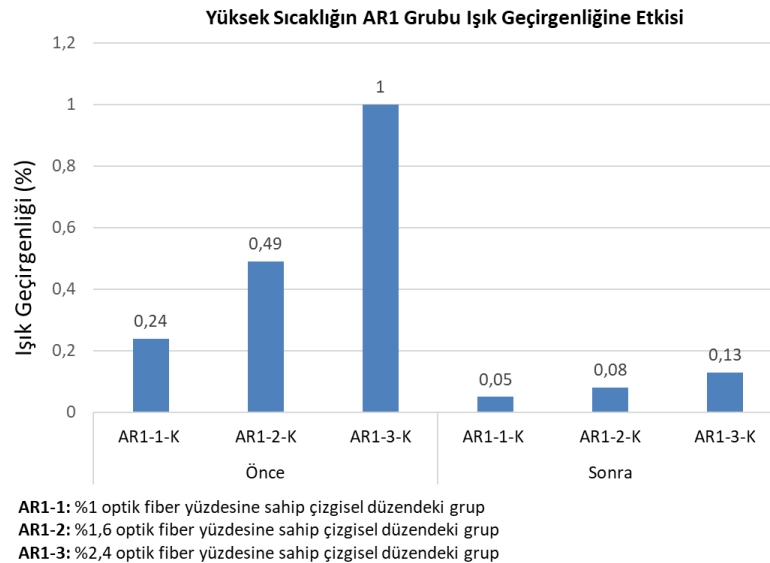
Çizelge 4.2 : AR1 grubu, ağırlık ölçümleri (U: uzun doğrultu).

Uzun doğrultuda optik fiber yerleşen gruplarda		Kütle (gr)			
		Numune	Önce	Sonra	Fark
Yüksek sıcaklık etkisi	AR1-1-U	1.numune	499,39	491,64	-7,75
		2.numune	510,54	500,25	-10,29
		3.numune	517,68	510,35	-7,33
	AR1-2-U	1.numune	523,86	517,10	-6,76
		2.numune	525,19	517,57	-7,62
		3.numune	521,90	514,40	-7,50
	AR1-3-U	1.numune	518,48	507,64	-10,84
		2.numune	516,52	505,37	-11,15
		3.numune	521,21	507,03	-14,18
Donma çözülme etkisi	AR1-1-U	1.numune	520,80	523,47	+2,67
		2.numune	517,74	518,30	+0,56
		3.numune	509,60	511,04	+1,44
	AR1-2-U	1.numune	502,04	511,38	+9,34
		2.numune	532,20	540,88	+8,68
		3.numune	537,31	547,21	+9,90
	AR1-3-U	1.numune	541,79	545,27	+3,48
		2.numune	530,64	530,36	+0,28
		3.numune	531,05	535,76	+4,71
Islanma kuruma etkisi	AR1-1-U	1.numune	516,30	523,00	+6,70
		2.numune	507,31	505,19	-2,12
		3.numune	513,50	513,53	+0,03
	AR1-2-U	1.numune	485,31	502,24	+16,93
		2.numune	501,40	512,26	+10,86
		3.numune	521,38	531,50	+10,12
	AR1-3-U	1.numune	531,21	545,40	+14,19
		2.numune	535,91	544,11	+8,20
		3.numune	535,80	542,31	+6,51

Yüksek sıcaklık etkisi sonrası AR1-1-U numuneleri ağırlıklarında ortalama 8,46 gr, AR1-2-U numunelerinde ortalama 7,29 gr azalma ve AR1-3-U numunelerinde ortalama 12,06 gr azalma olmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası AR1 grubu (U: uzun doğrultu) numunelerinin ağırlıklarındaki bu azalma %1,39-2,32 arasındadır. Donma-çözülme etkisi AR1-1-U numune ağırlıklarında ortalama 1,56 gr, AR1-2-U numunelerinde ortalama 9,31 gr ve AR1-3-U numuneleri ağırlıklarında ortalama 2,82 gr artış olmuştur. Donma-çözülme etkisi sonrası AR1 (U) grubu numunelerinin ağırlıklarındaki bu artış %0,30-1,78 arasındadır. Isıanma-kuruma etkisi sonrası AR1-1-U numuneleri ağırlıklarında ortalama 1,54 gr artış, AR1-2-U numunelerinde ortalama 12,64 gr artış ve AR1-3-U numuneleri ağırlıklarında ortalama 9,63 gr artış olmuştur. Isıanma-kuruma etkisi sonrası AR1 (U) grubu numunelerinin ağırlıklarındaki bu artış %0,30-2,53 arasındadır. Yüksek sıcaklık etkisiyle beton içerisindeki boşlukların artmasıyla numune ağırlıklarında azalmalar olduğu sonucu çıkarılmıştır.

4.3.3 Yüksek sıcaklığın ışık geçirgenliğine etkisi

AR1 grubunda yüksek sıcaklığın (150 °C) optik fiberli numunelerin ışık geçirgenliğine etkisini incelemek amacıyla numunelere ışık geçirgenlik testi yapılmıştır. Yüksek sıcaklık uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra kısa doğrultuda optik fiber yerleşen AR1 grubu numunelerine ışık geçirgenlik testi uygulanmıştır. Yapılan ışık geçirgenlik testinde numune ve ölçüm cihazı arası mesafe 10 cm'dir. Elde edilen sonuçlar sütun grafik olarak Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



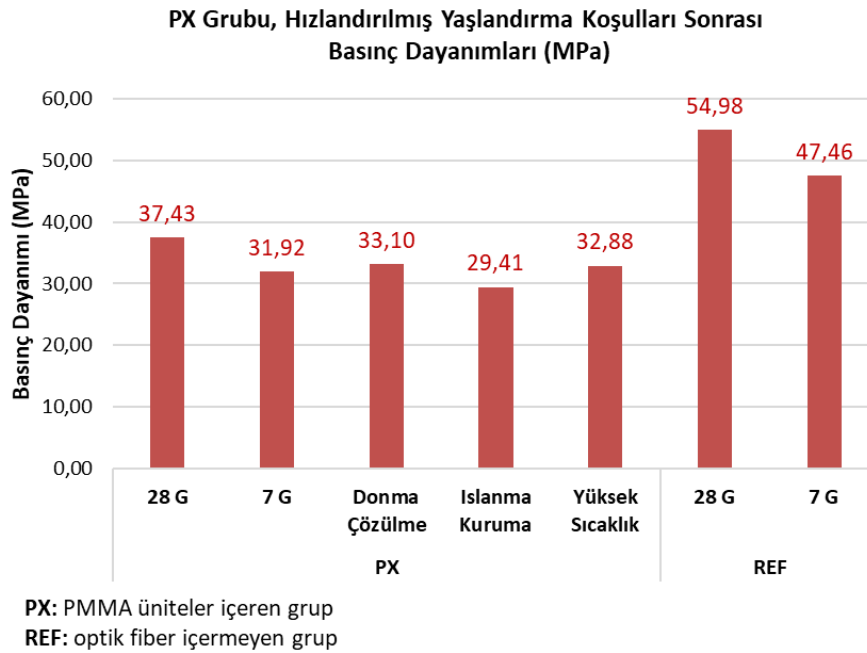
Şekil 4.6 : AR1 grubu (K), yüksek sıcaklığın ışık geçirgenliğine etkisi.

Numunelerin içerdği optik fiber oranları arttıkça ışık geçirgenlik değerleri de artmıştır. %2,4 oranında optik fiber içeren AR1-3-K numunesinin en fazla ışık geçirgenlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Grafikte numunelerin ışık geçirgenlik değerlerinin sıcaklık uygulandıktan sonra AR1-1-K grubu için %0,24'ten %0,05'e düştüğü, AR1-2-K grubu için %0,49'dan %0,08'e düştüğü, AR1-3-K grubu için %1'den %0,13'e düştüğü görülmektedir. İlk duruma göre AR1-1-K numunelerinin ışık geçirgenliklerinde %79 azalma, AR1-2-K numunelerinde %84 azalma ve AR1-3-K numunelerinde %86 azalma olduğu tespit edilmiştir.

4.4 Hızlandırılmış Yaşlandırma Koşullarının PX Grubunun Özelliklerine Etkisi

4.4.1 Dayanıma etkisi

Islanma-kuruma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan PX grubu numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları belirlenip 7 ve 28 günlük dayanımlarıyla kıyaslaması yapılmıştır. Kıyaslanan numunelerin ortalama basınç dayanımlarına ait sütun grafik Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

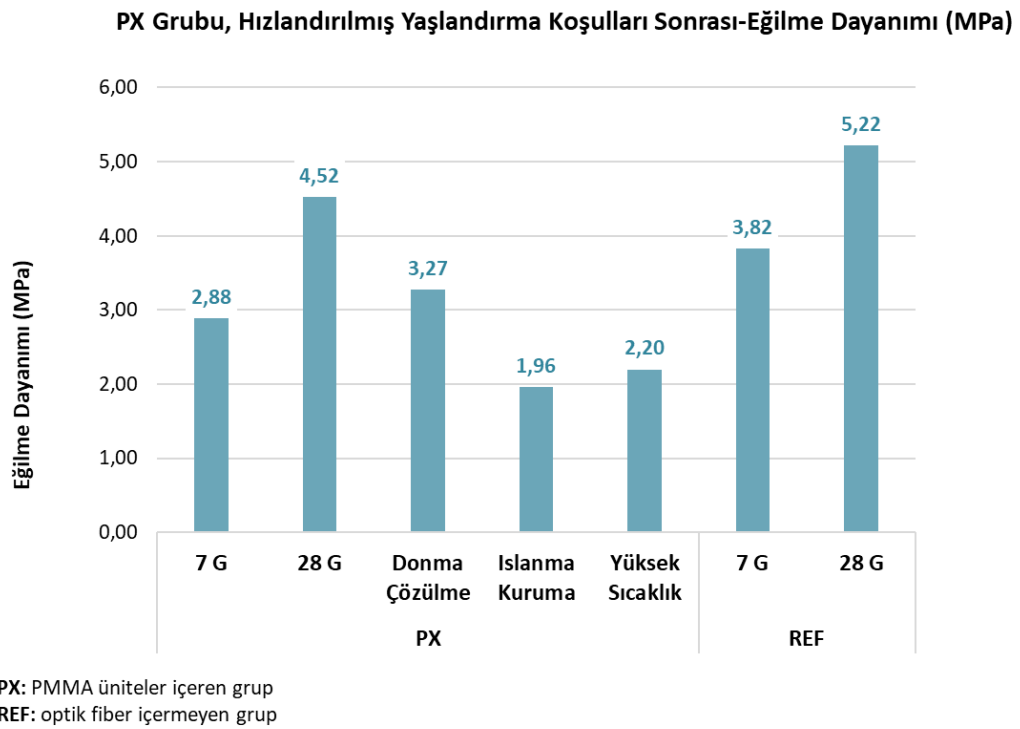


Şekil 4.7 : PX grubu, hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının basınç dayanımına etkisi.

Optik fiber içermeyen REF grubu numunelerinin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları sırasıyla 47,46 MPa ve 54,98 MPa'dır. PMMA şeffaf tüp içeren PX grubu numunelerinin 7 günlük ortalama basınç dayanımı 31,92 MPa ve 28 günlük ortalama

basınç dayanımı 37,43 MPa'dır. PX grubu ve REF grubu kıyaslandığında, PX grubunun 7 günlük basınç dayanımlarının REF grubu numunelerinden %32,74 daha az olduğu, 28 günlük basınç dayanımlarının REF grubu numunelerinden %31,92 daha az olduğu bulunmuştur. Bu azalmanın nedeni, 2 mm çaplı PMMA tüplerin betonunun homojen olarak dağılımına etki etmesidir. Ayrıca PX grubu numunelerinin 28 günlük ortalama basınç dayanımı ile hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası belirlenen basınç dayanımları kıyaslandığında donma-çözülme etkisiyle %11,57 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %21,43 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %12,16 azalma olduğu bulunmuştur. PX grubu için basınç dayanımında en fazla düşüş ıslanma-kuruma etkisi sonrası görülmüştür. Islanma-kuruma çevrimlerinde numunelere uygulanan ilk çevrimlerden itibaren sıcaklık ve suyun etkisiyle betonda kılcal çatlaklar oluşmuştur. Bu yüzden beton ve PMMA tüpler arasındaki boşluğun numunenin dayanımını azaltacak düzeyde olduğu ve kullanılan PMMA tüplerin çapının 2 mm olmasının betonun homojen dağılımına olumsuz etkisi olduğu düşünülmektedir.

PX grubu numunelerinin hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası numunelerin ortalama eğilme dayanımlarının, PX grubu 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları ve REF grubu ile karşılaştırılması ise Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 : PX grubu, hızlandırılmış yaşlandırma koşullarının eğilme dayanımına etkisi.

Verilen sütun grafikte optik fiber içermeyen REF grubu numunelerinin 7 ve 28 günlük ortalama eğilme dayanımları sırasıyla 3,82 MPa ve 5,22 MPa'dır. PX grubunun 7 ve 28 günlük ortalama eğilme dayanımları sırasıyla 2,88 MPa ve 4,52 MPa'dır. PX grubu ve REF numune grubu kıyaslandığında, PX grubunun 7 günlük eğilme dayanımının REF gruba göre %24,61 daha az olduğu, PX grubunun 28 günlük eğilme dayanımının REF gruba göre %13,41 daha az olduğu bulunmuştur. Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası PX grubu numunelerinin ortalama eğilme dayanımlarının donma-çözülme etkisiyle 3,27 MPa, ıslanma-kuruma etkisiyle 1,96 MPa ve yüksek sıcaklık etkisiyle 2,20 MPa olduğu bulunmuştur. PX grubunun 28 günlük ortalama eğilme dayanımı ile kıyaslandığında donma-çözülme etkisiyle numunelerin eğilme dayanımında %27,65 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %56,64 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %51,33 azalma olduğu bulunmuştur. Sonuçlar değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklık ve ıslanma-kuruma etkisinin PX grubunun eğilme dayanımını büyük ölçüde azalttığı sonucuna varılmıştır. Büyük çapta şeffaf tüpler kullanılmasının beton içerisindeki boşlukları arttırdığı bunun yanı sıra sıcaklıkla birlikte bu tüplerin erimesinin dayanımın azalmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Özellikle ıslanma-kuruma ve yüksek sıcaklık sonrası numune yüzeylerinde betonda görülen çatlakların numune dayanımlarında düşüşe neden olduğu düşünülmektedir.

4.4.2 Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası ağırlık ve boy değişimleri

PX grubu numunelerine hızlandırılmış yaşlandırma etkileri uygulanmadan önce ve sonra numunelerin ağırlık ve boy ölçümleri yapılmıştır. Numune boylarında değişim olmamıştır. Ağırlık ölçümlerine ait sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : PX grubu, ağırlık ölçümleri.

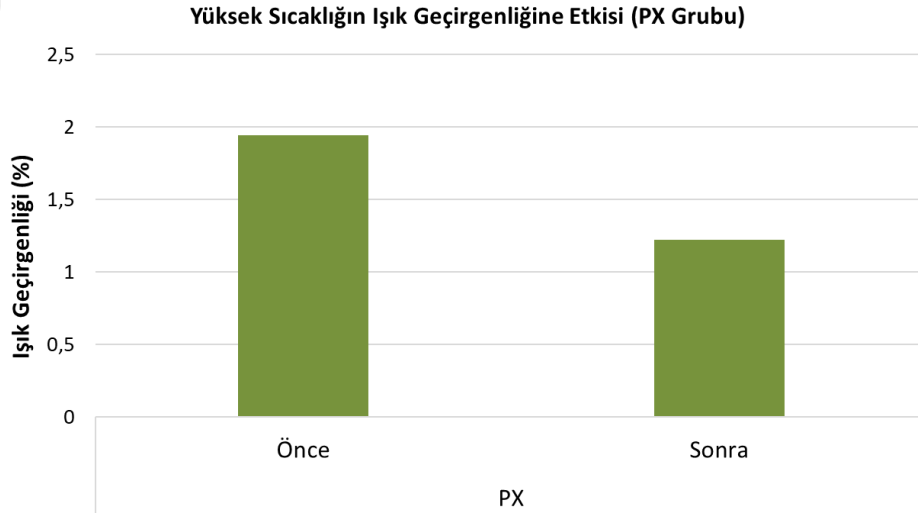
PX grubu - kütle (gr)				
		1.numune	2.numune	3.numune
Yüksek sıcaklık	Önce	475,52	435,89	459,08
	Sonra	466,26	424,86	448,38
	Fark	-9,26	-11,03	-10,70
Islanma kuruma	Önce	458,05	477,32	456,12
	Sonra	465,40	483,41	461,27
	Fark	+7,05	+6,39	+5,15
Donma çözülme	Önce	455,10	461,77	459,66
	Sonra	463,97	468,13	462,07
	Fark	+8,87	+6,36	+2,41

Numune ağırlıklarında yüksek sıcaklık etkisi sonrasında ortalama 10,33 gr azalma, ıslanma-kuruma sonrası ortalama 6,20 gr artış ve donma-çözülme sonrası 5,88 gr artış olmuştur. Yüksek sıcaklık etkisiyle beton içerisindeki boşlukların artmasıyla ve PMMA tüplerin erimesiyle numune ağırlıklarında azalmalar olduğu sonucu çıkarılmıştır.

4.4.3 Yüksek sıcaklığın ışık geçirgenliğine etkisi

PMMA üniteleri içeren ışık geçiren betonun (PX grubu) yüksek sıcaklık (150 °C) etkisi sonrası ışık geçirgenliğindeki değişimin incelenmesi amaçlanmıştır. PX grubu numunelerine yüksek sıcaklık uygulanmadan önce ve sonra, numunelerin ışık geçirgenlik değerleri belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında, numuneler 24 saat soğumaya bırakıldıktan sonra değerler ölçülmüştür.

Sonuçların sütun grafik olarak karşılaştırılması Şekil 4.9'da verilmiştir. Yüksek sıcaklık uygulanmadan önce PX grubunun ortalama ışık geçirgenlik değeri %1,94, yüksek sıcaklık uygulandıktan sonra ise %1,2'dir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklığa maruz kalan PX grubu numunelerinde PMMA tüplerin erimesiyle ışık geçirgenliklerinde %37,09 azalma olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.9 : PX grubu, yüksek sıcaklığın numunelerin ışık geçirgenliğine etkisi.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmada 0,5 mm çapında optik fiberler ve PMMA üniteler kullanılarak ışık geçiren beton üretilmiştir. Işık geçiren beton numunelerle karşılaştırmak amacıyla sadece betondan oluşan REF numune grubu üretilmiştir. Optik fiber içermeyen REF numune grubuna 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme testleri, ışık geçirgenliği testi uygulanmıştır. 0,5 mm çapındaki optik fiberlerin %1, %1,6 ve %2,4 hacimsel oranlarında beton karışımına katıldığı AR1 ve AR2 gruplarında farklı düzenler (desenler) kullanılmıştır. AR1 grubu numunelerinde çizgisel bir düzen, AR2 numune grubunda ise demet şeklinde optik fiberlerin yerleştiği bir düzen uygulanmıştır. Her iki grup için optik fiberlerin uzun ve kısa doğrultularda yerleşmesinin numunelerin eğilme dayanımına etkisi incelenmiştir. AR1 ve AR2 grubu numunelerinin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları, ışık geçirgenliklerine ait değerler karşılaştırılmıştır. Çizgisel düzende optik fiberlerin yerleştiği AR1 grubu numunelerine durabilitayı belirlemeye yönelik hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulanmıştır. Islanma-kuruma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkisi sonrasında AR1 grubu numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları, AR1 grubunun yüksek sıcaklık uygulanmadan önceki ve sonraki ışık geçirgenlik değerleri belirlenmiştir.

PMMA üniteleri içeren PX numune grubuna 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanım testleri, ışık geçirgenlik testi ve durabilitayı belirlemeye yönelik hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulanmıştır. Islanma- kuruma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkisi sonrasında numunelerin eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklık uygulanmadan önceki ve sonraki ışık geçirgenlik değerleri belirlenmiştir.

Elde edilen tüm sonuçların ışığında;

- ✓ Beton içerisindeki optik fiber yüzdesi arttıkça AR1 grubu numunelerinin 28 günlük basınç dayanımlarında %25'e kadar azalma ve AR2 grubu numunelerinin 28 günlük basınç dayanımlarında %9'a kadar azalma olduğu,

- ✓ 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde en fazla optik fiber oranına (%2,4) sahip olan AR1-3 ve AR2-3 grubu numunelerinin en az basınç dayanım değerlerine sahip olduğu,
- ✓ AR1 grubu numunelerinin 28 günlük ortalama basınç dayanımlarının AR2 grubunun 28 günlük ortalama basınç dayanımlarına göre %11 daha fazla olduğu,
- ✓ AR1 grubunda uzun doğrultuda optik fiber yerleştirilen numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarının kısa doğrultuda optik fiber yerleştirilen numunelere göre ortalama %16,80 daha fazla olduğu,
- ✓ AR2 grubunda ise uzun doğrultuda optik fiber yerleştirilen numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarının kısa doğrultuda optik fiber yerleştirilen numunelere göre ortalama %13,76 daha fazla olduğu,
- ✓ Optik fiberlerin çizgisel düzende ve kısa doğrultuda yerleştirildiği AR1 grubu (K) numunelerinin eğilme dayanımlarının AR2 (K) grubuna göre ortalama %33,63 daha fazla olduğu,
- ✓ Optik fiberlerin uzun doğrultuda yerleştirildiği AR1 grubu (U) numunelerinin eğilme dayanımlarının AR2 (U) grubuna göre ortalama %36,11 daha fazla olduğu,
- ✓ AR1 grubu numunelerinin (10 cm için) belirlenen ışık geçirgenlik değerlerinin AR2 grubuna göre ortalama %28 daha az olduğu,
- ✓ AR1 grubu numunelerinin (20 cm için) belirlenen ışık geçirgenlik değerlerinin AR2 grubuna göre ortalama %44 daha az olduğu,
- ✓ AR1 ve AR2 numune gruplarında en fazla optik fiber oranına (%2,4) sahip olan AR1-3 ve AR2-3 küp numunelerinin ışık geçirgenliklerinin en fazla değeri aldığı,
- ✓ Numune ve ölçüm cihazı arasındaki mesafe arttıkça (10 cm'den 20 cm'e çıkarıldığında) AR1 grubu için belirlenen ışık geçirgenlik değerlerinde %80'e varan düşüşler olduğu,
- ✓ Numune ve ölçüm cihazı arasındaki mesafe arttıkça (10 cm'den 20 cm'e çıkarıldığında) AR2 grubu için belirlenen ışık geçirgenlik değerlerinde %75'e varan düşüşler olduğu,

- ✓ Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrasında AR1 grubu numunelerinin basınç dayanımlarında donma-çözülme etkisiyle %4-29 arasında azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %2-12 arasında azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %8-12 arasında azalma olduğu,
- ✓ Kısa doğrultuda optik fiber yerleşen AR1 (K) numune gruplarının sonuçları incelendiğinde, donma-çözülme etkisiyle numunelerin eğilme dayanımlarında %6-14 arasında azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %4-%30 arasında azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %33-52 arasında azalma olduğu,
- ✓ Uzun doğrultuda optik fiberlerin yerleştiği AR1 (U) grubu numunelerinin donma-çözülme ve ıslanma-kuruma çevrimlerinden eğilme dayanımlarının olumsuz etkilenmediği ancak yüksek sıcaklık etkisiyle numunelerin eğilme dayanımının %47'ye kadar düştüğü,
- ✓ Yüksek sıcaklık uygulandıktan sonra AR1-1-K numunelerinin ışık geçirgenliklerinde %79 azalma, AR1-2-K numunelerinde %84 azalma ve AR1-3-K numunelerinde %86 azalma olduğu,
- ✓ PMMA üniteleri içeren PX grubu ve fiber içermeyen REF grubu kıyaslandığında, PX grubunun 7 günlük basınç dayanımlarının REF grubu numunelerinden %32,74 daha az, 28 günlük basınç dayanımlarının REF grubu numunelerinden %31,92 daha az olduğu,
- ✓ PX grubu numunelerinin 28 günlük ortalama basınç dayanımı ile hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası belirlenen basınç dayanımları kıyaslandığında, donma-çözülme etkisiyle %11,57 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %21,43 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %12,16 azalma olduğu,
- ✓ PX grubu ve REF numune grubu kıyaslandığında, PX grubunun 7 günlük eğilme dayanımının REF gruba göre %24,61 daha az olduğu, PX grubunun 28 günlük eğilme dayanımının REF gruba göre %13,41 daha az olduğu,
- ✓ PX grubunun 28 günlük ortalama eğilme dayanımı ile kıyaslandığında donma-çözülme etkisiyle numunelerin eğilme dayanımında %27,65 azalma, ıslanma-kuruma etkisiyle %56,64 azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle %51,33 azalma olduğu,

- ✓ Yüksek sıcaklık etkisi sonrası PX grubu numunelerinde PMMA tüplerin erimesiyle ışık geçirgenliklerinde %37,09 azalma olduğu,
 - ✓ Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları uygulandıktan sonra 0,5 mm çaplı optik fibere sahip AR1 numune grubunda betonda çatlak oluşumu gözlenmediği ancak 2 mm çapında PMMA tüpleri içeren PX numune grubunda özellikle ıslanma-kuruma ve yüksek sıcaklık etkisiyle betonda belirgin çatlaklar oluştuğu ve PMMA ünitelerde erime olduğu,
- belirlenmiştir.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, numune dayanımlarında optik fiber yerleşimlerinin bir etkisi olduğu ve optik fiberlerin düzenli ve uzun doğrultuda konulmasının ışık geçiren betonun dayanımını arttırdığı, hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası numune dayanımlarında düşüşler gözlemlendiği sonuçları çıkarılmıştır. 0,5 mm çapındaki optik fiberlerle iki farklı düzene sahip grup (AR1 ve AR2) oluşturulmuştur. Çizgisel desene sahip olan AR1 numunelerinin eğilme ve basınç dayanımlarının, dörtlü optik fiber demetlerinden oluşan desene sahip AR2 numunelerinin ortalama dayanımlarından fazla olduğu çıkarımı yapılmıştır. Bunun, optik fiberlerin AR2 grubunda uygulanan düzende (en az 1,5 mm) birbirlerine AR1 grubuna göre (en az 2,3 mm) daha yakın mesafelerde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca ışık geçirgenlik değerlerinin AR2 grubunda AR1 grubuna göre daha fazla olduğu bunun da yine optik fiberlerin daha sık yerleşmesinin sonucu olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Hızlandırılmış yaşlandırma koşulları sonrası uygulanan dayanım testlerinin sonuçlarına bakıldığında 0,5 mm gibi küçük çapta optik fiberler kullanılmasının ıslanma-kuruma ve donma-çözülme etkileri sonrası numune dayanımlarında belirgin düşüşlere yol açmayacağı düşünülmektedir. Ancak yüksek sıcaklık, optik fiberlerde erimelere yol açtığından numunelerin özellikle eğilme dayanımlarında düşüşe neden olmaktadır. Optik fiberlerin uzun doğrultuda yerleşmesinin numunelerin eğilme dayanımına olumlu etkisi olduğu ancak yüksek sıcaklık etkisiyle numune içerisindeki optik fiberlerin erimesiyle bu etkisini kaybettiği düşünülmüştür. Kısa doğrultuda optik fiber yerleşen numunelerin eğilme dayanımlarında da en fazla düşüş yüksek sıcaklık etkisiyle olmuştur. Bu sebeple, ışık geçiren beton numunelerinin eğilme dayanımlarında sıcaklık etkisinin önemli bir parametre olduğu sonucu çıkarılmıştır.

PMMA üniteler içeren PX grubunda özellikle ıslanma-kuruma ve yüksek sıcaklığın numuneler üzerinde gözle görülür düzeyde etkilerinin olduğu görülmüştür. Bu etkiler; betonda görülen çatlaklar ve PMMA tüplerde görülen erimelerdir. Özellikle ıslanma-kuruma çevrimlerinde numunelere uygulanan ilk çevrimlerden itibaren sıcaklık ve suyun etkisiyle betonda kılcal çatlaklar oluşmuştur. Bu yüzden beton ve PMMA tüpler arasındaki boşluğun numunenin dayanımını azaltacak düzeyde olduğu ve kullanılan PMMA tüplerin çapının 2 mm olmasının betonun homojen dağılımına olumsuz etkisi olduğu düşünülmektedir. PMMA tüpler arasında ve tüplerin bağlantılarının olduğu kısımlarda betonda çatlaklar oluşması, ışık geçiren elemanların büyük çapta kullanılmasının kesitte zayıflamalara sebep olacağını göstermektedir.

Işık geçiren beton, 2000'li yılların başından itibaren çalışılan bir malzeme olması sebebiyle hala araştırmaya açık bir konudur. Yaşlandırma etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için daha fazla numune sayısı ile üretim yapılması önerilmektedir. Ayrıca beton içerisine yerleşen optik fiberlerin birçok farklı desenin oluşmasına elverişli olması ileride yapılacak çalışmalarda çeşitlilik sağlamaktadır. Daha önce yapılan deneysel çalışmalarda sıklıkla optik fiber oranı ve çapına bağlı parametreler kullanılmıştır. Bu yüzden önceki çalışmalardan farklı parametreler kullanılarak deneysel çalışmaların yapılması ışık geçiren betonun özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında belirli oranlarda ve küçük çapta optik fiberler kullanılarak desenler oluşturulması sebebiyle farklı ve zahmetli bir üretim metodu uygulanmıştır. Kısa sürede üretime izin veren yöntemlerin geliştirilmesi ışık geçiren betonun kullanımının artmasına fayda sağlayacaktır.

Günümüzde sürdürülebilir malzemelere duyulan ihtiyaç gittikçe önem kazanmaktadır. Işık geçiren betonla ilgili daha kolay ve az maliyetli üretim yöntemlerinin ortaya çıkması, üretici firmalarla birlikte araştırma çalışmalarının yapılmasıyla mümkün olacağı düşünülmektedir. Işık geçiren beton gibi enerji tüketimini azaltabilecek malzemelerle ilgili çalışmaların arttırılmasıyla üretime ve uygulamaya yönelik sorunların ortadan kalkacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Li Y., Li J., Wan Y. ve Xu Z.** (2015). Experimental study of light transmitting cement-based material (LTCM). *Construction and Building Materials*, 96, 319–325. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.055.
- [2] **Url-1** < <https://lucem.com/translucent-concrete-applications> >, erişim tarihi 28.11.2021.
- [3] **Öztekin K., Kömürlü R., Yıldırım K.** (2009). Saydam Beton Kullanımı ve Mimariye Yansımaları. *Mimarlıkta Malzeme*, 4 (13), 84-90.
- [4] **Url-2** <<http://www.litracon.hu/en/about-us>>, erişim tarihi 28.11.2021.
- [5] **Juan S. ve Zhi Z.** (2019). Preparation and Study of Resin Translucent Concrete Products. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-12. doi: 10.1155/2019/8196967.
- [6] **Roye A., Barlé M., Janetzko S. ve Gries T.** (2009). Faser - Und textilbasierte Lichtleitung in Betonbauteilen - Lichtleitender Beton. *Beton- und Stahlbetonbau*, 104 (2), 121–126. doi: 10.1002/best.200808235.
- [7] **Tahwia A.M., Abdel-Raheem A., Abdel-Aziz N. ve Amin M.** (2021). Light transmittance performance of sustainable translucent self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, 38, 1-12. doi: 10.1016/j.job.2021.102178.
- [8] **Chiew S. M., Ibrahim I.S., Mohd Ariffin M. A., Lee H. S. ve Singh J. K.** (2021). Development and properties of light-transmitting concrete (LTC) – A review. *Journal of Cleaner Production*, 284, 1-12. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124780.
- [9] **Maraşlı M.** (2019). *Cam Lifi Takviyeli Betonlarda Olgunluk İndeksi Yöntemi ile Eğilme ve Basınç Dayanımlarının Tahmin Modelinin Geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- [10] **Celep Z.** (2019). *Betonarme Yapılar*. İstanbul:Beta Yayınları.
- [11] **TS EN** (2020). *Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri* (TS EN 197-1). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [12] **Ersoy U. ve Özcebe G.** (2017). *Betonarme*. İstanbul:Evrım Yayınevi.
- [13] **Pekmezci B.Y ve Atahan H. N.** (2014). Kimyasal ve nano katkıları: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, 123, 69–82.
- [14] **Url-3** <<https://www.thbb.org/teknik-bilgiler/katki>>, erişim tarihi 23.11.2021.
- [15] **Koike Y.** (2014). *Fundamentals of Plastic Optical Fibers*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [16] **Url-4** <<https://www.lumitex.com/blog/optical-fiber-technology>>, erişim tarihi 24.11.2021.

- [17] **Url-5** <<https://www.cement.org/learn/concrete-technology/durability/alkali-aggregate-reaction>>, erişim tarihi 23.11.2021.
- [18] **Pagliolico S. L., Lo Verso V. R. M., Torta A., Giraud M., Canonico F., ve Ligi L.** (2015). A preliminary study on light transmittance properties of translucent concrete panels with coarse waste glass inclusions. *Energy Procedia*, 78, 1811–1816. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.317.
- [19] **Url-6** <<https://cimsa.com.tr/formulhane/beyaz-cimento/transparan-beton-nedir-nerelerde-kullanilir>>, erişim tarihi 23.11.2021.
- [20] **Url-7** <<https://patents.google.com/patent/EP1532325B1/en?assignee=Aron+Losonczy>>, erişim tarihi 06.12.2021.
- [21] **Url-8** <<https://patents.google.com/patent/US8091303B2/en?inventor=losonczy&oq=+losonczy>>, erişim tarihi 23.11.2021.
- [22] **Url-9** <<https://patents.google.com/patent/EP2180986B1/en?assignee=lucem&oq=lucem>>, erişim tarihi 06.12.2021.
- [23] **Url-10** <<https://patents.google.com/patent/EP2784237A1/en>>, erişim tarihi 24.11.2021.
- [24] **Url-11** <<https://www.litracon.hu/en/products/litracon-pxl>>, erişim tarihi 24.11.2021.
- [25] **Url-12** <<https://lucem.com/translucent-concrete/>>, erişim tarihi 25.11.2021.
- [26] **Url-13** <<https://www.luccon.com/>> erişim tarihi 25.11.2021.
- [27] **Url-14** <<https://www.fibrobeton.com.tr/markalar-fibro-transbeton®-17>>, erişim tarihi 25.11.2021.
- [28] **Url-15** <<https://www.heidelbergcement.com/en/italian-pavilion-shanghai>>, erişim tarihi 27.11.2021.
- [29] **Url-16** <<https://archello.com/project/al-aziz-mosque>>, erişim tarihi 28.11.2021.
- [30] **Url-17** <<https://www.litracon.hu/en/references/>>, erişim tarihi 27.11.2021.
- [31] **Url-18** <<https://www.dezeen.com/2015/02/16/gianni-botsford-smoking-pavilion-zurich-switzerland-translucent-concrete/>>, erişim tarihi 27.11.2021.
- [32] **Url-19** <<https://www.archdaily.com/228934/new-headquarters-of-bank-of-georgia-illuminated-translucent-concrete-for-interior-design-architectural-group-partners>>, erişim tarihi 28.11.2021.
- [33] **Tuaum A., Shitote S., Oyawa W. ve Biedebrhan M.** (2019). Structural Performance of Translucent Concrete Façade Panels. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-10. doi: 10.1155/2019/4604132.
- [34] **Navabi D., Javidruzi M., Hafezi M. R. ve Mosavi A.** (2020). The high-performance light transmitting concrete and experimental analysis of using polymethylmethacrylate optical fibers in it. *Journal of Building Engineering*, 38, 1-11. doi: 10.1016/j.jobbe.2020.102076.
- [35] **Dinesh B. K., Mercy S. R., Suji D.** (2019). Effect of Fiber Pattern in Strength of Light Transmitting Concrete. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 7 (5S4), 736-739. ISSN: 2277-3878.

- [36] **Url-20** <<http://fiberopticpof.com/plastic-optical-fiber-product-specifications/>>, erişim tarihi 25.09.2021
- [37] **Url-21** <[https://www.cimsa.com.tr./](https://www.cimsa.com.tr/)>, erişim tarihi 25.09.2021
- [38] **Url-22** <<https://www.acsaplus.com/urun-detay-acs-latex-5-r-67.html>>, erişim tarihi 25.09.2021.
- [39] **Url-23** <<https://www.gobizkorea.com/user/goods/>>, erişim tarihi 25.09.2021.
- [40] **TS EN** (2019). *Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi* (TS EN 12350-2). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [41] **TS EN** (2019). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini* (TS EN 12390-5). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [42] **TS EN ISO** (2019). *Plastikler- Saydam malzemelerin toplam ışık geçirgenliğinin tayini- Bölüm 1: Tek- Işın demetli cihaz* (TS EN ISO 13468-1). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [43] **Url-24** <<http://www.esenmed.com.tr/urun/firinlar-93/nuve-fn-300-400-500-ekonomik-firinlar-kuru-hava-sterilizatorleri-137>>, erişim tarihi 25.09.2021.
- [44] **Url-25** <https://www.elektronlab.com/tr/9/anIicat_1/12/anIIitm_1/48/p/beton-test-cihazlari/tam-otomatik-donma-cozulme-cihaz-20-30-suda>, erişim tarihi 24.09.2021.
- [45] **Url-26** <<https://www.utest.com.tr/tr/kaynakli-beton-test-presi-govdeleri>>, erişim tarihi 24.09.2021.
- [46] **Url-27** <<https://www.utest.com.tr/tr/20610/Servo-Kontrollu-Otomatik-Egilme-Deney-Presleri>>, erişim tarihi 24.09.2021.
- [47] **Url-28** <https://www.pceinstruments.com/turkish/oel_uemteknolojisi/oel_uem-cihazlar/luxmetre-pce-instruments-luxmetrece174det_516617.htm?_list=qr.art&_listpos=5>, erişim tarihi 24.09.2021.
- [48] **Url-29** <<https://www.precisa.com/series/series-320-xb-balances>>, erişim tarihi 30.09.2021.



EKLER

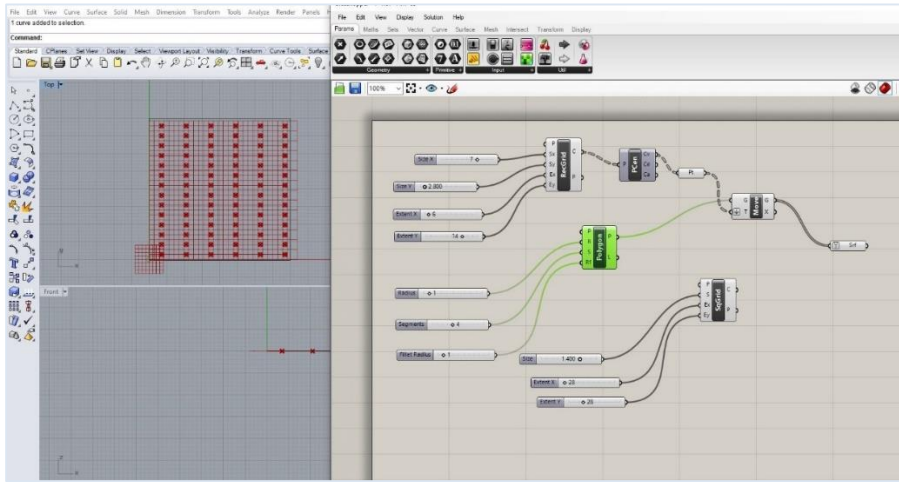
EK A: Numune Tipleri Çizimleri

EK B: Numunelere Uygulanan Dayanım Testlerinin Sonuçları

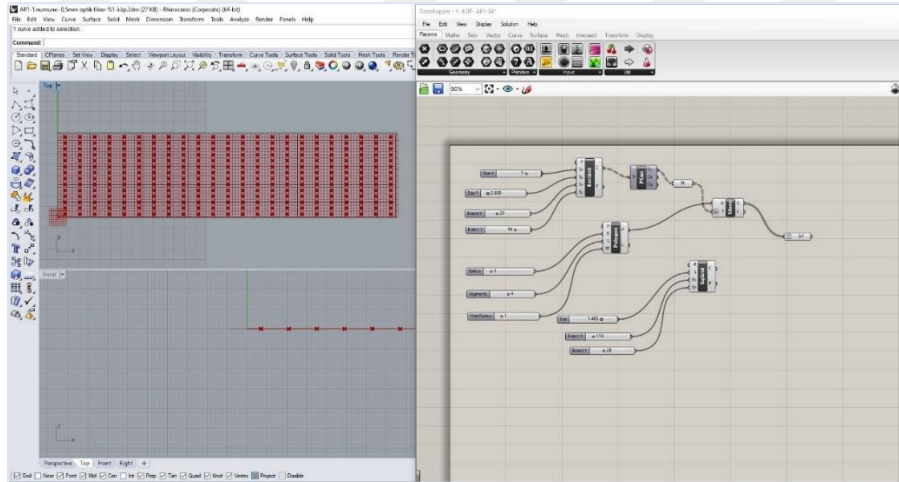
EK C: Numunelerin Eğilme Dayanımı ve Basınç Dayanımı Grafikleri



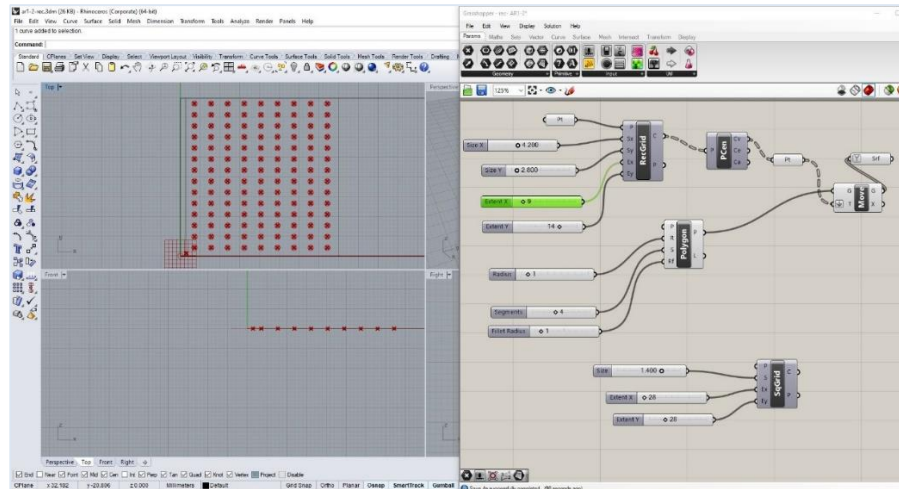
EK A



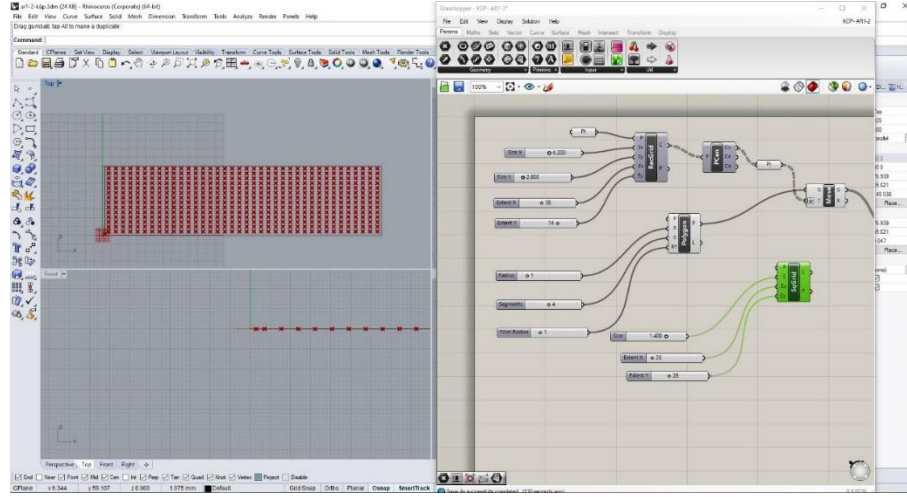
Şekil A.1 : AR1-1-U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



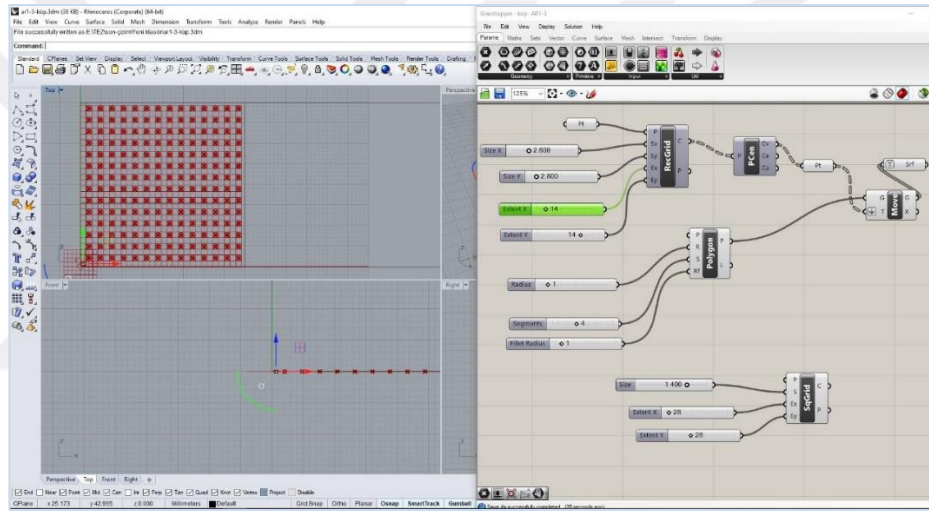
Şekil A.2 : AR1-1-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



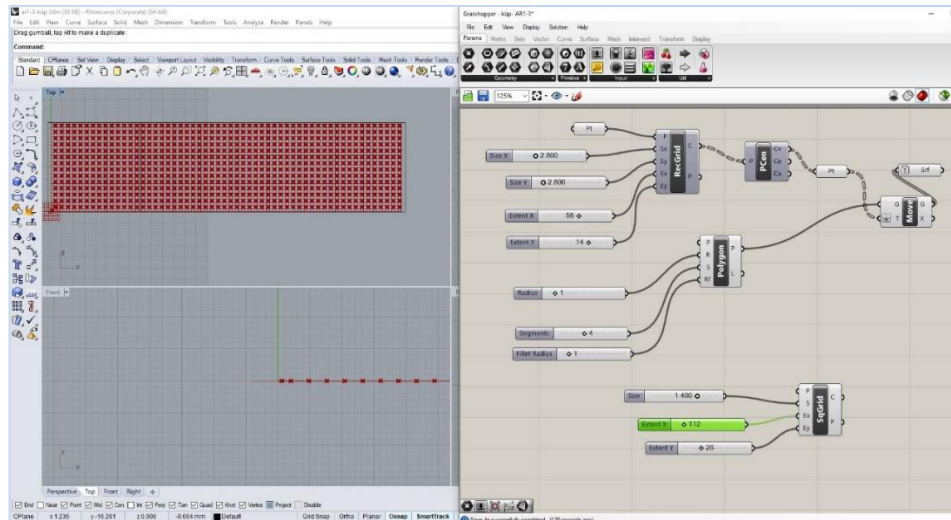
Şekil A.3 : AR1-2-U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



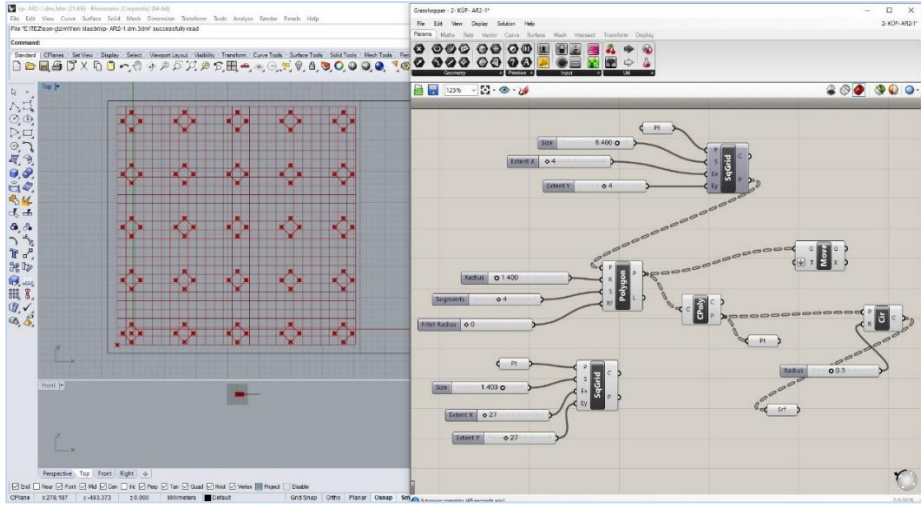
Şekil A.4 : AR1-2-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



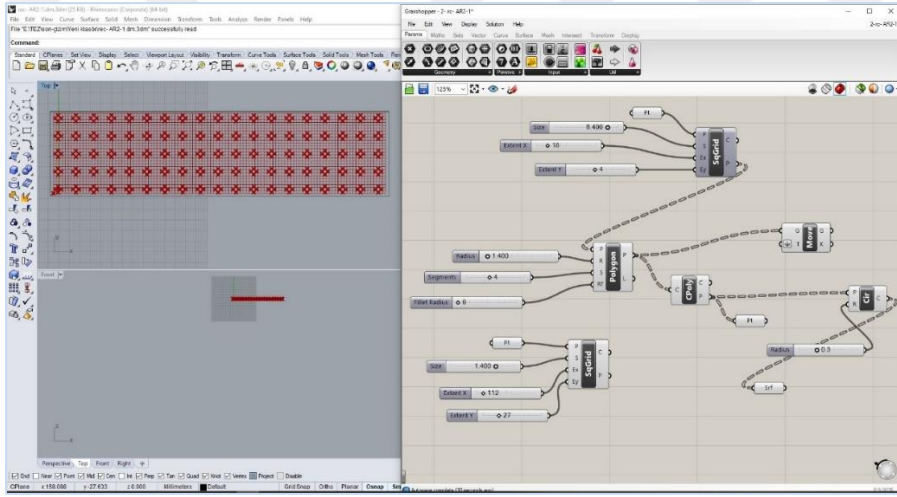
Şekil A.5 : AR1-3 –U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



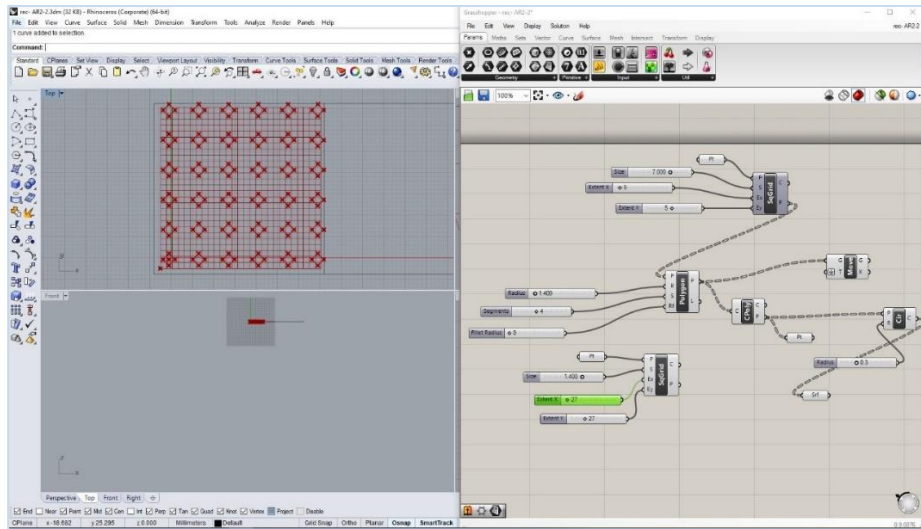
Şekil A.6 : AR1-3-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



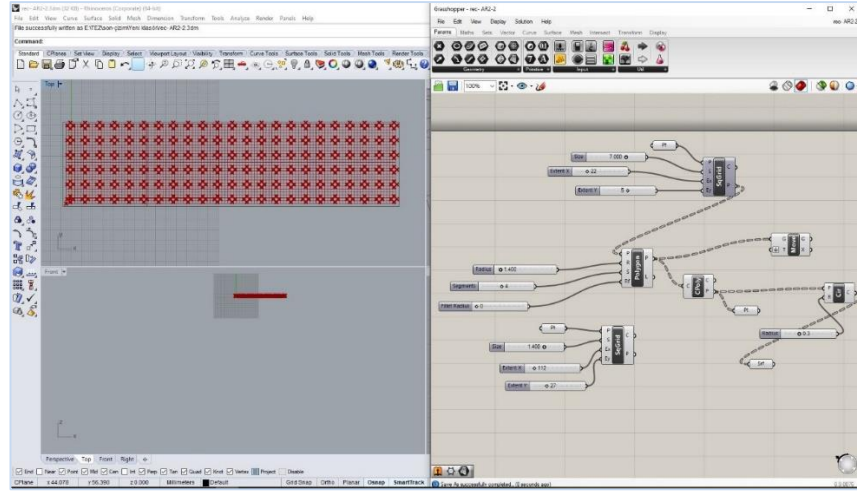
Şekil A.7 : AR2-1-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



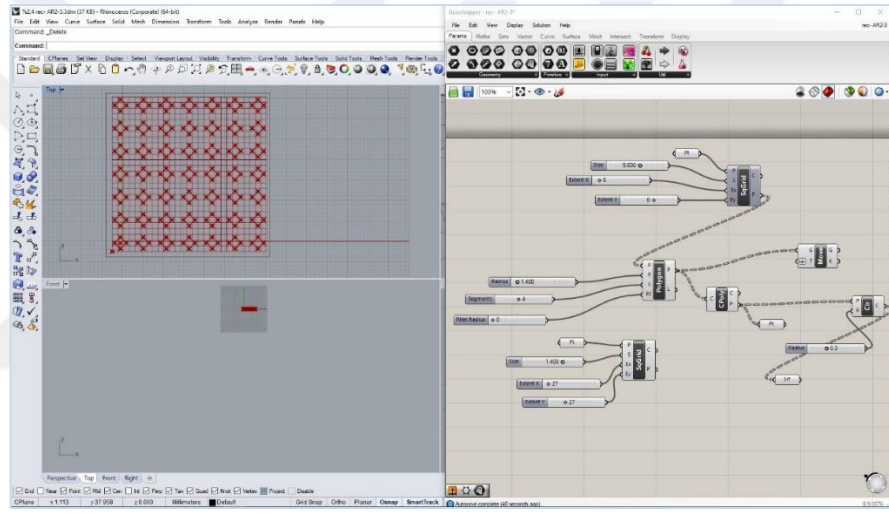
Şekil A.8 : AR2-1-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



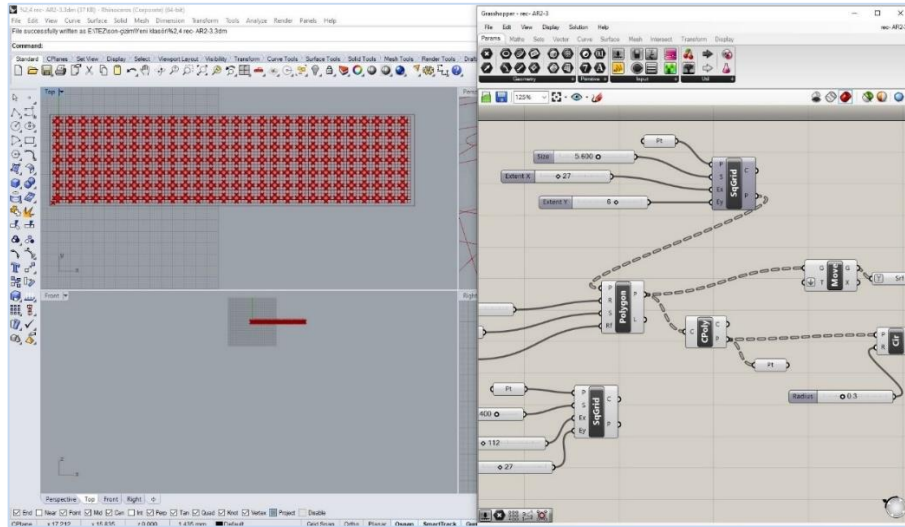
Şekil A.9 : AR2-2-U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



Şekil A.10 : AR2-2-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



Şekil A.11 : AR2-3-U numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.



Şekil A.12 : AR2-3-K numunesi optik fiber düzeninin Rhinoceros-Grasshopper yazılımları ile oluşturulması.

EK B**Çizelge B.1 : REF grubu numuneleri, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.**

Numune İsimleri	Deney Tipi	Num. No.	En (mm)	Yüks. (mm)	Eğilme (kN)	Eğilme (Mpa)	Ort. Eğilme (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
REF-1	7. Gün Eğilme Deneyi	1	40,00	40,00	1,40	3,26		
REF-2	7. Gün Eğilme Deneyi	2	40,00	40,00	2,30	5,11	3,82	1,11
REF-3	7. Gün Eğilme Deneyi	3	40,00	40,00	1,40	3,11		
REF-1	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40,88	40,12	2,00	4,56		
REF-2	28. Gün Eğilme Deneyi	2	40,00	40,00	2,20	5,16	5,22	0,70
REF-3	28. Gün Eğilme Deneyi	3	39,61	40,67	2,60	5,95		

Çizelge B.2 : AR1 grubu numuneleri, 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.

Numune İsimleri	Deney Tipi	Num. No.	En (mm)	Yüks. (mm)	Eğilme (kN)	Eğilme (Mpa)	Ort. Eğilme (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-1-1-1-K	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40,47	40,45	2,90	6,57		
AR-1-1-2-K	28. Gün Eğilme Deneyi	2	40,56	40,77	2,50	5,56	6,29	0,63
AR-1-1-3-K	28. Gün Eğilme Deneyi	3	40,44	40,34	2,66	6,73		
AR-1-1-1-U	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40,00	41,00	2,90	6,31		
AR-1-1-2-U	28. Gün Eğilme Deneyi	2	40,00	41,00	3,80	8,48	7,13	1,17
AR-1-1-3-U	28. Gün Eğilme Deneyi	3	40,50	41,00	3,00	6,61		
AR-1-2-1-K	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40,45	39,61	2,60	6,15		
AR-1-2-2-K	28. Gün Eğilme Deneyi	2	40,30	39,59	4,00	9,50	6,93	2,28
AR-1-2-3-K	28. Gün Eğilme Deneyi	3	40,86	39,65	2,20	5,14		
AR-1-2-1-U	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40,40	39,18	3,60	8,71		
AR-1-2-2-U	28. Gün Eğilme Deneyi	2	39,60	40,00	3,74	8,76	7,70	1,79
AR-1-2-3-U	28. Gün Eğilme Deneyi	3	42,52	40,34	2,60	5,64		
AR-1-3-1-K	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40,00	41,00	3,00	6,69		
AR-1-3-2-K	28. Gün Eğilme Deneyi	2	40,50	41,00	3,40	7,49	6,44	1,20
AR-1-3-3-K	28. Gün Eğilme Deneyi	3	40,50	41,00	2,33	5,12		
AR-1-3-1-U	28. Gün Eğilme Deneyi	1	41,00	41,00	3,50	7,62		
AR-1-3-2-U	28. Gün Eğilme Deneyi	2	42,00	41,00	3,78	8,03	8,11	0,54
AR-1-3-3-U	28. Gün Eğilme Deneyi	3	42,00	41,00	4,09	8,69		

Çizelge B.3 : AR2 grubu numuneleri, 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.

Numune İsimleri	Deney Tipi	Num. No.	En (mm)	Yüks. (mm)	Eğilme (kN)	Eğilme (Mpa)	Ort. Eğilme (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-2-1-1-K	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40	40	1,96	4,59	4,66	0,13
AR-2-1-2-K	28. Gün Eğilme Deneyi	2	41	40	2,1	4,80		
AR-2-1-3-K	28. Gün Eğilme Deneyi	3	41	40	2	4,57		
AR-2-1-1-U	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40	39	2,42	5,97	5,19	0,68
AR-2-1-2-U	28. Gün Eğilme Deneyi	2	39	39	1,9	4,80		
AR-2-1-3-U	28. Gün Eğilme Deneyi	3	39	39	1,9	4,80		
AR-2-2-1-K	28. Gün Eğilme Deneyi	1	41	39	1,84	4,43	4,52	0,08
AR-2-2-2-K	28. Gün Eğilme Deneyi	2	41	39	1,90	4,57		
AR-2-2-3-K	28. Gün Eğilme Deneyi	3	41	39	1,90	4,57		
AR-2-2-1-U	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40	38,5	2,10	5,31	5,47	0,87
AR-2-2-2-U	28. Gün Eğilme Deneyi	2	41	38,5	2,60	6,42		
AR-2-2-3-U	28. Gün Eğilme Deneyi	3	41	38,5	1,90	4,69		
AR-2-3-1-K	28. Gün Eğilme Deneyi	1	40	41	2,20	4,86	5,72	0,79
AR-2-3-2-K	28. Gün Eğilme Deneyi	2	41	41	2,70	5,88		
AR-2-3-3-K	28. Gün Eğilme Deneyi	3	41	41	2,90	6,43		
AR-2-3-1-U	28. Gün Eğilme Deneyi	1	39	41	2,60	5,95	6,23	0,65
AR-2-3-2-U	28. Gün Eğilme Deneyi	2	39	40	2,90	6,97		
AR-2-3-3-U	28. Gün Eğilme Deneyi	3	39	40	2,40	5,77		

Çizelge B.4 : PX grubu numuneleri, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları.

Numune İsimleri	Deney Tipi	Num. No.	En (mm)	Yüks. (mm)	Eğilme (kN)	Eğilme (Mpa)	Ort. Eğilme (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
PX-1	7. Gün Eğilme Deneyi	1	38,00	40,00	1,07	2,52	2,88	0,45
PX-2	7. Gün Eğilme Deneyi	2	38,50	39,50	1,17	2,75		
PX-3	7. Gün Eğilme Deneyi	3	38,50	40,00	1,44	3,38		
PX-1	28. Gün Eğilme Deneyi	1	38,00	40,00	2,20	5,16	4,52	0,28
PX-2	28. Gün Eğilme Deneyi	2	38,50	39,50	2,00	4,56		
PX-3	28. Gün Eğilme Deneyi	3	38,00	40,00	2,60	5,95		

Çizelge B.5 : AR1 grubu numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.

Numune İsimleri	Deney Tipi	Num. No.	En (mm)	Yüks. (mm)	Eğilme (kN)	Eğilme (Mpa)	Ort. Eğilme (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-1-1-1-K	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	1	40,35	40,06	2,70	5,47		
AR-1-1-2-K	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	2	40,45	40,05	3,30	6,86	6,05	0,72
AR-1-1-3-K	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	3	40,36	40,00	2,90	5,83		
AR-1-1-1-U	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	1	39,95	41,57	3,40	7,39		
AR-1-1-2-U	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	2	40,20	40,64	3,80	8,48	7,60	0,79
AR-1-1-3-U	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	3	40,24	41,47	3,20	6,94		
AR-1-2-1-K	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	1	40,54	38,50	2,30	5,74		
AR-1-2-2-K	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	2	40,56	39,39	3,00	7,15	6,66	0,79
AR-1-2-3-K	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	3	40,19	39,76	3,00	7,08		
AR-1-2-1-U	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	1	39,97	39,27	3	7,30		
AR-1-2-2-U	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	2	40,67	39,46	3,8	9,00	8,08	0,86
AR-1-2-3-U	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	3	40,27	40,53	3,5	7,94		
AR-1-3-1-K	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	1	41,02	40,82	2,10	4,61		
AR-1-3-2-K	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	2	40,58	40,88	2,10	4,64	4,48	0,26
AR-1-3-3-K	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	3	40,80	40,88	1,90	4,18		
AR-1-3-1-U	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	1	41,00	41,54	4,10	8,70		
AR-1-3-2-U	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	2	41,28	41,64	3,90	8,17	8,40	0,27
AR-1-3-3-U	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	3	41,61	41,63	3,80	8,32		

Çizelge B.6 : PX grubu numuneleri, ıslanma-kuruma ve donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.

Numune İsimleri	Deney Tipi	Num. No.	En (mm)	Yüks. (mm)	Eğilme (kN)	Eğilme (Mpa)	Ort. Eğilme (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
PX-1	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	1	38,00	40,00	0,608	1,50		
PX-2	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	2	38,50	40	1	2,41	1,96	0,65
PX-3	Islanma-kuruma sonrası eğ. d.	3	38,50	40	Ön yükleme altı	-		
PX-1	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	1	38,00	40,00	1,43	3,52		
PX-2	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	2	38,00	38,00	1,30	3,55	3,27	0,45
PX-3	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	3	38,00	40,00	1,11	2,75		

Çizelge B.7 : AR1 grubu numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.

Numune İsimleri	Deney Tipi	Num. No.	En (mm)	Yüks. (mm)	Eğilme (kN)	Eğilme (Mpa)	Ort. Eğilme (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-1-1-1-K	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	1	39,96	41,67	2,74	5,92		
AR-1-1-2-K	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	2	39,87	41,30	2,98	6,57	5,87	0,72
AR-1-1-3-K	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	3	39,76	41,40	2,330	5,13		
AR-1-1-1-U	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	1	40,31	41,33	4,05	8,77		
AR-1-1-2-U	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	2	40,13	41,53	3,40	7,48	8,12	0,91
AR-1-1-3-U	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	3	40,16	41,20	Ön yükleme altı	-		
AR-1-2-1-K	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	1	40,32	38,78	2,46	6,08		
AR-1-2-2-K	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	2	40,30	39,40	2,83	6,78	6,41	0,35
AR-1-2-3-K	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	3	40,07	39,37	2,64	6,38		
AR-1-2-1-U	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	1	40,27	39,55	3,18	7,58		
AR-1-2-2-U	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	2	40,5	40,79	3,72	8,27	7,81	0,40
AR-1-2-3-U	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	3	40,61	41,28	3,50	7,59		
AR-1-3-1-K	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	1	40,61	41,21	2	4,35		
AR-1-3-2-K	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	2	40,55	40,89	2,8	6,19	5,51	1,01
AR-1-3-3-K	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	3	40,58	41,58	2,8	5,98		
AR-1-3-1-U	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	1	41,72	40,87	Ön yükleme altı	-		
AR-1-3-2-U	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	2	41,80	40,82	3,3	7,11	7,42	0,43
AR-1-3-3-U	Donma-çözülme sonrası eğ. d.	3	40,93	41,90	3,7	7,72		

Çizelge B.8 : PX grubu numuneleri, yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.

Numune İsimleri	Deney Tipi	Num. No.	En (mm)	Yüks. (mm)	Eğilme (kN)	Eğilme (Mpa)	Ort. Eğilme (Mpa)	Std. Sapma (MPa)
PX-1	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	1	38,28	40,75	1,4	3,2		
PX-2	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	2	37,88	39,05	0,5	1,2	2,20	1,41
PX-3	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	3	38,85	39,46	Ön yükleme altı	-		

Çizelge B.9 : AR1 grubu numuneleri, yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımı deney sonuçları.

Numune İsimleri	Deney Tipi	Num. No.	En (mm)	Yüks. (mm)	Eğilme (kN)	Eğilme (Mpa)	Ort. Eğilme (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-1-1-1-K	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	1	40,51	40,30	1,80	4,10		
AR-1-1-2-K	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	2	40,04	41,85	2,20	4,71	4,18	0,49
AR-1-1-3-K	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	3	40,21	39,92	1,60	3,75		
AR-1-1-1-U	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	1	40,37	40,75	2,10	4,70		
AR-1-1-2-U	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	2	40,26	41,32	2,00	4,36	4,51	0,17
AR-1-1-3-U	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	3	40,55	41,65	2,10	4,48		
AR-1-2-1-K	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	1	39,90	39,80	1,60	3,80		
AR-1-2-2-K	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	2	40,50	39,85	1,70	3,96	4,09	0,38
AR-1-2-3-K	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	3	40,40	39,50	1,90	4,52		
AR-1-2-1-U	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	1	40,50	40,60	2,20	4,94		
AR-1-2-2-U	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	2	40,65	40,61	2,20	4,92	4,57	0,62
AR-1-2-3-U	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	3	40,65	40,32	1,70	3,86		
AR-1-3-1-K	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	1	40,85	41,55	1,40	2,98		
AR-1-3-2-K	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	2	40,77	41,50	1,60	3,42	3,12	0,26
AR-1-3-3-K	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	3	40,81	41,77	1,40	2,95		
AR-1-3-1-U	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	1	41,41	40,65	2,30	5,04		
AR-1-3-2-U	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	2	40,82	41,50	1,80	3,84	4,34	0,62
AR-1-3-3-U	Yüksek sıcaklık sonrası eğ. d.	3	41,65	40,60	1,90	4,15		

Çizelge B.10 : REF grubu numuneleri, 7 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Numune No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort. Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
REF-1-1	7. Gün Basınç Deneyi	1	73,00	45,62			
REF-1-2	7. Gün Basınç Deneyi	2	86,35	53,97			
REF-2-1	7. Gün Basınç Deneyi	3	72,88	45,55			
REF-2-2	7. Gün Basınç Deneyi	4	75,64	47,28	75,61	47,46	3,32
REF-3-1	7. Gün Basınç Deneyi	5	73,68	47,28			
REF-3-2	7. Gün Basınç Deneyi	6	72,09	45,06			

Çizelge B.11 : REF grubu numuneleri, 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Numune No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (MPa)
REF-1-1	28. Gün Basınç Deneyi	1	87,12	54,45			
REF-1-2	28. Gün Basınç Deneyi	2	86,50	54,07			
REF-2-1	28. Gün Basınç Deneyi	3	89,50	54,57			
REF-2-2	28. Gün Basınç Deneyi	4	92,39	56,33	88,91	54,98	0,86
REF-3-1	28. Gün Basınç Deneyi	5	88,17	54,73			
REF-3-2	28. Gün Basınç Deneyi	6	89,75	55,71			

Çizelge B.12 : AR1 grubu numuneleri, 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Numune No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-1-1-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	1	89,72	54,80			
AR-1-1-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	2	93,07	56,85			
AR-1-1-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	3	89,39	54,06			
AR-1-1-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	4	85,79	51,88	89,89	54,79	1,86
AR-1-1-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	5	88,76	54,41			
AR-1-1-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	6	92,60	56,76			
AR-1-2-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	1	82,17	51,35			
AR-1-2-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	2	86,01	53,68			
AR-1-2-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	3	84,19	52,77			
AR-1-2-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	4	81,77	51,25	83,79	52,29	0,93
AR-1-2-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	5	84,29	52,03			
AR-1-2-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	6	84,28	52,67			
AR-1-3-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	1	67,32	41,05			
AR-1-3-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	2	70,57	43,03			
AR-1-3-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	3	67,44	40,61			
AR-1-3-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	4	68,11	41,02	68,20	41,24	0,91
AR-1-3-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	5	68,46	41,23			
AR-1-3-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	6	67,30	40,53			

Çizelge B.13 : AR2 grubu numuneleri, 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Numune No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-2-1-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	1	75,83	47,39	74,77	46,16	1,42
AR-2-1-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	2	71,12	44,45			
AR-2-1-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	3	75,47	46,02			
AR-2-1-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	4	75,93	46,30			
AR-2-1-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	5	73,39	44,75			
AR-2-1-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	6	76,87	48,04			
AR-2-2-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	1	70,65	44,16	72,34	45,24	1,51
AR-2-2-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	2	74,11	46,35			
AR-2-2-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	3	69,58	43,51			
AR-2-2-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	4	73,00	45,65			
AR-2-2-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	5	75,89	47,46			
AR-2-2-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	6	70,82	44,29			
AR-2-3-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	1	74,75	45,09	69,94	42,04	2,35
AR-2-3-1-K	28. Gün Basınç Deneyi	2	68,85	41,53			
AR-2-3-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	3	66,92	39,81			
AR-2-3-2-K	28. Gün Basınç Deneyi	4	66,72	39,69			
AR-2-3-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	5	73,92	44,69			
AR-2-3-3-K	28. Gün Basınç Deneyi	6	68,48	41,40			

Çizelge B.14 : PX grubu numuneleri, 7 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Numune No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
PX-1-1	7. Gün Basınç Deneyi	1	54,29	33,93	51,07	31,92	2,81
PX-1-2	7. Gün Basınç Deneyi	2	50,65	31,66			
PX-2-1	7. Gün Basınç Deneyi	3	47,85	29,91			
PX-2-2	7. Gün Basınç Deneyi	4	45,81	28,63			
PX-3-1	7. Gün Basınç Deneyi	5	56,77	35,48			
PX-3-2	7. Gün Basınç Deneyi	6	-	-			

Çizelge B.15 : PX grubu numuneleri, 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Numune No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
PX-1-1	28. Gün Basınç Deneyi	1	-	-			
PX-1-2	28. Gün Basınç Deneyi	2	55,78	36,70			
PX-2-1	28. Gün Basınç Deneyi	3	56,08	36,89			
PX-2-2	28. Gün Basınç Deneyi	4	58,65	38,59	56,90	37,44	1,95
PX-3-1	28. Gün Basınç Deneyi	5	53,13	34,95			
PX-3-2	28. Gün Basınç Deneyi	6	60,88	40,05			

Çizelge B.16 : AR1 grubu numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Num. No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-1-1-1-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	1	78,42	47,22			
AR-1-1-1-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	2	80,17	48,12			
AR-1-1-2-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	3	86,83	52,21			
AR-1-1-2-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	4	76,57	46,04	80,48	48,26	3,46
AR-1-1-3-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	5	87,77	52,35			
AR-1-1-3-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	6	73,13	43,62			
AR-1-2-1-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	1	83,55	52,22			
AR-1-2-1-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	2	85,04	54,49			
AR-1-2-2-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	3	85,79	53,70			
AR-1-2-2-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	4	65,47	40,98	80,89	50,80	5,03
AR-1-2-3-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	5	80,41	50,25			
AR-1-2-3-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	6	85,09	53,18			
AR-1-3-1-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	1	59,92	35,18			
AR-1-3-1-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	2	64,25	37,73			
AR-1-3-2-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	3	63,33	36,85			
AR-1-3-2-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	4	64,99	37,81	64,09	37,97	1,94
AR-1-3-3-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	5	65,32	39,69			
AR-1-3-3-K	Islanma-kuruma sonrası b.d.	6	66,74	40,56			

Çizelge B.17 : PX grubu numuneleri, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Num. No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
PX-1-1	Islanma-kuruma sonrası b. d.	1	39,95	26,28			
PX-1-2	Islanma-kuruma sonrası b. d.	2	47,20	29,50			
PX-2-1	Islanma-kuruma sonrası b. d.	3	46,91	30,86	45,90	29,41	1,64
PX-2-2	Islanma-kuruma sonrası b. d.	4	44,67	29,39			
PX-3-1	Islanma-kuruma sonrası b. d.	5	47,70	29,81			
PX-3-2	Islanma-kuruma sonrası b. d.	6	48,97	30,61			

Çizelge B.18 : AR1 grubu numuneleri, donma-çözölme çevrimleri sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Num. No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-1-1-1-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	1	65,36	39,69			
AR-1-1-1-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	2	58,94	35,00			
AR-1-1-2-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	3	62,38	37,69	62,66	37,98	2,65
AR-1-1-2-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	4	62,29	37,63			
AR-1-1-3-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	5	70,27	42,19			
AR-1-1-3-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	6	59,41	35,67			
AR-1-2-1-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	1	78,81	50,40			
AR-1-2-1-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	2	68,13	43,57			
AR-1-2-2-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	3	73,53	46,31	73,98	46,93	2,35
AR-1-2-2-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	4	76,99	48,49			
AR-1-2-3-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	5	74,29	47,09			
AR-1-2-3-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	6	72,13	45,73			
AR-1-3-1-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	1	60,00	35,85			
AR-1-3-1-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	2	70,03	41,84			
AR-1-3-2-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	3	65,05	39,23	66,02	39,46	2,00
AR-1-3-2-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	4	65,45	39,47			
AR-1-3-3-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	5	67,22	39,84			
AR-1-3-3-K	Donma-çözölme sonrası b.d.	6	68,38	40,53			

Çizelge B.19 : PX grubu numuneleri, donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Num. No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
PX-1-1	Donma-çözülme sonrası b.d.	1	49,76	32,74	49,89	33,10	0,56
PX-1-2	Donma-çözülme sonrası b.d.	2	48,95	32,20			
PX-2-1	Donma-çözülme sonrası b.d.	3	47,70	33,03			
PX-2-2	Donma-çözülme sonrası b.d.	4	50,98	33,54			
PX-3-1	Donma-çözülme sonrası b.d.	5	50,72	33,37			
PX-3-2	Donma-çözülme sonrası b.d.	6	51,25	33,72			

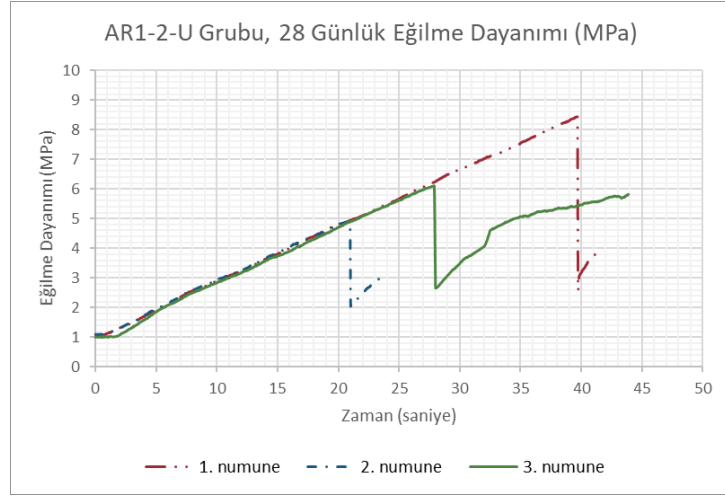
Çizelge B.20 : AR1 grubu numuneleri, yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Num. No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
AR-1-1-1-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	1	78,66	49,16	76,96	48,10	0,80
AR-1-1-1-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	2	76,48	47,80			
AR-1-1-2-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	3	77,23	48,26			
AR-1-1-2-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	4	75,15	46,96			
AR-1-1-3-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	5	-	-			
AR-1-1-3-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	6	77,30	48,31			
AR-1-2-1-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	1	75,47	47,17	74,90	46,81	4,85
AR-1-2-1-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	2	77,31	48,32			
AR-1-2-2-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	3	69,30	43,31			
AR-1-2-2-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	4	80,04	50,03			
AR-1-2-3-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	5	84,43	52,77			
AR-1-2-3-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	6	62,82	39,26			
AR-1-3-1-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	1	65,26	40,79	60,19	37,62	2,49
AR-1-3-1-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	2	62,81	39,26			
AR-1-3-2-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	3	62,25	38,91			
AR-1-3-2-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	4	59,52	37,20			
AR-1-3-3-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	5	56,33	35,21			
AR-1-3-3-K	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	6	54,99	34,37			

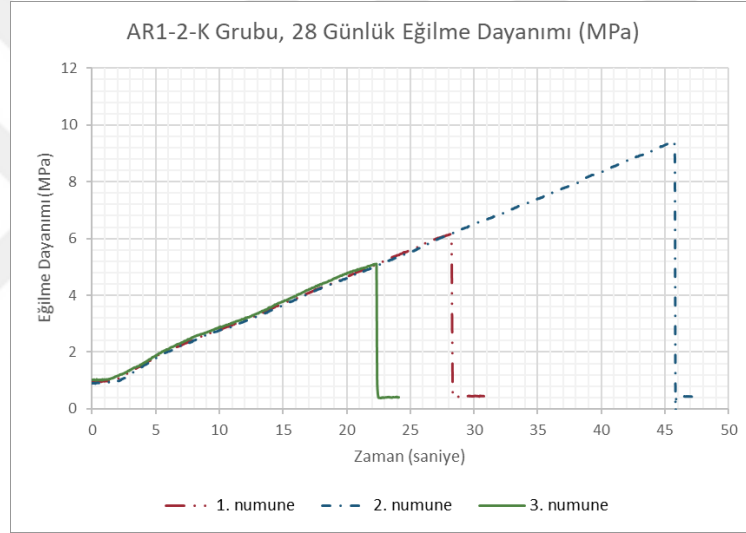
Çizelge B.21 : PX grubu numuneleri, yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune İsmi	Deney Tipi	Num. No.	Basınç Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ort. Basınç Yüğü (kN)	Ort.Basınç Dayanımı (Mpa)	Std. Sapma (Mpa)
PX-1-1	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	1	47,29	29,56			
PX-1-2	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	2	54,07	33,79			
PX-2-1	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	3	46,49	29,05	52,60	32,88	3,21
PX-2-2	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	4	52,92	33,07			
PX-3-1	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	5	54,44	34,02			
PX-3-2	Yüksek sıcaklık sonrası b.d.	6	60,41	37,76			

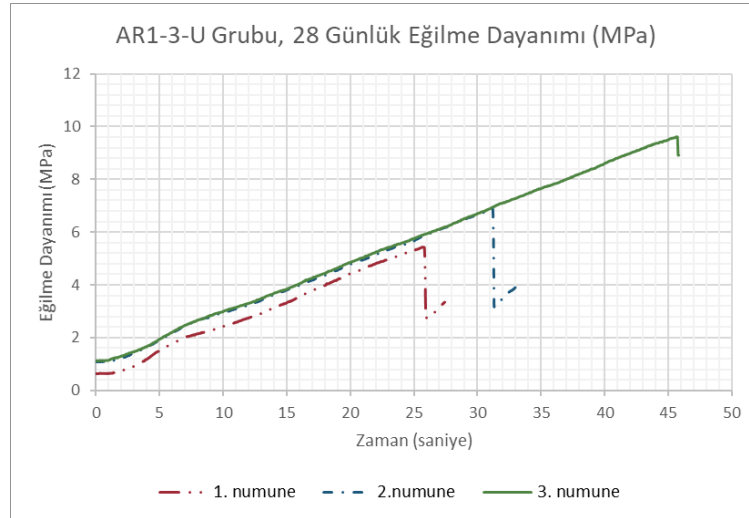
EK C



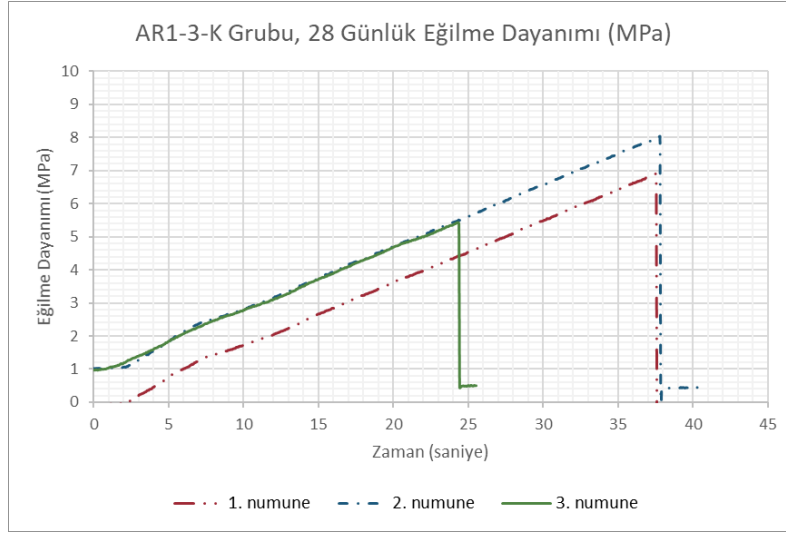
Şekil C.1 : AR1-2-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



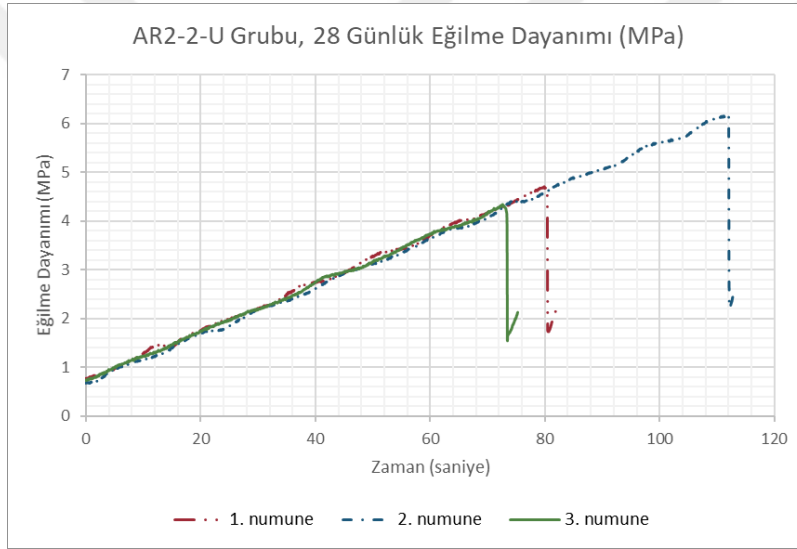
Şekil C.2 : AR1-2-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



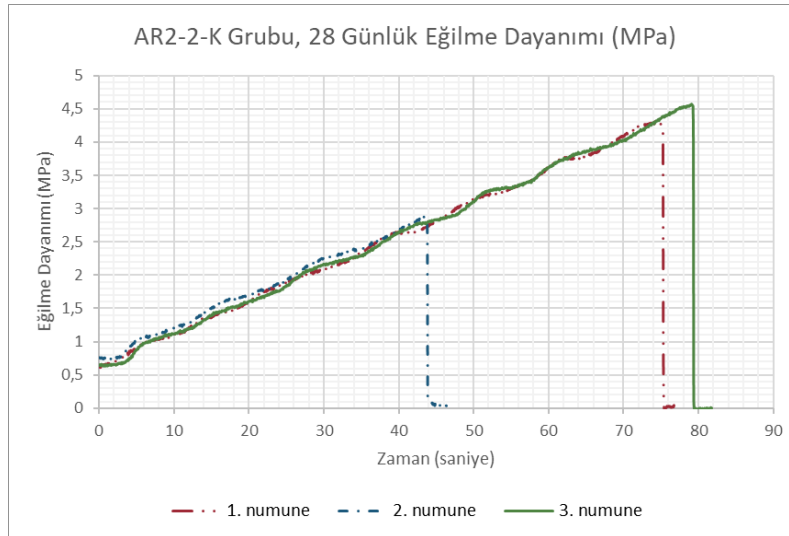
Şekil C.3 : AR1-3-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



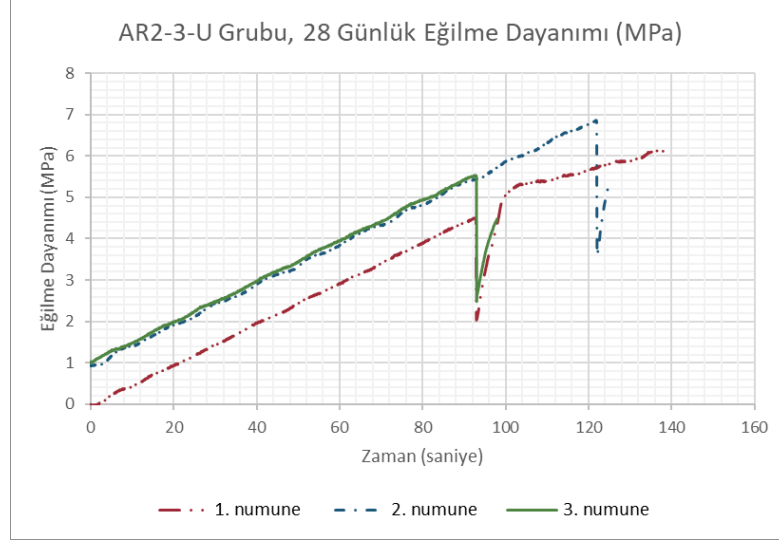
Şekil C.4 : AR1-3-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



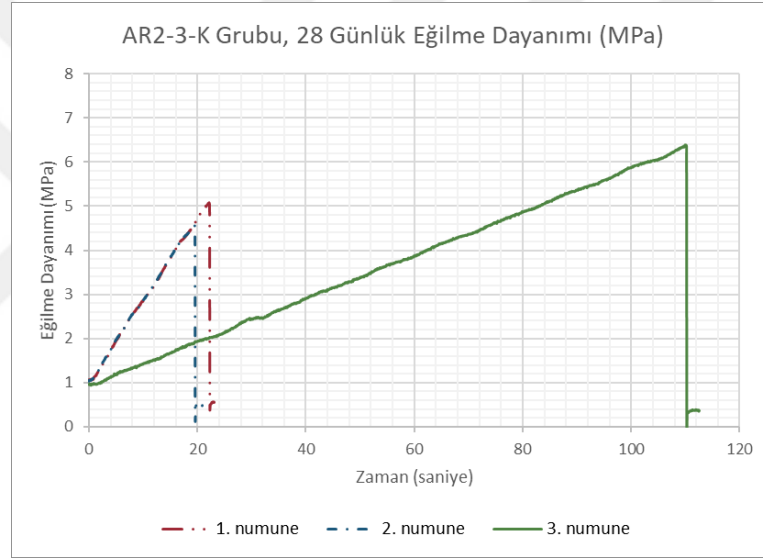
Şekil C.5 : AR2-2-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



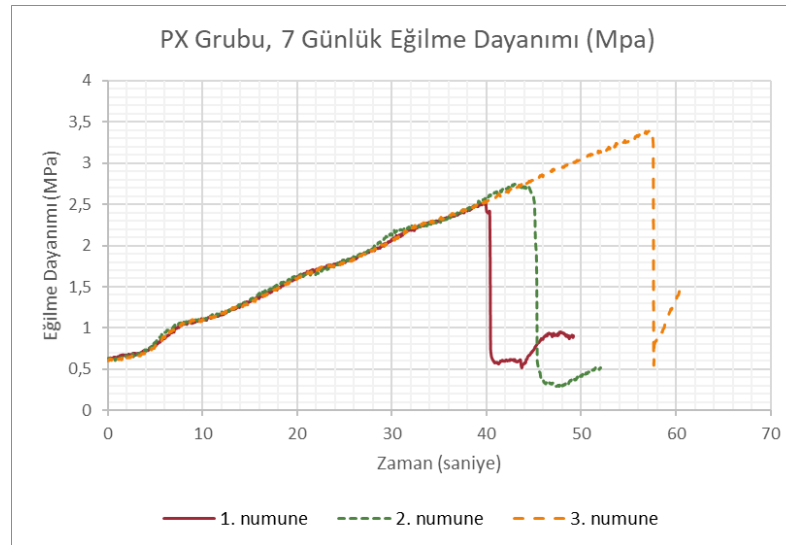
Şekil C.6 : AR2-2-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



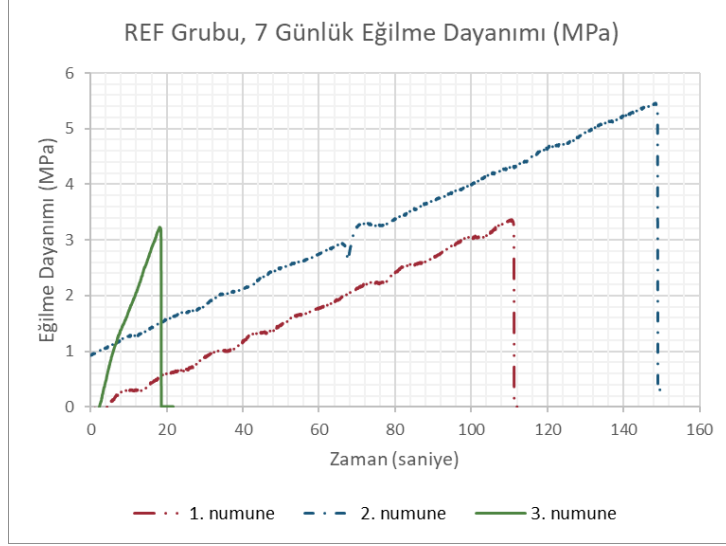
Şekil C.7 : AR2-3-U grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



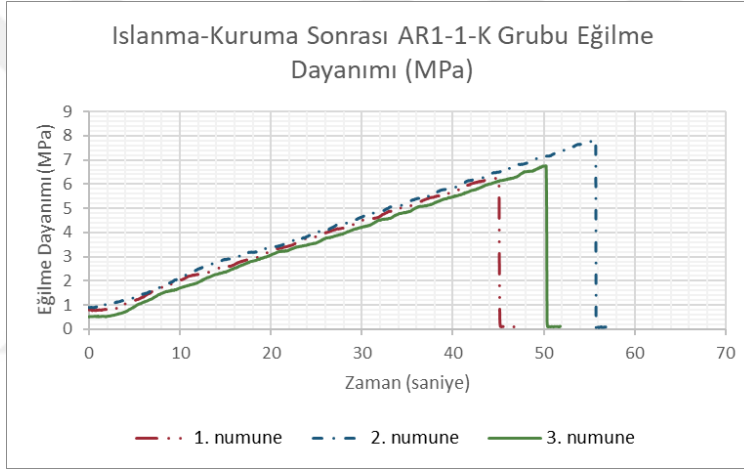
Şekil C.8 : AR2-3-K grubu, 28 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



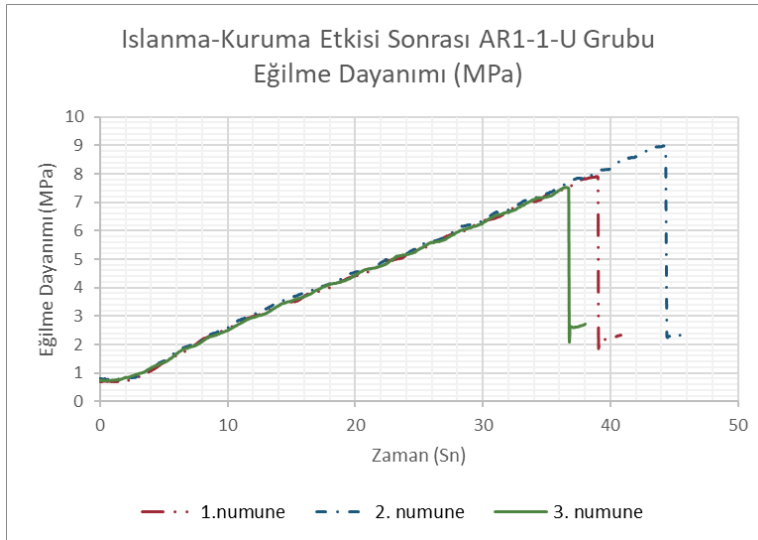
Şekil C.9 : PX grubu, 7 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



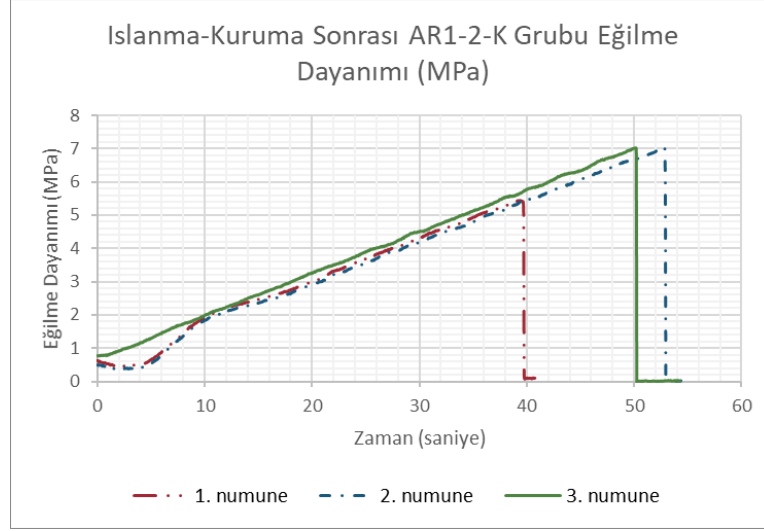
Şekil C.10 : REF grubu, 7 günlük eğilme dayanımı-zaman grafiği.



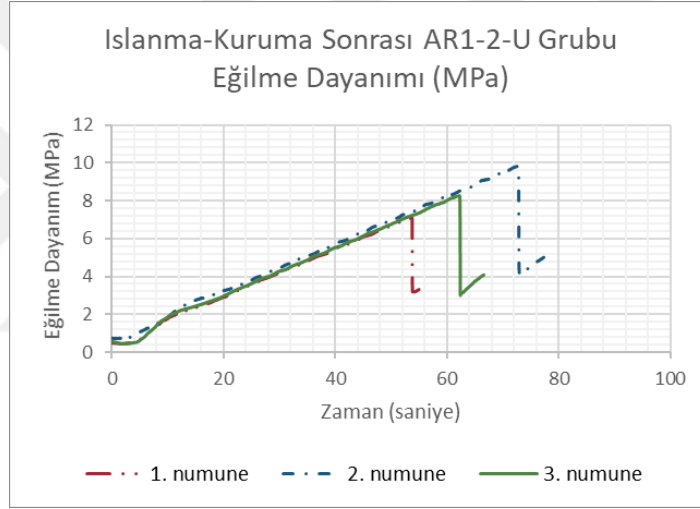
Şekil C.11 : Islanma-kuruma sonrası AR1-1-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



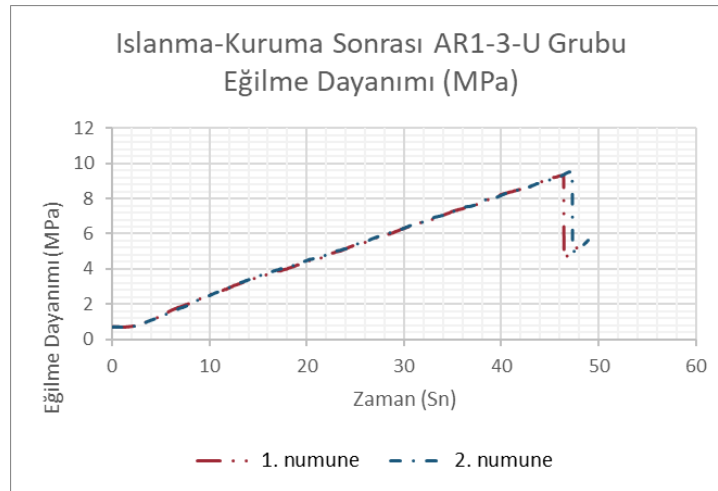
Şekil C.12 : Islanma-kuruma sonrası AR1-1-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



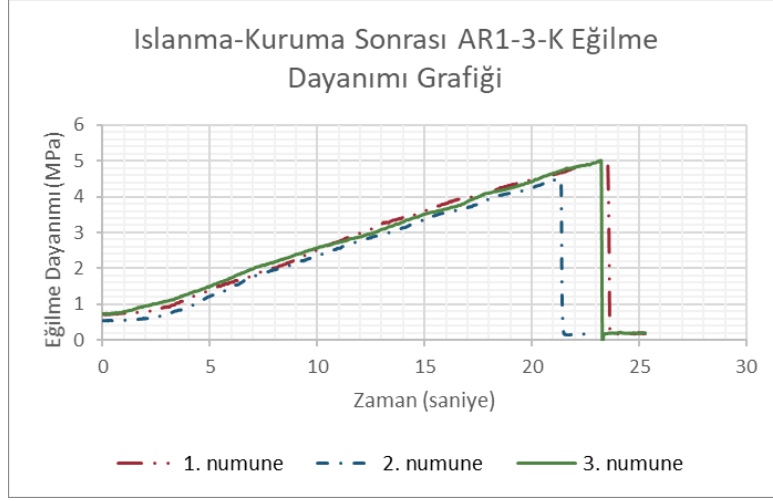
Şekil C.13 : Islanma-kuruma sonrası AR1-2-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



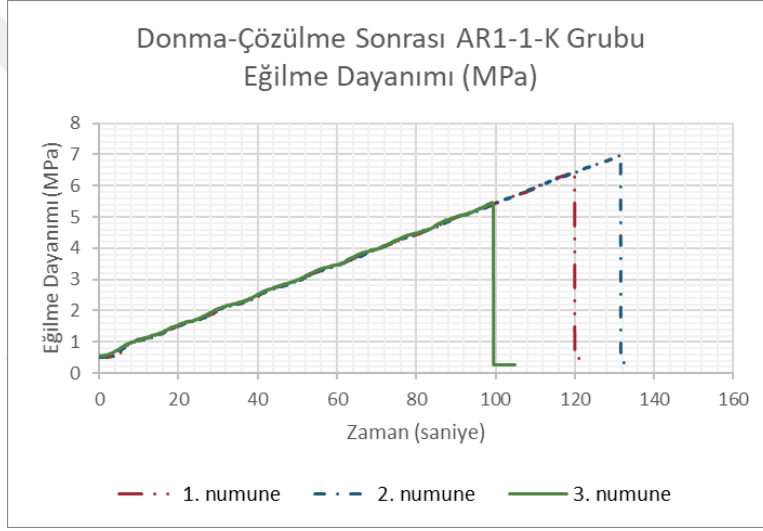
Şekil C.14 : Islanma-kuruma sonrası AR1-2-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



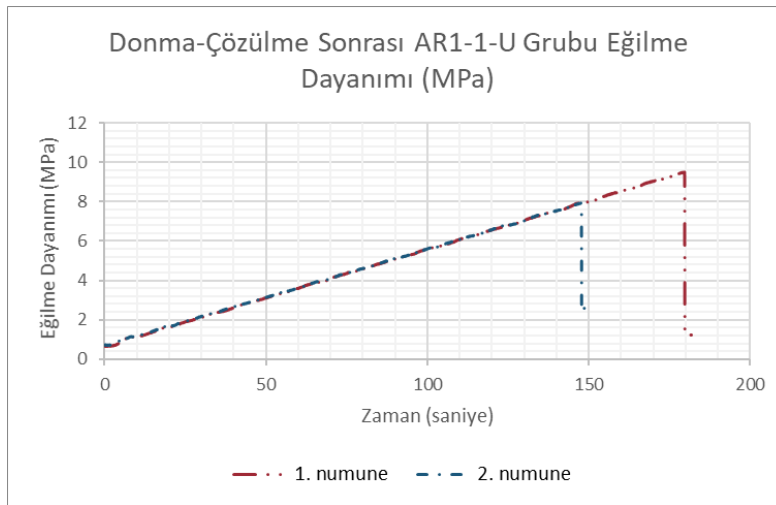
Şekil C.15 : Islanma-kuruma sonrası AR1-3-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



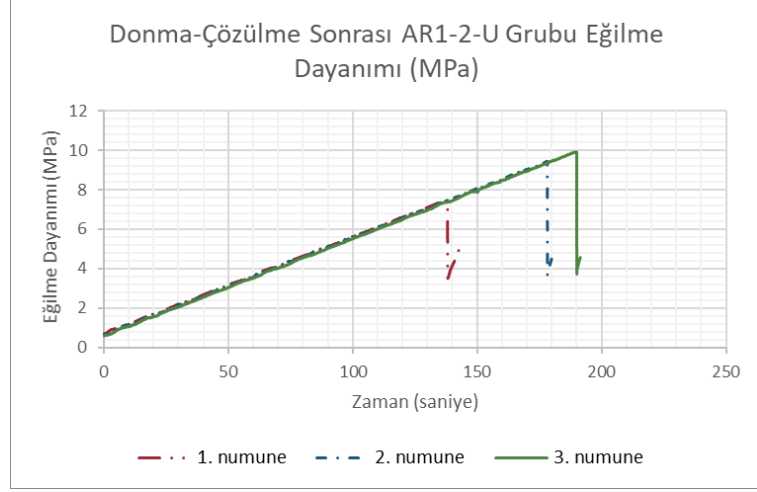
Şekil C.16 : Islanma-kuruma sonrası AR1-3-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



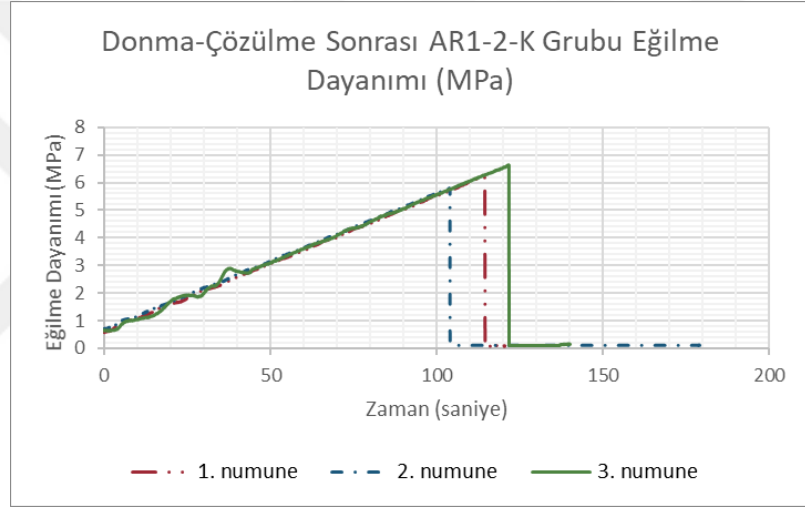
Şekil C.17 : Donma-çözülme sonrası AR1-1-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



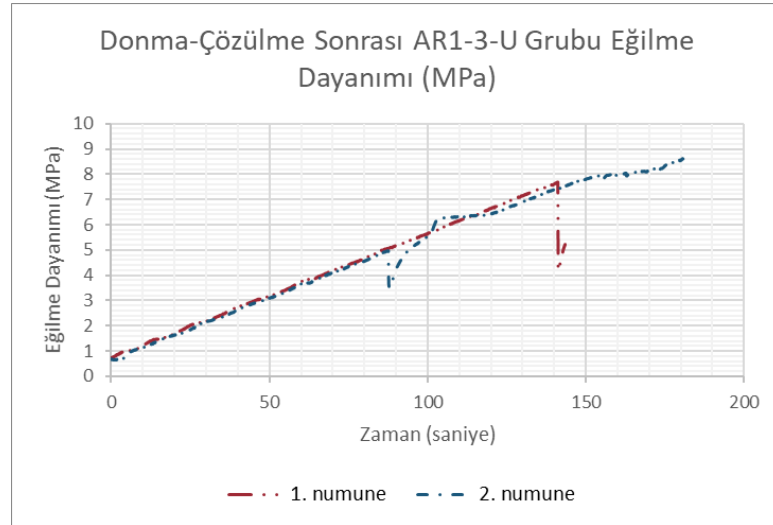
Şekil C.18 : Donma-çözülme sonrası AR1-1-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



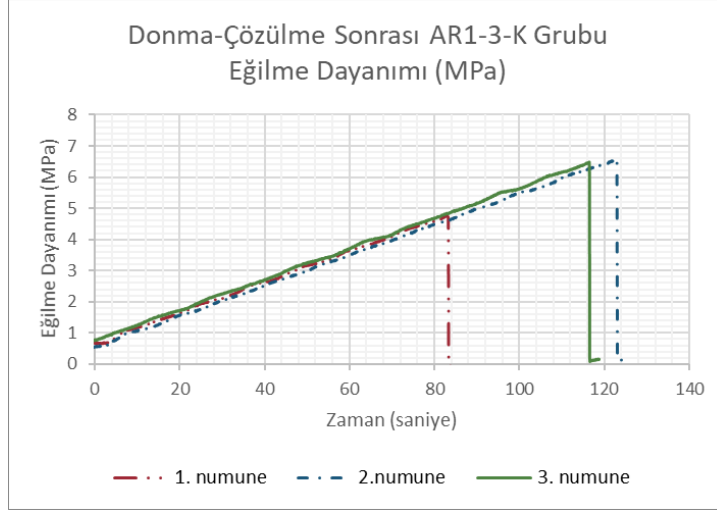
Şekil C.19 : Donma-çözülme sonrası AR1-2-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



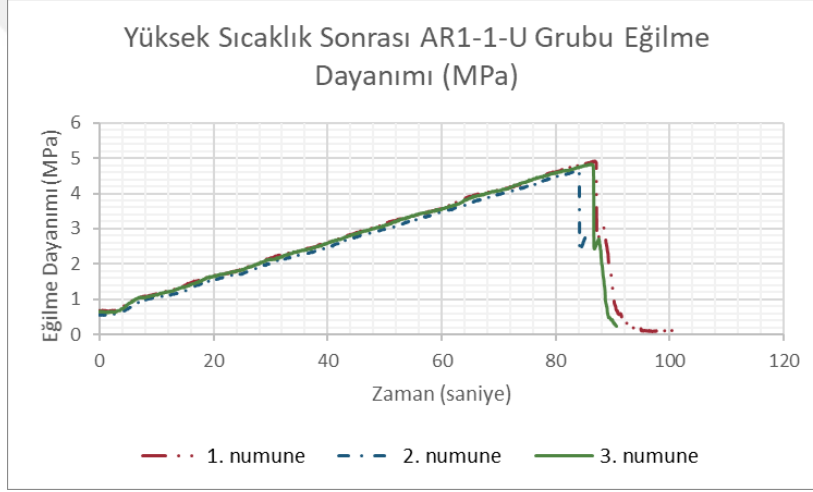
Şekil C.20 : Donma-çözülme sonrası AR1-2-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



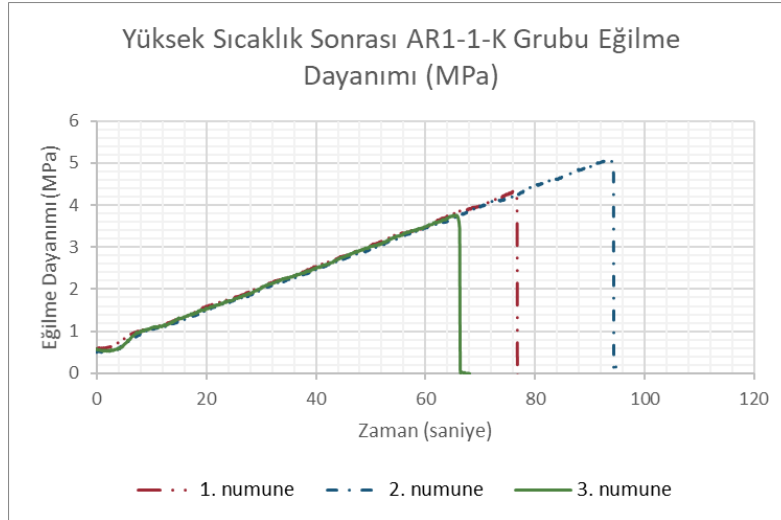
Şekil C.21 : Donma-çözülme sonrası AR1-3-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



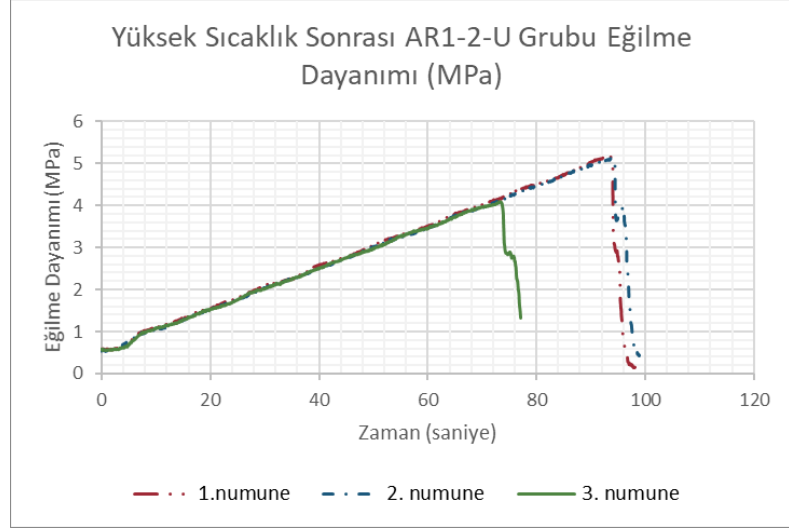
Şekil C.22 : Donma-çözülme sonrası AR1-3-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



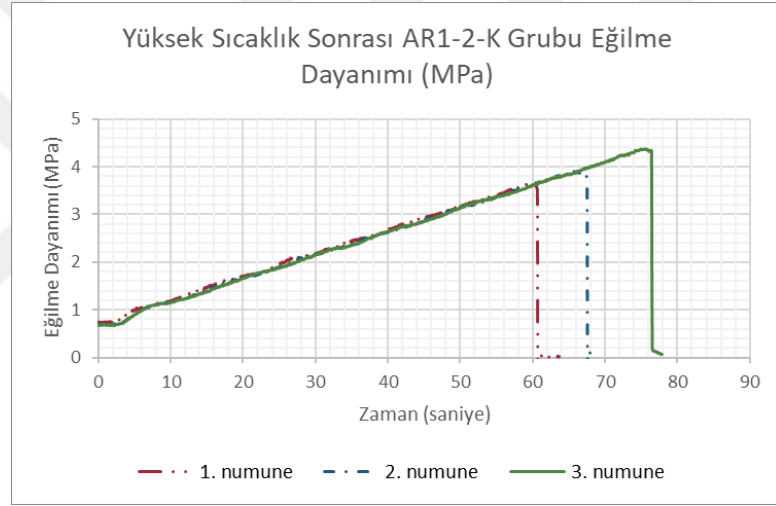
Şekil C.23 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-1-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



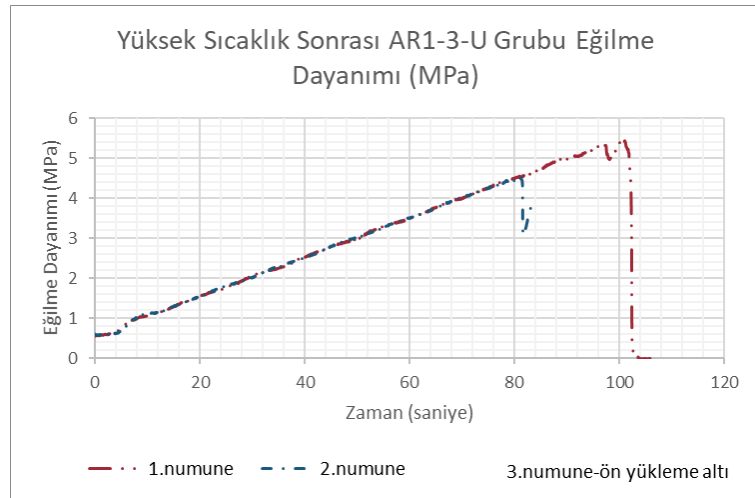
Şekil C.24 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-1-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



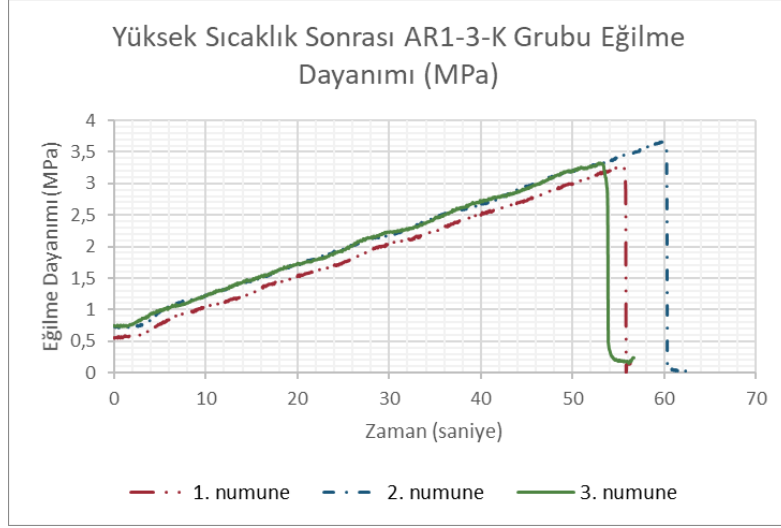
Şekil C.25 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-2-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



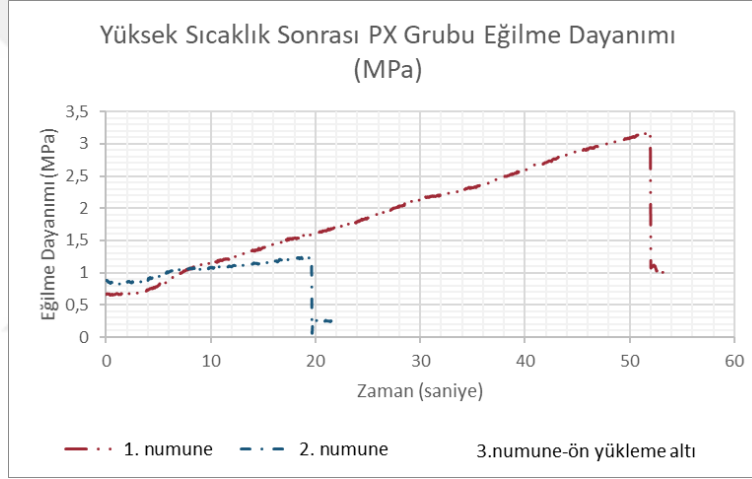
Şekil C.26 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-2-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



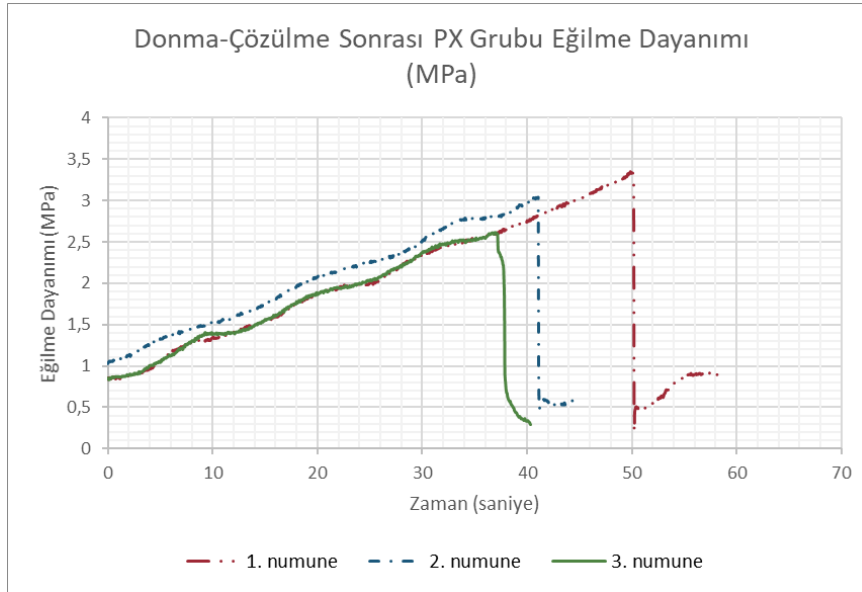
Şekil C.27 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-3-U grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



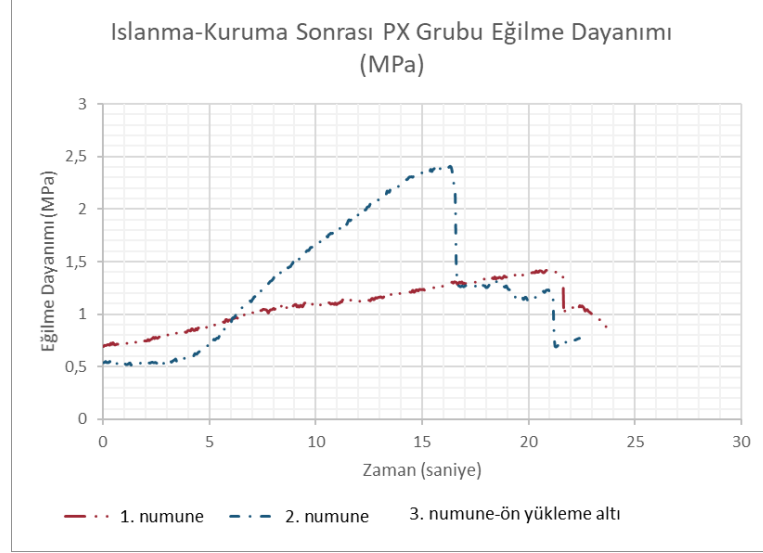
Şekil C.28 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-3-K grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



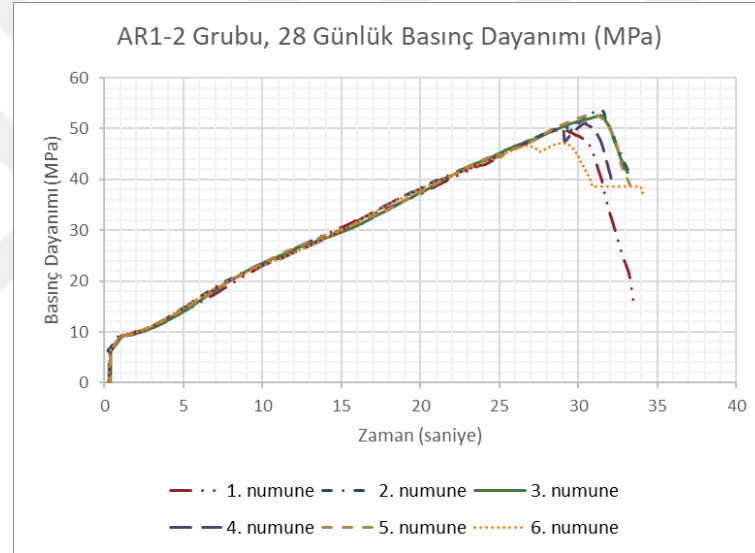
Şekil C.29 : Yüksek sıcaklık sonrası PX grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



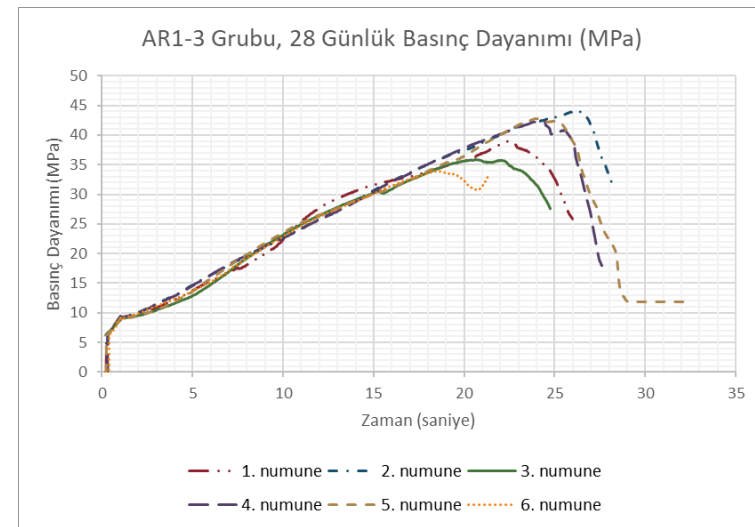
Şekil C.30 : Donma-çözülme sonrası PX grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



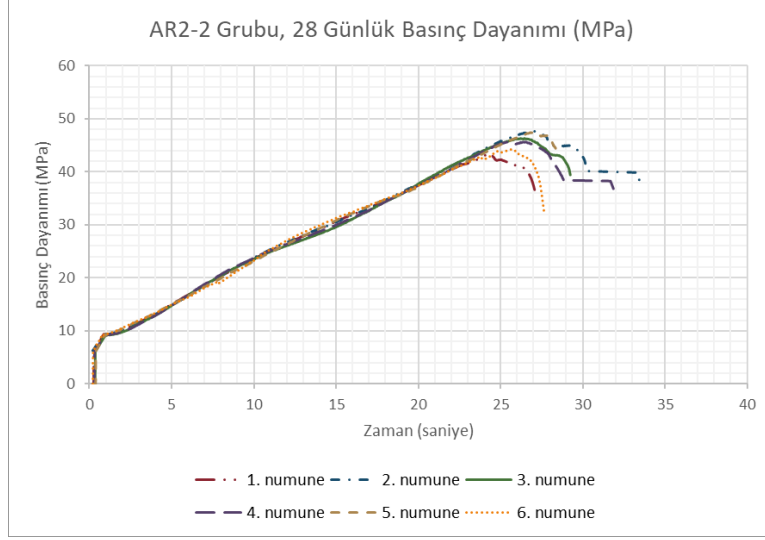
Şekil C.31 : Islanma-kuruma sonrası PX grubu, eğilme dayanımı-zaman grafiği.



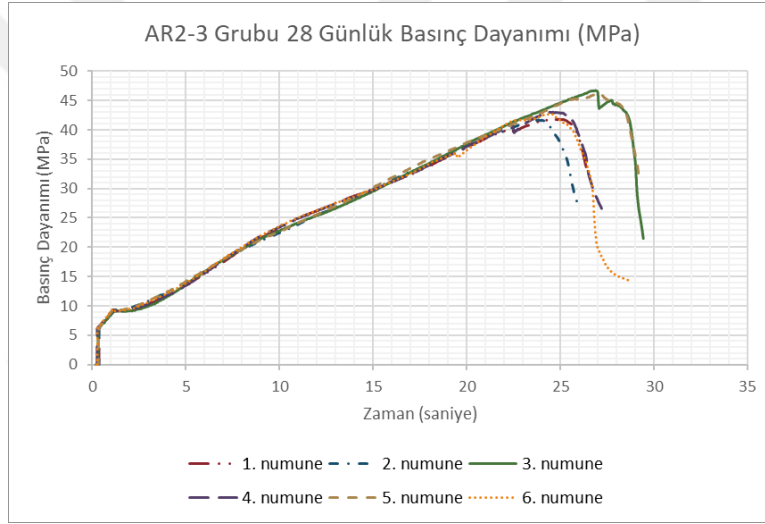
Şekil C.32 : AR1-2 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.



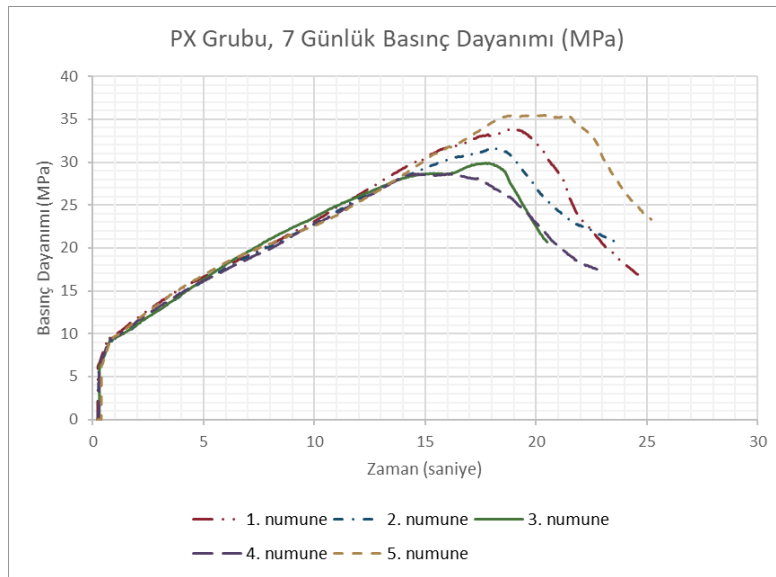
Şekil C.33 : AR1-3 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.



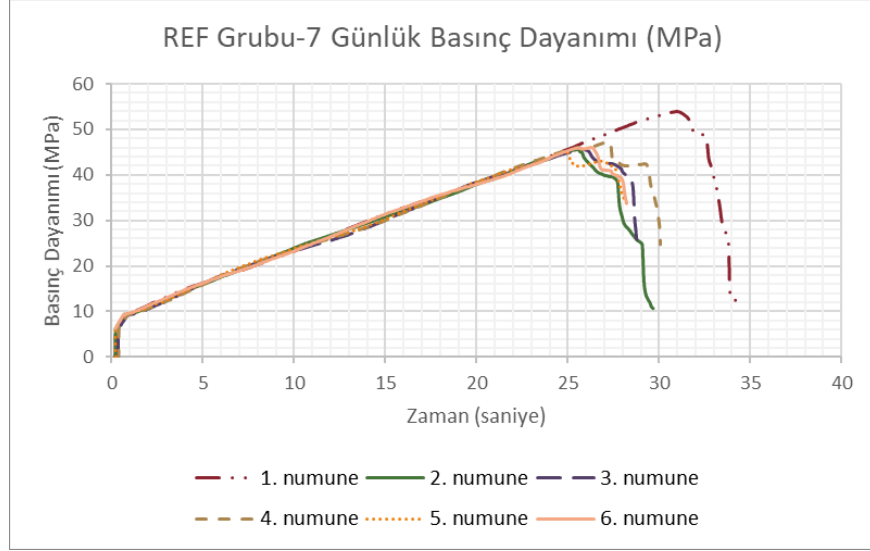
Şekil C.34 : AR2-2 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.



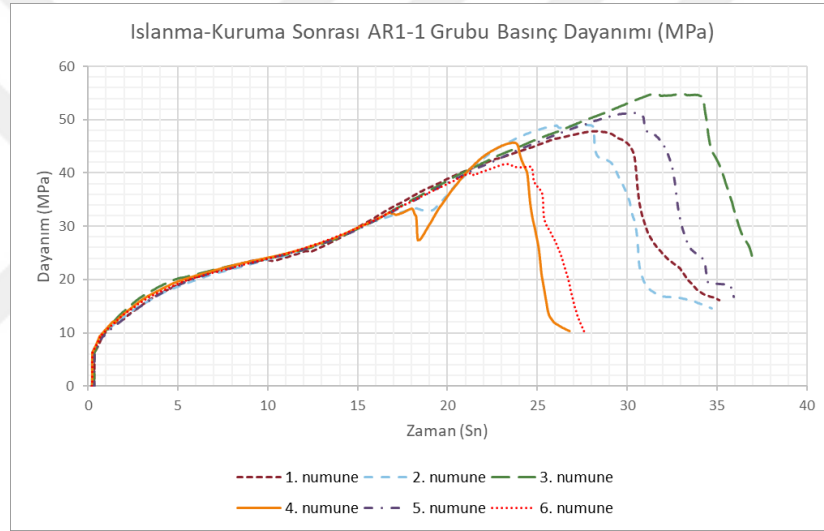
Şekil C.35 : AR2-3 grubu, 28 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.



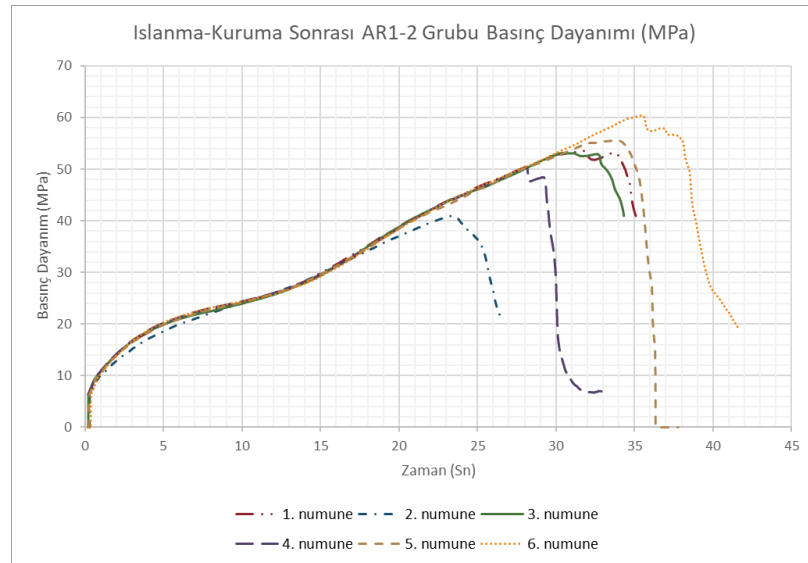
Şekil C.36 : PX grubu, 7 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.



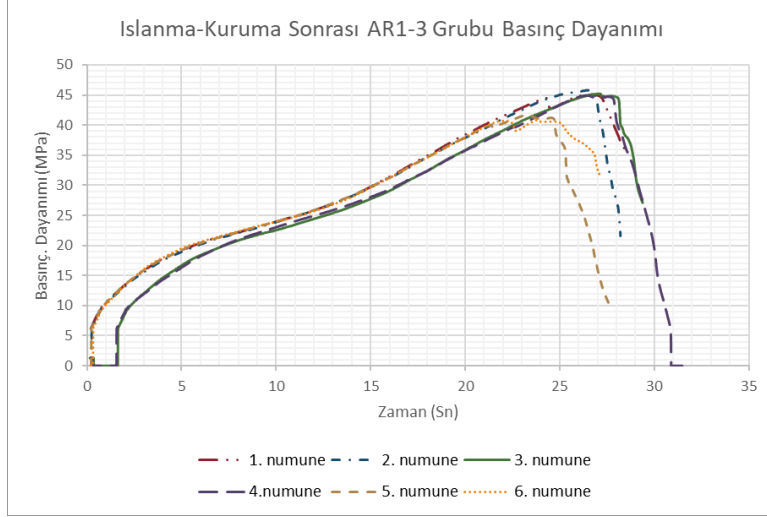
Şekil C.37 : REF grubu, 7 günlük basınç dayanımı-zaman grafiği.



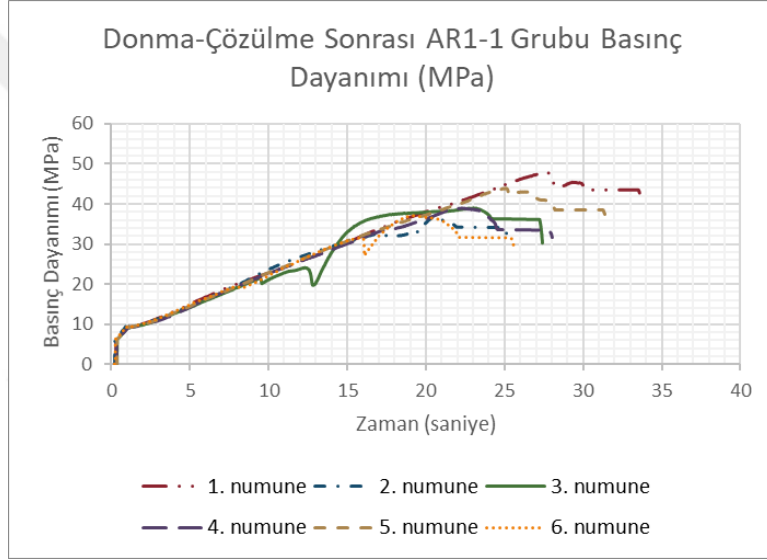
Şekil C.38 : Islanma-kuruma sonrası AR1-1 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



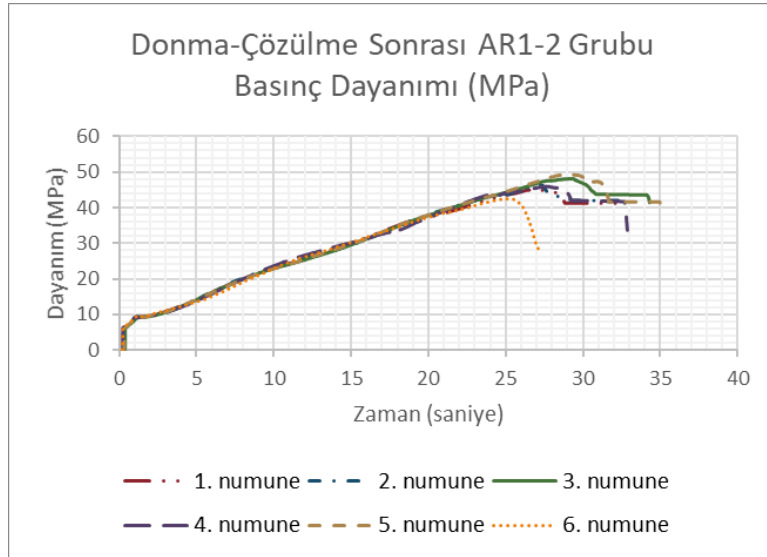
Şekil C.39 : Islanma-kuruma sonrası AR1-2 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



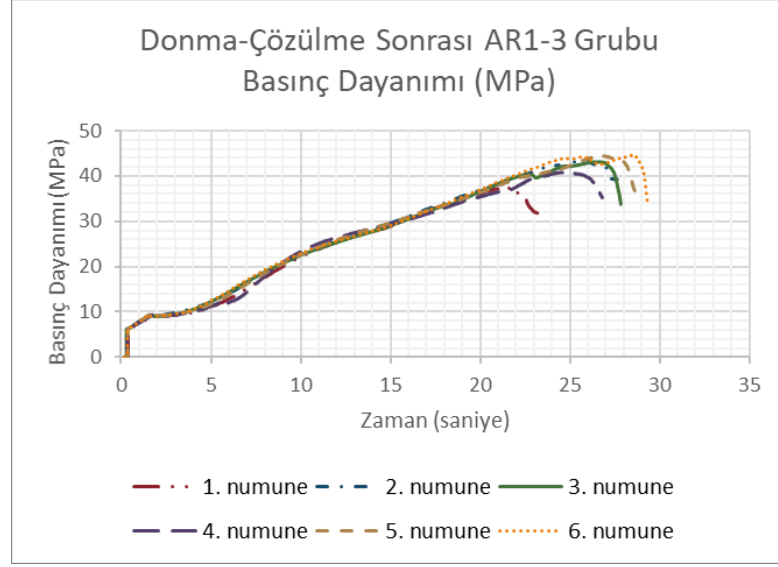
Şekil C.40 : Islanma-kuruma sonrası AR1-3 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



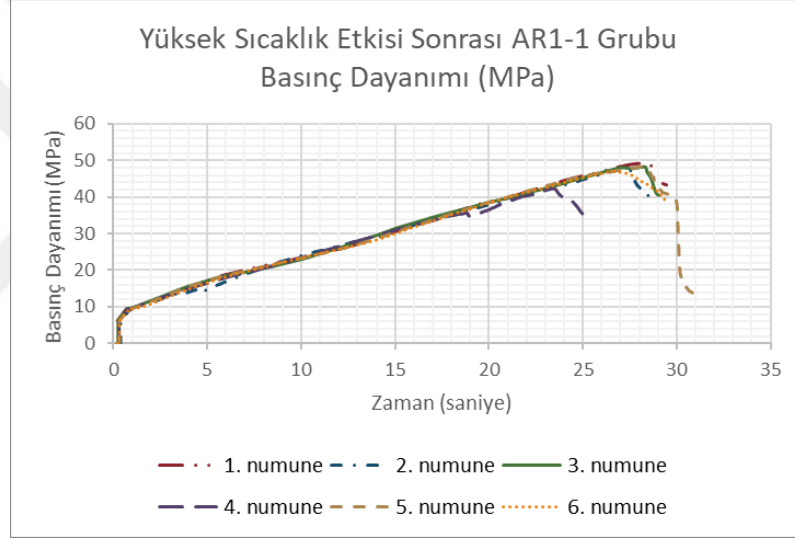
Şekil C.41 : Donma-çözülme sonrası AR1-1 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



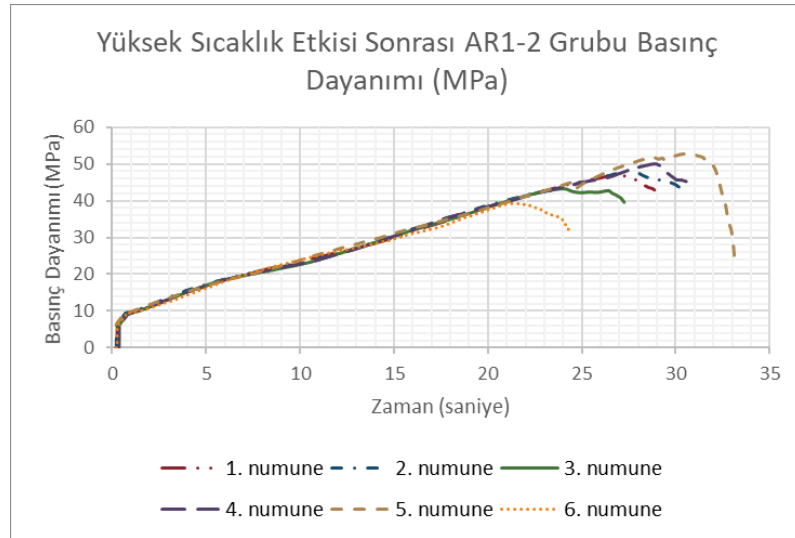
Şekil C.42 : Donma-çözülme sonrası AR1-2 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



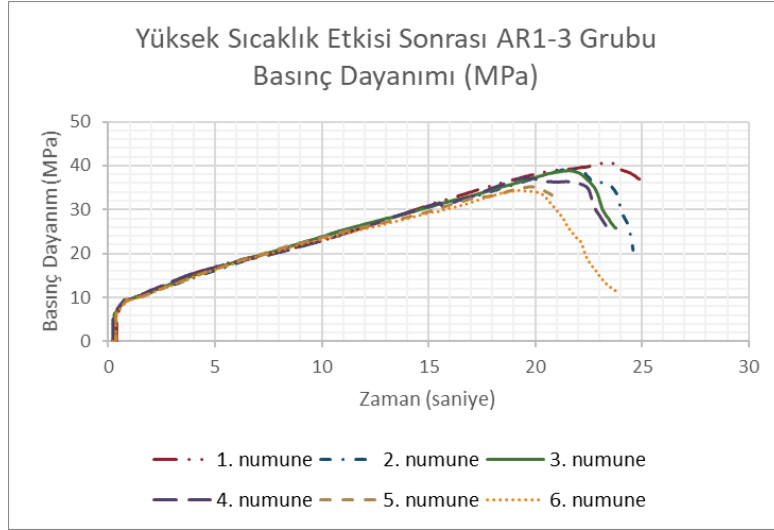
Şekil C.43 : Donma-çözülme sonrası AR1-3 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



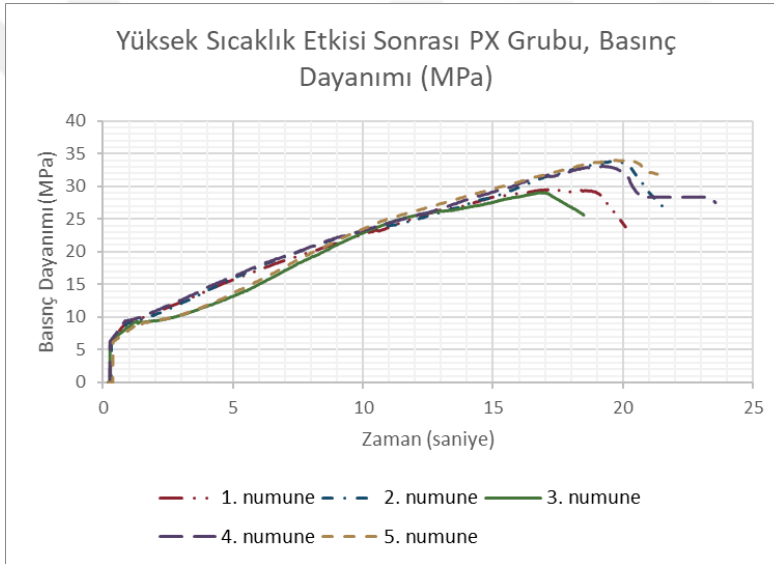
Şekil C.44 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-1 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



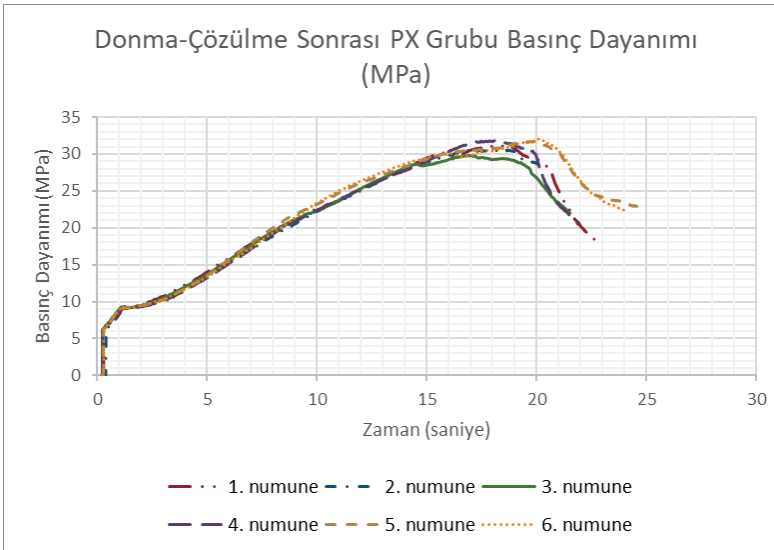
Şekil C.45 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-2 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



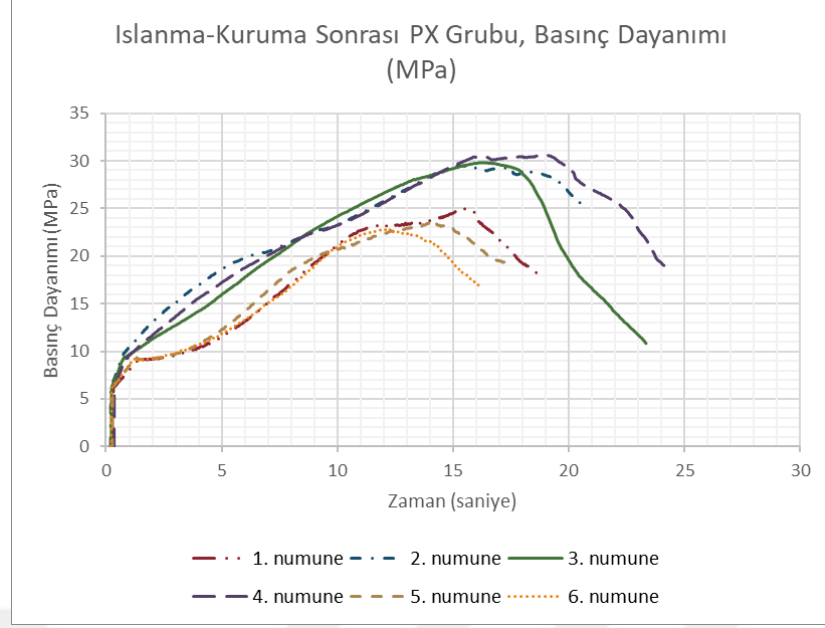
Şekil C.46 : Yüksek sıcaklık sonrası AR1-3 grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



Şekil C.47 : Yüksek sıcaklık sonrası PX grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



Şekil C.48 : Donma-çözülme sonrası PX grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



Şekil C.49 : Islanma-kuruma sonrası PX grubu, basınç dayanımı-zaman grafiği.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Sinem Emanet

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, Mimarlık Bölümü
- **Lisans** : 2018, Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, İnşaat Mühendisi Bölümü (Ç.A.P)
- **Yüksek lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

MESLEKİ DENEYİM

- 2019 yılından beri İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği çalışma biriminde araştırma görevlisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir.

YAYINLAR:

- Çelik O. C., Bal A., Atasever K., Emanet S., Koca S., Reconnaissance Investigation Following the January 24th, 2020 Doğanyol (Malatya) -Sivrice (Elazığ) Earthquake (Mw 6.7 - East Anatolian Fault Zone) 24 Ocak 2020 Doğanyol (Malatya)-Sivrice (Elazığ) Depremi'nden Gözlemler (Mw 6.7-Doğu Anadolu Fay Zonu), Beton Prefabrikasyon Dergisi, ISSN 1300—3488, S:134, 2020

