

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REAKTİF PUDRA BETONLARININ MEKANİK
DAVRANIŞINA KATI LAŞMA SÜRESİNCE
UYGULANAN SIKIŞTIRMA BASINCININ ETKİLERİ

DOKTORA TEZİ

Metin İPEK

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 10 / 03 /2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Fevziye AKÖZ
Jüri Başkanı

Prof. Dr.
Kemalettin YILMAZ
Üye

Prof. Dr.
İlker Bekir TOPÇU
Üye

Doç. Dr.
Mehmet SARIBIYIK
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Mansur SÜMER
Üye

ÖNSÖZ

Yapılan bu tez çalışmasında sadece bilimsel olarak özgün bölümler bulunmamakta ayrıca RPB üretiminde rehber olabilecek bölümler de yer almaktadır. Özellikle RPB’de kullanılan malzemeler ve üretim tekniği hakkında detaylı bilgiler sunulmaya çalışılmıştır. Tezin amaçlarından olan RPB’lere sıkıştırma basıncı uygulama işlemi ile RPB’nin bünyesindeki boşluklar en az düzeye indirilmiş ve sıkıştırma basıncı kullanılarak üretilen elemanlarda kalite ve ekonomi sağlanacağı gösterilmiştir.

Bu tez çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen ve her türlü desteği veren danışmanım Prof. Dr. Kemalettin Yılmaz’a, teşekkür ederim. Çalışmalarımnda bana yol gösteren ve değerli bilgi birikimini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Mehmet Sarıbyık’a ve Yrd. Doç. Dr. Mansur Sümer’e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma hayatımda bana yol gösteren bölüm başkanım Sayın Prof. Dr. Ahmet Apay’a, tez çalışmalarımındaki yardımlarından dolayı diğer Yapı Eğitimi Bölümü çalışanlarına ve akademik hayata atılmamda bana destek olan Doç. Dr. Seyhan Fırat’a ve Yrd. Doç. Dr. Osman Şimşek’e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarım maddi destek sağlayan Bilimsel Araştırma Projelerinden dolayı Sakarya Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkürlerimi bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarımın malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen Lafarge-Aslan Çimento Firmasına ve yetkilisi İnş. Tek. Ömer Bağdatlı’ya, BEKSA Firmasına ve yetkilisi Yük. İnş. Müh. Mehmet Yerlikaya ve İKSA Firmasına teşekkür ederim.

Doktora öğrencisi olarak aldığım İz Bırakanlar Bursu’ndan dolayı Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği’ne teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bugüne kadar benden desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xviii
SUMMARY.....	xix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
REAKTİF PUDRA BETONU (RPB).....	5
2.1. Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	5
2.1.1. RPB'yi oluşturan malzemeler.....	6
2.1.2. RPB'nin karışım oranları.....	11
2.1.3. RPB'nin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı.....	15
2.1.4. RPB'nin üretim teknolojisi.....	19
2.1.5. RPB'nin kullanım alanları.....	21
2.1.6. RPB ile ilgili literatür taraması.....	29
2.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	37
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	40
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	40
3.1.1. Çimento.....	40

3.1.2. Silis dumanı.....	44
3.1.3. Kuvars pudrası.....	45
3.1.4. Kuvars kumu.....	48
3.1.5. Çelik tel.....	51
3.1.6. Kimyasal katkı.....	52
3.1.6.1. Elektrostatik etki.....	52
3.1.6.2. Stearik etki.....	53
3.1.7. Su.....	54
3.2. Ön Deneyler.....	56
3.2.1. Deney numunelerinin üretilmesi.....	56
3.2.2. Deneylerde kullanılan yöntem.....	58
3.2.2.1. Karışımın belirlenmesi.....	59
3.2.2.2. Lif oranının belirlenmesi.....	66
3.2.2.3. Lif oranının basınç numunelerinde belirlenmesi.....	66
3.2.2.4. Lif oranının eğilme numunelerinde belirlenmesi.....	68
3.2.2.5. Lif oranının optimizasyonu.....	75
3.2.2.6. Kür tipinin belirlenmesi.....	77
3.3. Deneyler.....	81
3.3.1. Katılaşma süresince sıkıştırma basıncının uygulanması.....	81
3.3.1.1. Basınç numunelerine uygulanması.....	81
3.3.1.2. Basıncıta sıkıştırma basıncının optimizasyonu.....	89
3.3.1.3. Eğilme numunelerine uygulanması	90
3.3.1.4. Eğilmede sıkıştırma basıncının optimizasyonu.....	98

BÖLÜM 4.

DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	100
4.1. Karışımın Belirlenmesi.....	100
4.2. Lif Oranının Belirlenmesi.....	116
4.2.1. Lif oranının basınç numunelerine etkisi.....	116
4.2.1.1. Lif oranının basınç dayanımına etkisi.....	117
4.2.1.2. Lif oranının elastisite modülü ve poisson oranına etkisi.....	118
4.2.2. Lif oranının eğilme numunelerine etkisi.....	127

4.2.3. Lif oranının birim dayanım maliyetine etkisi.....	141
4.2.4. Optimum lif oranının belirlenmesi.....	143
4.3. Kür Tipinin Belirlenmesi.....	148
4.4. Katılma Süresince Uygulanan Sıkıştırma Basıncının Etkileri.....	154
4.4.1. Sıkıştırma basıncının basınç numunelerine etkisi.....	154
4.4.1.1. RPB'ye revibrasyon uygulaması.....	157
4.4.1.2. Sıkıştırma basıncının birim hacim ağırlığa etkisi.....	159
4.4.1.3. Sıkıştırma basıncının basınç dayanımına etkisi.....	161
4.4.1.4. Sıkıştırma basıncının elastisite modülüne etkisi.....	168
4.4.1.5. Sıkıştırma basıncının birim dayanım maliyetine etkisi.....	171
4.4.1.6. Optimum sıkıştırma basıncının belirlenmesi.....	173
4.4.2. Sıkıştırma basıncının eğilme numunelerine etkisi.....	175
4.4.2.1. Eğilme numunelerinde sıkıştırma basıncının birim hacim ağırlığa etkisi	176
4.4.2.2. Eğilme numunelerinde sıkıştırma basıncının eğilme parametrelerine etkisi.....	178
4.4.2.3. Eğilme numunelerinde sıkıştırma basıncının birim dayanım maliyetine etkisi	194
4.4.2.4. Eğilme numunelerinde optimum sıkıştırma basıncının belirlenmesi.....	196
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	199
KAYNAKLAR.....	208
EKLER.....	217
ÖZGEÇMİŞ.....	232

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Numune kesit alanı (mm^2)
a	: Fuller eğrisi derecesi
AHP	: Analitik hiyerarşi yaklaşımı
ASTM	: American Society for Testing and Materials
b	: Numune kesitinin genişliği (mm)
c	: Normalizasyon işlemi sonucu bulunan değer
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
Ca(OH)_2	: Kalsiyum hidroksit
Ç	: Çimento
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton
ÇYDB	: Çok Yüksek Dayanımlı Betonlar
D_{max}	: Agrega yığınının en büyük tane çapı
DSP	: Ultra İncelikteki Taneleri İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler
d	: Elek ya da tane çapı
d_0	: Kalıptaki betonun yoğunluğu
d_s	: Taneli karışımın sıkıştırılmış olarak varsayılan katı yoğunluğu
E	: Elastisite modülü (MPa)
EDS	: Energy dispersive spectroscopy
E_k	: Normalizasyon uygulanacak sütundaki en küçük gerçek değer
E_b	: Normalizasyon uygulanacak sütundaki en büyük gerçek değer
ε_x	: Yanal birim deformasyon
ε_y	: Eksenel birim deformasyon
G_f	: Kırılma enerjisi (N/m)
g	: Yer çekimi ivmesi
h	: Numune kesitinin yüksekliği (mm)
I_5	: Elastik şekil değiştirme indeksleri (3 δ)

I_{10}	: Elastik şekil değiştirme indeksleri (5,5δ)
I_{20}	: Elastik şekil değiştirme indeksleri (10,5δ)
K	: Toplam doluluk oranı
KP	: Kuvars pudrası
$K_{1,2}$: İki malzemenin birleşiminin doluluk oranı
k_0	: Tane gruplarının doluluk oranı
k_1	: 1. Tane grubunun doluluk oranı
k_2	: 2. Tane grubunun doluluk oranı
l	: Mesnetler arası uzaklık (mm)
M	: % Kümülatif geçen
m	: Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)
MDF	: Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurlar
MIP	: Civalı porozimetre
n	: Tane grubu sayısı
O	: Oksijen
P	: Kırılma yükü (N)
P_e	: Net Kırılma yükü (N)
RPB	: Reaktif Pudra Betonu
RPB200	: Basınç dayanımı 170 - 230 MPa arasında olan RPB
RPB800	: Basınç dayanımı 490-810 MPa arasında olan RPB
$R_{5,10}$: Birincil Kalıcı dayanım faktörleri
$R_{10,20}$: İkinicil Kalıcı dayanım faktörleri
s	: Su
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SD	: Silis dumanı
SIFCON	: Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton
SiO_2	: Silisyum dioksit
TL	: Türk Lirası
TMA	: Türkiye imento Müstahsilleri Birliği
TS	: Türkiye Standartları Enstitüsü
UYPB	: Ultra Yüksek Performanslı Betonlar
W_o	: Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan-tokluk (Nm)
YDB	: Yüksek Dayanımlı Betonlar

XRD	: X ışını difraksiyon analizleri
z	: Normalizasyon uygulanacak gerçek değer
ν	: Poisson oranı
σ	: Basınç dayanımı (MPa)
σ_e	: Net eğilme dayanımı (MPa)
δ_0	: Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)
δ	: Kiriş açıklığının 1/150 değerindeki sehim
$\sigma_{e\delta}$: Tokluğa bağlı eşdeğer eğilme dayanımı (MPa)
1.KK	: 100-300 μm tane aralığındaki kuvars kumu
2.KK	: 300-600 μm tane aralığındaki kuvars kumu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Gerilmeye bağlı olarak şekil değiştirme yüzdeleri.....	3
Şekil 2.1.	Sherbrooke şehrindeki yaya köprüsü.....	6
Şekil 2.2.	Boşlukları doldurma malzemesi ve puzolanın, betonun basınç dayanımına etkisi.....	9
Şekil 2.3.	Su içeriği ile relatif yoğunluktaki değişimi.....	13
Şekil 2.4.	Normal harç, çelik tel donatılı beton ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun (RPB) eğilme davranışı.....	18
Şekil 2.5.	Normal harç ve lif katkılı RPB200'ün eğilme davranışı.....	19
Şekil 2.6.	Karışım işlemi süresince güç tüketimi.....	20
Şekil 2.7.	Sherbrooke şehrindeki, RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü giriş kesiti.....	23
Şekil 2.8.	Shepherds ırmağı üzerindeki, RPB kullanılarak yapılan ilk araç köprüsü girişi.....	24
Şekil 2.9.	RPB'den araştırma amaçlı yapılmış köprü ve girişi.....	25
Şekil 2.10.	Wapello'daki, RPB kullanılarak yapılan şehir köprüsü girişleri....	25
Şekil 2.11.	Sunyudo'da üzerinde RPB kullanılarak yapılan ilk köprünün giriş kesiti.....	26
Şekil 2.12.	Sunyudo'da üzerinde RPB kullanılarak yapılan ilk yaya köprüsü.	26
Şekil 2.13.	Sakata-Mirai RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü girişleri.....	27
Şekil 2.14.	Papatoetoe ve Penrose RPB kullanılarak yapılan üst geçit köprüsü girişleri.....	27
Şekil 2.15.	RPB kullanılarak yapılan yaya kaldırımı elemanı.....	28
Şekil 2.16.	RPB kullanılarak yapılan ankraj plakası.....	28
Şekil 2.17.	RPB kullanılarak yapılan ses bariyeri.....	28
Şekil 2.18.	RPB kullanılarak yapılan yağmur suyu ızgaraları ve rögar kapağı.....	29

Şekil 2.19.	Eğilme testi için tamir malzemeli ve malzemesiz numune boyutları a) Tamir harcı/normal beton yada RPB/normal beton numune boyutları b) Normal beton, tamir harcı ve RPB numune boyutları.....	33
Şekil 2.20.	Basınç testi için tamir malzemeli numune boyutları.....	34
Şekil 2.21.	RPB'nin güçlendirmede kullanılması.....	34
Şekil 3.1.	Çimento taneleri SEM görüntüsü.....	42
Şekil 3.2.	Silis dumanı taneleri ve EDS analizi.....	45
Şekil 3.3.	Kuvars pudrası EDS analizi.....	47
Şekil 3.4.	Taneli malzemelerin granülometri eğrisi.....	51
Şekil 3.5.	Su azaltıcı katkıların dağıtma etkisi a) topaklaşmış hamur; b) katkılı hamur.....	53
Şekil 3.6.	Katkıların stearik etkisi.....	54
Şekil 3.7.	RPB için tasarlanmış mikser.....	56
Şekil 3.8.	Deney akış şeması.....	58
Şekil 3.9.	Taneli malzemelerin karışım teorisi.....	60
Şekil 3.10.	Bilgisayar programının ara yüzü ve ikili karışım için girilen değerler.....	62
Şekil 3.11.	Bilgisayar programının ara yüzü ve üçlü karışım için girilen değerler.....	62
Şekil 3.12.	İkili karışımın doluluk haritası.....	63
Şekil 3.13.	Üçlü karışımın doluluk haritası.....	63
Şekil 3.14.	Bilgisayar programı tarafından oluşturulan karışımın tane dağılımı.....	64
Şekil 3.15.	Bilgisayar programı tarafından oluşturulan karışım ile bir malzemenin karıştırılması.....	64
Şekil 3.16.	Bilgisayar programı tarafından oluşturulan karışım ile başka bir karışımın karıştırılması.....	65
Şekil 3.17.	Elastisite modülü ve poisson oranı ölçüm düzeneği.....	67
Şekil 3.18.	Eğilme deneyi numune ve yükleme şekli.....	69
Şekil 3.19.	Eğilme deney düzeneği.....	70
Şekil 3.20.	Örnek yük sehim eğrisi grafiği.....	71
Şekil 3.21.	Yük sehim grafiği ve kırılma tokluğu.....	73

Şekil 3.22.	Optimum lif oranının belirlenmesinde kullanılan hiyerarşi sistemi.	76
Şekil 3.23.	Küp numunelerin kalıp resmi.....	78
Şekil 3.24.	Kür tankı ve fırın.....	79
Şekil 3.25.	Kür uygulama grafiği.....	79
Şekil 3.26.	Termal gerilmeler sonucu zarar görmüş numuneler.....	80
Şekil 3.27.	Beton sıkıştırma kalıbı.....	84
Şekil 3.28.	Beton sıkıştırma kalıbını oluşturan parçalar.....	85
Şekil 3.29.	Beton sıkıştırma kalıbının monte edilmiş durumu.....	86
Şekil 3.30.	Taze haldeki RPB'ye sıkıştırma basıncının uygulanması.....	87
Şekil 3.31.	Sıkıştırma basıncı uygulanmış numuneler.....	87
Şekil 3.32.	Elastisite modülü çerçevesi.....	88
Şekil 3.33.	Optimum sıkıştırma basıncının belirlenmesinde kullanılan hiyerarşi sistemi.....	89
Şekil 3.34.	Tasarlanan kalıbın teknik resmi ve ölçüleri.....	91
Şekil 3.35.	a. Kiriş kalıbının monte edilmiş şeklinin önden görünüşü b. Kiriş kalıbının monte edilmiş şeklinin üstten görünüşü.....	92
Şekil 3.36.	Su ve havanın kalıp içerisinde kalması sonucu, numunede oluşan boşluklar.....	93
Şekil 3.37.	Kalıbın yan kenarlarına açılan su çıkış kanalları.....	93
Şekil 3.38.	Taze haldeki numunenin kalıba doldurulması.....	94
Şekil 3.39.	Sıkıştırma basınç elamanının yerleştirilmesi.....	95
Şekil 3.40.	Pistonun geri gitmesini engelleyen parçanın monte edilmesi.....	95
Şekil 3.41.	RPB'nin sıkışması sonucu sıvının dışarı çıkması.....	97
Şekil 3.42.	Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB kiriş numunesi.....	97
Şekil 3.43.	Eğilme deney numunesinin yükleme şekli ve ölçüleri.....	98
Şekil 3.44.	Eğilme numunelerinde optimum sıkıştırma basıncının belirlenmesinde kullanılan hiyerarşi sistemi.....	99
Şekil 4.1.	I. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği.....	103
Şekil 4.2.	II. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği.....	107
Şekil 4.3.	III. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği.....	107

Şekil 4.4.	IV. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği.....	108
Şekil 4.5.	V. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği.....	108
Şekil 4.6.	VI. Grup karışımın silis dumanı miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği.....	111
Şekil 4.7.	VII. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği.....	114
Şekil 4.8.	Lif içeriğine göre numune basınç dayanımları.....	117
Şekil 4.9.	Şahit ve %2 lif içeren numuneye ait kırılma şekli.....	119
Şekil 4.10.	Şahit numunenin gerilme-deformasyon grafiği.....	120
Şekil 4.11.	%2 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği.....	121
Şekil 4.12.	%4 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği.....	122
Şekil 4.13.	%6 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği.....	123
Şekil 4.14.	%8 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği.....	124
Şekil 4.15.	%10 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği.....	125
Şekil 4.16.	Lif içeriğinin elastisite modülü ve basınç dayanımına etkisi.....	126
Şekil 4.17.	Eğilme deneyi sonucu kırılmış numune.....	128
Şekil 4.18.	Eğilme deneyi sonucu kırılmış Şahit (lifsiz) numune.....	129
Şekil 4.19.	Şahit lifsiz numunenin yük sehim eğrisi.....	129
Şekil 4.20.	% 2 lif içeren numunenin yük sehim eğrisi.....	130
Şekil 4.21.	%4 lif içeren numunenin yük sehim eğrisi.....	132
Şekil 4.22.	%6 lif içeren numunenin yük sehim eğrisi.....	133
Şekil 4.23.	%8 lif içeren numunenin yük sehim eğrisi.....	134
Şekil 4.24.	%10 lif içeren numunenin yük sehim eğrisi.....	135
Şekil 4.25.	Lifli ve lifsiz numunenin yük sehim eğrisi.....	136
Şekil 4.26.	Lif miktarına göre eğilme dayanımı.....	137
Şekil 4.27.	Lif miktarına göre kırılma enerjileri.....	138

Şekil 4.28.	Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi.....	139
Şekil 4.29.	Lif miktarına göre elastik şekil değiştirme indeksleri.....	140
Şekil 4.30.	Lif oranının birim maliyet üzerindeki etkisi.....	142
Şekil 4.31.	Kür tipi-basınç dayanımı grafiği.....	149
Şekil 4.32.	Normal su kürünün içyapı görüntüsü.....	151
Şekil 4.33.	90°C sıcak su ve buhar kürüne ait içyapı görüntüsü.....	152
Şekil 4.34.	3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 200°C kürü ait içyapı görüntüsü.....	152
Şekil 4.35.	3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 300°C kürü ait içyapı görüntüsü.....	153
Şekil 4.36.	a. Vibrasyon ile kalıba yerleştirilen küp numunenin kalıp yüzeyi b. Küp numune üst yüzeyi c. Silindir numune.....	156
Şekil 4.37.	Vibrasyon kullanılarak kalıba yerleştirilen RPB'nin çelik lif-pasta ara yüzeyi.....	156
Şekil 4.38.	Revibrasyon-basınç dayanımı grafiği.....	158
Şekil 4.39.	Sıkıştırma basıncının birim hacim ağırlığa etkisi.....	160
Şekil 4.40.	Basınç deneyi sonucu oluşan kırılma şekilleri.....	162
Şekil 4.41.	Sıkıştırma basıncı-basınç dayanımı grafiği.....	163
Şekil 4.42.	Şahit numuneye ait lif-pasta ara yüzeyi.....	164
Şekil 4.43.	25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi.....	165
Şekil 4.44.	50 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi.....	165
Şekil 4.45.	75 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi.....	166
Şekil 4.46.	100 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi.....	166
Şekil 4.47.	125 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi.....	167
Şekil 4.48.	Sıkıştırma basıncı uygulanmış numuneye ait gerilme-deformasyon grafiği.....	169
Şekil 4.49.	Sıkıştırma basıncının elastisite modülüne etkisi.....	169

Şekil 4.50.	Sıkıştırma basıncının, birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve elastisite modülüne etkisi.....	170
Şekil 4.51.	Sıkıştırma basıncının birim maliyet üzerindeki etkisi.....	172
Şekil 4.52.	Eğilme deneyi sonucu liflerin sıyrılarak beton içerisinden çıkması.....	175
Şekil 4.53.	Sıkıştırma basıncının birim hacim ağırlığa etkisi.....	177
Şekil 4.54.	Deneye hazır hale getirilmiş numuneler.....	178
Şekil 4.55.	Eğilme deneyinin uygulanması.....	179
Şekil 4.56.	Şahit RPB'ye ait yük-sehim grafiği.....	179
Şekil 4.57.	Şahit RPB'nin mikro yapısı.....	180
Şekil 4.58.	5 MPa Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait yük-sehim grafiği.....	181
Şekil 4.59.	5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı.....	181
Şekil 4.60.	10 MPa Karşıma ait yük-sehim grafikleri.....	183
Şekil 4.61.	15 MPa Karşıma ait yük-sehim grafikleri.....	184
Şekil 4.62.	20 MPa Karşıma ait yük-sehim grafikleri.....	185
Şekil 4.63.	25 MPa Karşıma ait yük-sehim grafikleri.....	186
Şekil 4.64.	Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait yük-sehim grafikleri...	187
Şekil 4.65.	Sıkıştırma basıncına göre eğilme dayanımı değişimi.....	188
Şekil 4.66.	5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı.....	189
Şekil 4.67.	10 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı.....	189
Şekil 4.68.	15 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı.....	190
Şekil 4.69.	20 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı.....	190
Şekil 4.70.	25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı.....	191
Şekil 4.71.	Karşıma ait sıkıştırma basıncına göre kırılma enerjileri.....	192
Şekil 4.72.	Karşıma ait sıkıştırma basıncına göre elastik şekil değiştirme indeksleri.....	192
Şekil 4.73.	Sıkıştırma basıncının, birim hacim ağırlık, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğuna etkisi.....	193
Şekil 4.74.	Sıkıştırma basıncının birim maliyet üzerindeki etkisi.....	195

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Tipik RPB 200 ve RPB 800 betonlarının çimentoya göre karışımın oranları.....	14
Tablo 2.2.	RPB200 ve RPB800’de kullanılan malzemeler ve miktarları.....	15
Tablo 2.3.	Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri.....	16
Tablo 2.4.	Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri.....	17
Tablo 2.5.	RPB’nin mekanik özelliklerinin, normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile karşılaştırılması.....	17
Tablo 2.6.	RPB ile normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların dayanıklılık yönünden karşılaştırılması.....	19
Tablo 2.7.	Eşit moment taşıma kapasitesine sahip kirişlerinin karşılaştırılması.....	22
Tablo 3.1.	Çimento ve silis dumanının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	41
Tablo 3.2.	Çimento ve silis dumanının tane dağılımı	43
Tablo 3.3.	Kuvars pudrasının kimyasal ve fiziksel özellikleri	46
Tablo 3.4.	Kuvars pudrası elek analiz sonuçları	48
Tablo 3.5.	Kuvars kumlarının fiziksel özellikleri	49
Tablo 3.6.	Kuvars kumu tane dağılımı.....	50
Tablo 3.7.	Kullanılan lifin teknik özellikleri.....	51
Tablo 3.8.	Kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri.....	54
Tablo 3.9.	Deneylerde kullanılan suyun kimyasal özellikleri.....	55
Tablo 3.10.	Kür programı ve numune kodları.....	78
Tablo 4.1.	Karışımlara ait malzeme miktarları ve farklı kür tiplerine göre 28 günlük basınç dayanımları.....	102
Tablo 4.2.	Karışımlara ait malzeme miktarları ve farklı kür tiplerine göre 28 günlük basınç dayanımları.....	105

Tablo 4.3.	Karışımlara ait malzeme miktarları ve farklı kür tiplerine göre 28 günlük basınç dayanımları.....	110
Tablo 4.4.	Karışımlara ait malzeme miktarları ve farklı kür tiplerine göre 28 günlük basınç dayanımları.....	113
Tablo 4.5.	Lifli karışımların 1 m ³ 'teki malzeme miktarları	116
Tablo 4.6.	Lif içeriğine göre numune basınç dayanımları.....	117
Tablo 4.7.	Lif içeriğine göre elastisite modülü değerleri.....	126
Tablo 4.8.	Elastik şekil değiştirme indeks değerleri.....	128
Tablo 4.9.	Numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.....	137
Tablo 4.10.	Şahit ve lifli karışımların birim fiyatları.....	141
Tablo 4.11.	Lif miktarına göre birim dayanım maliyeti.....	142
Tablo 4.12.	Lif oranına göre elde edilen sonuçların önem dereceleri.....	144
Tablo 4.13.	Lif oranına göre elde edilen sonuçların önem derecelerinin normalizasyon sonuçları.....	144
Tablo 4.14.	Lif oranına göre elde edilen sonuçların 0-1 değerleri arasında normalize edilmesi.....	145
Tablo 4.15.	Lif oranlarının verimlilik değerleri.....	145
Tablo 4.16.	Lif oranına göre elde edilen sonuçların basınç ve eğilme dayanımı ile kırılma tokluğu ağırlıklı önem dereceleri.....	146
Tablo 4.17.	Lif oranlarının, basınç ve eğilme dayanımı ile kırılma tokluğu ağırlıklı verimlilik değerleri.....	146
Tablo 4.18.	Lif oranına göre elde edilen sonuçların maliyet ve karıştırma ve yerleştirme zorluklarının ağırlıklı önem dereceleri.....	147
Tablo 4.19.	Lif oranlarının, maliyet ve karıştırma ve yerleştirme zorluklarının ağırlıklı önem derecelerine göre verimlilik değerleri	147
Tablo 4.20.	Kür tipine göre RPB'nin basınç dayanımları.....	148
Tablo 4.21.	Revibrasyon uygulanmış RPB'nin basınç dayanımları.....	157
Tablo 4.22.	Sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'lerin birim hacim ağırlık değerleri.....	160
Tablo 4.23.	Sıkıştırma basıncının, basınç dayanımına etkisi.....	162
Tablo 4.24.	Sıkıştırma basıncının, elastisite modülüne etkisi.....	168
Tablo 4.25.	Sıkıştırma basıncına göre birim dayanım maliyeti.....	171

Tablo 4.26. Sıkıştırma basıncına göre elde edilen sonuçların önem dereceleri	173
Tablo 4.27. Sıkıştırma basıncına göre elde edilen sonuçların önem derecelerinin normalizasyon sonuçları.....	173
Tablo 4.28. Lif oranına göre elde edilen sonuçların 0-1 değerleri arasında normalize edilmesi.....	174
Tablo 4.29. Sıkıştırma basıncına göre verimlilik değerleri.....	174
Tablo 4.30. Sıkıştırma basıncı uygulamasının birim hacim ağırlığa etkisi.....	177
Tablo 4.31. Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'lerin eğilme dayanımı sonuçları.....	187
Tablo 4.32. Sıkıştırma basıncına göre birim dayanım maliyeti.....	194
Tablo 4.33. Eğilmede sıkıştırma basıncına göre elde edilen sonuçların önem dereceleri.....	196
Tablo 4.34. Eğilmede sıkıştırma basıncına göre elde edilen sonuçların önem derecelerinin normalizasyon sonuçları.....	197
Tablo 4.35. Lif oranına göre elde edilen sonuçların 0-1 değerleri arasında normalize edilmesi.....	197
Tablo 4.36. Sıkıştırma basıncına göre verimlilik değerleri.....	198

ÖZET

Anahtar kelimeler: Reaktif pudra betonu, sıkıştırma basıncı, lif, tokluk

Reaktif Pudra Betonu (RPB), ince taneli malzemelerden oluşan yüksek dozajda çimento ve düşük su/çimento oranına sahip 1995 yılında ortaya çıkan yeni nesil ultra yüksek performanslı betondur. Bu tez çalışmasında reaktif pudra betonlarının mekanik davranışına katılma süresince uygulanan sıkıştırma basıncının etkileri incelenmiştir. RPB'yi oluşturan malzemeler ve üretim teknikleri, normal betonlara göre farklılıklar gösterdiği için çalışmada ilk olarak farklı karışım yöntemleri kullanılarak RPB'ler üretilmiştir. Lifsiz olarak üretilen RPB karışımlarına mikro boyuttaki lif, hacimce %2-4-6-8-10 oranlarında katılmış ve optimum lif oranı %4 olarak belirlenmiştir. RPB'ye %4 lif katıldıktan sonra farklı sürelerde ve sıcaklıklarda kür işlemleri uygulanmış ve en iyi kür işleminin, 3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 300°C etüv kürü olduğu görülmüştür.

RPB'nin kalıba yerleştirilmesinde 25, 50, 75, 100, 125 MPa'lık sıkıştırma basınçları uygulanmış ve bu basınçlar altında priz alması sağlanmıştır. Sıkıştırma basıncı uygulanan numunelerde RPB'nin boşluk yapısının düzeldiği, lif ile beton ara yüzeyinde kusursuz denebilecek bir yapı oluştuğu görülmüştür. 25 MPa'lık bir sıkıştırma basıncının, basınç dayanımını yaklaşık 2 kat arttırdığı tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımına 100 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan numunelerde 475,24 MPa değeri ile ulaşılmıştır. Eğilme numunelerine uygulanan 5, 10, 15, 20, 25 MPa'lık sıkıştırma basıncılarında ise eğilme parametrelerinde de önemli artışlar meydana getirdiği gözlenmiştir. 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin eğilme dayanımında %34, kırılma tokluğu ile enerjisinde 3 kattan fazla artış olmuştur. Çalışmada 25 MPa'lık sıkıştırma basıncı altında en yüksek eğilme dayanımına 36,4 MPa değeri ile ulaşılmıştır. Sıkıştırma basıncı uygulaması ile elemanların kalınlıkları veya içerisinde kullanılan ve en büyük maliyet oluşturan lif miktarı azaltılabilir.

EFFECTS OF PRE-SETTING PRESSURE APPLIED DURING SETTING PHASE TO MECHANICAL BEHAVIORS OF REACTIVE POWDER CONCRETE

SUMMARY

Key Words: Reactive Powder Concrete, pre-setting pressure, fiber, toughness

RPC is a new ultra high performance concrete, which was invented in 1995. It's composed of thin particulate material and has high cement and low water/cement ratio. In this study, effects of pre-setting pressure applied during setting phase to mechanical behaviors of reactive powder concrete have been investigated. As RPC materials and production techniques show differences in comparison to common concrete, RPC's were produced by using local materials and different mixing methods at first. Micro size fiber was added to RPC mixtures, produced without fibers, 2, 4, 6, 8, 10% by volume and the optimum fiber ratio was determined as 4%. Cure processes were applied to RPC which is produced with fiber at different times and temperatures. The best curing process is 3 days 90°C vapor cure then 12 hours 300°C heated air cure according to compressive strength.

25, 50, 75, 100, 125 MPa pre-setting pressure were applied to RPC for placing to mould and RPC was settled under these pressures. It was seen that porosity structure of RPC was improved with application of pre-setting pressure to samples perfectly in fiber-concrete interface. It was determined that 25 MPa of pre-setting pressure increased the compressive strength about 2 times. The maximum compressive strength was achieved to 475.24 MPa for 100 MPa pre-setting pressure. Flexure parameters were increased considerably with application of 5, 10, 15, 20, 25 MPa pre-setting pressure to flexure test samples. Flexure strength was improved by 34% with 5 MPa pre-setting pressure. Also fracture toughness and energy were increased more than 3 times. In this study, maximum flexure strength was obtained as 36.4 MPa under 25 MPa pre-setting pressure. With pre-setting pressure application, thickness of element or fiber proportion use inside can be decreased, which is the greatest cost constituent.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Beton, üretiminin kolaylığı, istenilen şeklin verilebilmesi, donatı için pasif bir ortam sağlaması, yüksek basınç dayanımı ve ekonomik olması nedeniyle günümüzde vazgeçilmez bir yapı malzemesi konumundadır. Hem betonarme hem de çelik yapı sistemlerinde betonun kullanılmadığı alan sınırlıdır. Beton teknolojisi ise bu yoğun talep karşısında sürekli bir gelişim içerisinde.

Beton, çimento, su, agrega ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup şekil verilebilen, zamanla katılaşarak sertleşerek dayanım kazanan ve tekrar çözünmeyen kompozit bir yapı malzemesidir [1].

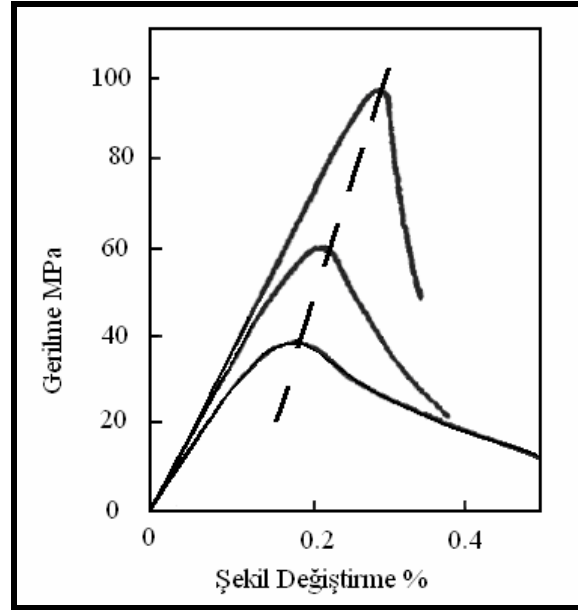
150 yılı aşkın bir süredir beton insanoğlunun beklenti ve ihtiyaçları doğrultusunda sürekli bir değişim ve gelişim göstermiştir. 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15–25 MPa civarında iken 1970'li yıllarda yüksek basınç dayanımına ihtiyaç duyulan yüksek katlı yapıların kolon yüklerinin temele taşınabilmesi için 40–50 MPa beton basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Zaman içerisinde dayanımları artan bu betonlara yüksek performanslı beton adı verilmiş ve yol, köprü, liman yapısı vb. uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır [2]. Bu süreç içerisinde farklı beklentilere yönelik birçok beton sınıfı ve çeşidi ortaya çıkmıştır. Ancak, betonları en genel şekliyle normal ve özel betonlar olmak üzere iki sınıfa ayırmak mümkündür.

Normal betonlar, üretiminin kolay olması, ucuz hammadde ve işgücü temini ile ekonomik olarak üretilen betonlardır. Basınç dayanımları genellikle 20 MPa ile 50 MPa arasındadır. Yol, bina, köprü ve tünel gibi birçok yapıda kullanılabilirler. Yapı sektöründe ekonominin önemi göz önünde tutulduğunda bu betonların uygulamada her zaman yer bulacağı muhakkaktır.

Özel betonlar, normal betonların fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerinde amaca uygun olarak iyileştirme yapılması ile elde edilmiş betonlardır. Bunlara, yüksek dayanımlı betonlar, mineral katkılı betonlar, kendiliğinden yerleşen betonlar ve harçlar, hafif betonlar, polipropilen ve çelik tel takviyeli betonlar, püskürtme betonlar ve ultra yüksek dayanımlı betonlar örnek olarak verilebilir.

Son yıllarda yapılan araştırmada [2,3], çimento matrisli malzemeler ile yüksek mekanik performans kazanılması hedeflenmiştir. Bu araştırmaların sonucunda, Yüksek Dayanımlı Betonlar (YDB), Çok Yüksek Dayanımlı Betonlar (ÇYDB), Büyük Boşluklarından Arındırılmış Polimer Hamurlar (MDF), Ultra İncelikteki Taneleri İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler (DSP), Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton (SIFCON), Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UYPB) ortaya çıkmıştır.

Ancak son yıllarda betonda yüksek performans, sadece yüksek dayanımla değil betonun dayanıklılığı ve süneklik özelliklerinin de dayanımla birlikte değerlendirilmesi olarak ortaya çıkmıştır. Dayanımı arttırılmış beton veya bilinen adıyla yüksek dayanımlı betonlar geçirimsiz olması sebebiyle dayanıklılık yönünden de olumlu özelliklere sahip olmasına karşın diğer yandan bu betonlarda dayanım arttıkça ortaya çıkan önemli bir problem ise gevreklik olmuştur. Normal beton, çekmede düşük taşıma kapasitesine ve yapısal çelikle karşılaştırıldığında çeliğin sahip olduğu çekme dayanımının sadece %0,1 - %0,01'i, kırılma tokluğunun ise %0,2 - %4'üne sahip çok gevrek bir malzemedir. Yüksek dayanımlı betonlarda eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve daha gevrek kırılmaktadır. Buna bağlı olarak elastisite modülündeki bağıl artış, basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olmaktadır (Şekil 1.1) [3].



Şekil 1.1. Gerilmeye bağlı olarak şekil değiştirme yüzdeleri [3].

Böylece, betonda meydana gelen gevreklik probleminin çözümünde, dayanıklılık özelliklerinin dışında yüksek süneklik özeliğine sahip betonlara gereksinim duyulmuştur. Bu problemi çözmek ve betonun çekme dayanımını artırmak amacıyla 1960'lı yılların başında betona süneklik kazandırmak için lif katılmaya başlanmıştır. Yalın betonun çekme dayanımı, çatlak direnci, aşınma ve darbe dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklerini geliştirmek için içerisine çelik, cam ve polipropilen lifler katılmaktadır. Betonlarda kullanılan lifler, çekme ve eğilme dayanımını arttırmakta, rötre çatlaklarını ise azaltmaktadır. Lifli beton, donatısız betondan farklı olarak mekanik ve fiziksel özelliklere sahip bir kompozit malzemedir. Lifli betonun en önemli mekanik özelliklerinden birisi, tokluk olarak da adlandırılan enerji yutabilme kapasitesidir [4].

Çelik telin gevrek matrise eklenmesiyle malzemenin tokluğu, kırılma enerjisi, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, çatlama karşı direnç, depreme karşı dayanıklılık ve süneklik gibi mekanik özelliklerinde de büyük artışlar sağlamaktadır. Böylece, betonda meydana gelen gevreklik problemini çözmek ve betonun çekme dayanımını artırmak amaçlı yüksek dayanımlı betonlardan farklı olarak betona lif katılması ve lif katılması ile birlikte tane dağılımın değiştirilerek yeniden düzenlenmesi, puzolanik aktivitenin artırılması ve farklı üretim ile kür işlemine tabi tutulmasıyla ultra yüksek

performanslı betonlar üretilmiştir. Ultra yüksek performanslı betonlar araştırmacılara göre farklılıklar göstermektedir. Çoğu araştırmacı lif katkılı yüksek dayanımlı betonları yüksek performanslı betonlar sınıfına koyarak ultra yüksek performanslı betonlar adını vermiştir. Ultra yüksek performanslı betonlar sınıfında bulunan betonlardan biride reaktif pudra betonudur (RPB). Reaktif pudra betonu 1900 yılların ilk yarısında bulunmasına rağmen kısa sürede gelişmeye ve kullanılmaya başlanmıştır.

BÖLÜM 2. REAKTİF PUDRA BETONU

2.1. Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar

Reaktif Pudra Betonu, ince taneli malzemelerden oluşan yüksek dozajda çimento ve düşük su/çimento oranına sahip yeni nesil ultra yüksek performanslı betondur. Ultra Yüksek Performanslı Betonlar sınıfında bulunan ve 170 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımına ve sünekliğe sahip çimento matrisli malzemelerin yeni bir tipi olarak da tanımlanabilir. Reaktif pudra betonu (RPB) adını, yapımında kullanılan malzemeler ve puzolanik aktiviteden almaktadır. Pudra kelimesi, RPB'yi oluşturan malzemelerin pudra tane boyutunda olmasından, reaktiflik kelimesi, puzolanik aktivitenin sıcak kür işlemi ile yeniden tekrarlamasından ve beton kelimesi ise diğer betonlar gibi çimento matrisli olmasından dolayı gelmektedir.

Reaktif pudra betonu, ilk kez 1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues'in laboratuvarlarındaki araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve ilk çalışmalar Richard ve Cheyrezy tarafından yapılmıştır [5]. Reaktif pudra betonlarının ilk kullanımı ise Kanada'nın Quebec eyaletinin güney doğusunda bulunan Sherbrooke şehrinde Şekil 2.1'deki kaya köprüsünde olmuş ve kullanımı daha sonraki yıllarda giderek artmıştır [6].



Şekil 2.1. Sherbrooke şehrindeki RPB ile üretilmiş yaya köprüsü [6].

2.1.1. RPB'yi oluşturan malzemeler

Betonun içyapısının kusursuz olması için, daha sıkı tane düzenine sahip olan ve mümkün olan en sıkı mikro yapıyı elde edebilecek ve bu mikro yapıyı yine mikro boyuttaki teller ile güçlendirerek çimento matrisli en yüksek dayanımlı betonu yapmak asıl amacı oluşturmaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek için, normal betonları oluşturan malzemeler yeterli gelmemektedir. Bundan dolayı farklı malzemelere yönelilmiştir. Bu malzemeler, yüksek dayanımlı, sert, homojen ve bol miktarda bulunan ucuz malzemeler olması gerekmektedir. Bu malzemeler aynı zamanda içyapıdaki kusurları en aza indirmek ve en yüksek homojenliğin sağlanması için mikro boyutta olması gerekmektedir.

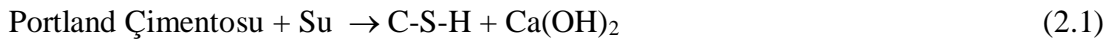
RPB'de kullanılan malzemeler genellikle, çimento, silis dumanı, pudra, kum, çelik agrega, çelik lif, su ve kimyasal katkıdır.

Diğer betonlar gibi RPB da çimento matrisli bir betondur ve asıl bağlayıcı malzemesi çimentodur. Yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan çimentolar bu betonlarda kullanıldığı gibi farklı çimentolarda kullanılmaktadır. Kimyasal içeriği bakımından C_3A içeriği düşük olan çimentolar daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Reolojik özellikler ve mekanik performans açısından en iyi çimento yüksek silis modüllü çimentodur. Bununla birlikte bu tip çimento çok yavaş sertleşme oranı dezavantajına sahiptir. Tane boyutu açısından yüksek bir Blain incelikli çimento fazla su ihtiyacı

olması nedeniyle bu betonlar için uygun görülmemesine rağmen, geleneksel hızlı sertleşen yüksek performanslı çimento yüksek su ihtiyacına rağmen çok iyi mekanik performansı için tercih edilmektedir [7]. Genellikle bu betonlar için katkısız portland çimentosu yani Tip I ve 42,5 MPa veya 52,5 MPa'lık basınç dayanıma sahip çimentolar tercih edilmektedir.

Mikron boyuttaki taneleri bir arada tutacak, bağlayıcı pastadaki boşlukları dolduracak ve en önemlisi de çimento hidrasyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireç (Ca(OH)_2) ile reaksiyona girerek puzolanik aktivite gerçekleştirerek dayanıma katkı sağlayacak bir puzolan malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç, en iyi şekilde silis dumanı tarafından karşılanmaktadır [5, 7, 9, 10, 11]. Bütün bu özelliklere sahip çok ince tane yapılı silis dumanı, puzolan olarak RPB de oldukça yüksek oranda kullanılmaktadır. Silis dumanı, silikon veya demirli silisyum (ferrosilisyum) imalatı sırasında atık olarak ortaya çıkan şekilsiz şeffaf, %85 ile %98 arası silisyum dioksit (SiO_2) kürelerinden oluşan bir mineraldir. Bu kürelerin ortalama büyüklüğü 0,5 μm altındadır [8]. Tipik olarak silis dumanı/çimento oranı 0,25'dir. Bu oran ve tane boyutu, optimum boşluk performansı ile de uyumaktadır. Bu değer çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan kirecin tamamen tüketilmesi için gerekli olan dozaja da çok yakındır [5, 7, 9, 10, 11].

Silis dumanının çimento ürünleri ile reaksiyonu kimyasal olarak;

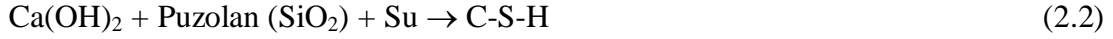


Burada,

C-S-H ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$): Kalsiyum silikat hidrat "Tobermit" ismi verilen jel, çimento tanesinin 1/1000 oranında, çok küçük parçacıklardan oluşan ve çimentonun bağlayıcılık özelliğini sağlayan hidrasyon ürünüdür.

Ca(OH)_2 (Kalsiyum hidroksit): Çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan kireçtir.

Bu denklemden hem bağlayıcılık özelliği olan C-S-H, hem de yan ürün olan serbest kireç açığa çıkmaktadır. Kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan bu ürünler silis dumanı ile reaksiyona girmektedir. Bu kimyasal reaksiyonda şayet serbest kirecin tamamı tüketilirse, kimyasal denklem;

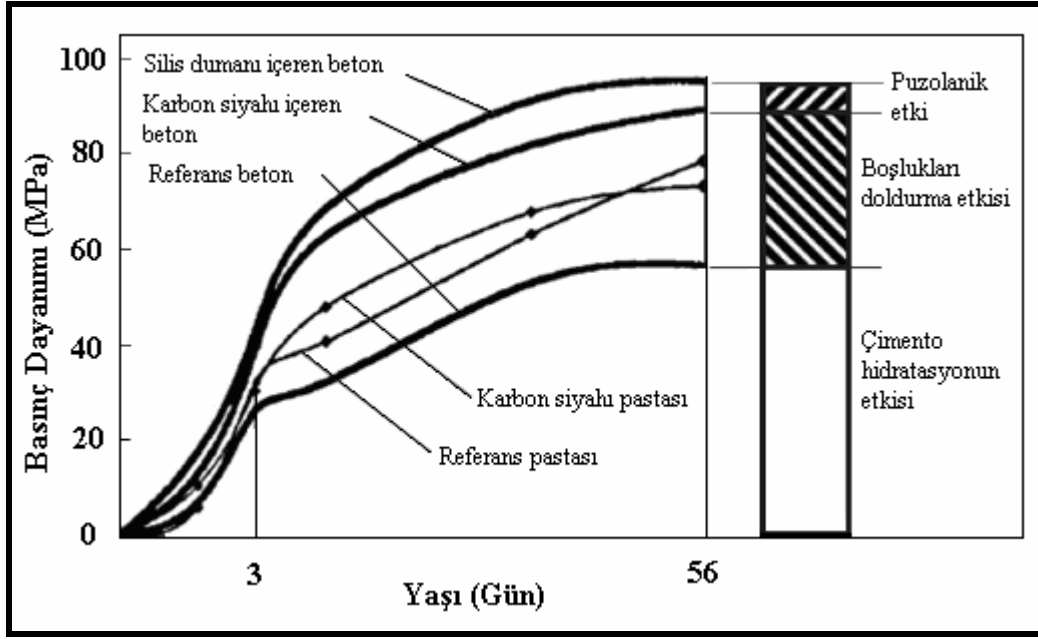


şeklinde olur ve reaksiyon sonucu yine bağlayıcılık özelliği olan C-S-H bileşenleri oluşur [12].

Silis dumanının bu etkisi, porozitenin daha fazla olduğu ve Ca(OH)_2 kristallerinin biriktiği agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde, aderans arttırarak, dayanımı ve dayanıklılığı daha yüksek olan bir iç yapı oluşturur. Bu özeliği sayesinde yüksek dayanımlı yapıların uzun süreli performanslarında sağladığı üstünlükler nedeniyle, yüksek fiyatına rağmen, tercih edilen bir malzeme olmaktadır [9].

Silis dumanının dayanıma asıl etkisi boşlukları doldurma etkisidir[10]. Silis dumanının çok ince taneli olmasından dolayı, çimento ile agregalar arasındaki çok ince boşlukları dahi doldurarak, yoğun ve yüksek dayanımlı bir matris oluşturmasıdır [11]. Bu malzemeler, agrega ve çimento arasındaki boşlukları azaltarak, daha homojen bir mikro yapının oluşmasını sağlarlar.

Goldman ve Bentur [10], yaptıkları çalışmada, silis dumanının puzolanik ve boşlukları doldurma etkisinin dayanımı ne kadar etkilediğini incelemiştir. Bağlayıcı özelliği bulunmayıp yalnızca boşlukları doldurma etkisi olan karbon siyahı içeren, silis dumanı içeren ve referans betonları üretilmiş ve bu betonların basınç dayanımlarını elde etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Boşlukları doldurma malzemesi ve puzolanın, betonun basınç dayanımına etkisi [10].

Doldurma etkisinin basınç dayanımına etkisi, puzolanik etkiden oldukça fazla olduğu, hatta dörtte bir oranına yakın olduğu daha önce yapılmış çalışmalardan anlaşılmaktadır [13-17]. Bu doldurma etkisi RPB’de sadece çimento tanelerinin değil aynı zamanda pudraların da arasını doldurmak için gereklidir.

Normal beton heterojen bir malzemedir ve betonda agregalar (kum, çakıl) çimento pastasının içerisinde bitişik taneli bir iskelet elemanları ve hacimsel açıdan büyük bileşenlerdir. Bunun anlamı pasta büzülmesinin küçük bir oranı taneli iskelet tarafından engellenir ve sonuçta boşluklar artar. Bu RPB da ise pastanın hacmi kum içeriğinden en az %20 daha fazladır. Böylece agregalar sıkı bir iskelet oluşturmazlar. Ama sürekli matris içerisinde bir dizin oluştururlar. Pasta büzülmesi her agrega parçası tarafından bölgesel olarak engellenir. Özellikle pudra malzemeler pastada bulunan bir puzolan gibi bulunarak mikro boyutta kimyasal büzülmeleri sınırlayabilmektedir. Bu sınırlama pastadaki boşluk miktarını azaltmaktadır. Homojenliğin artırılması için agrega tane boyutu küçültülerek kaba agregalar karışımlardan çıkarılmaktadır. Agregat boyutunun azaltılması sadece homojenlik için değil aynı zamanda aderans alanının artırılması ve agrega matris ara yüzeyinin

istenilen düzeye gelmesine de katkı sağlamaktadır. Agreganın pastaya göre oranının azaltılması da yine homojenliğe olumlu katkı sağlamaktadır.

RPB’da kullanılan agregaların, yüksek dayanımlı kuvars, silis ve bazalt gibi sağlam mineralojik yapıya sahip saflığı yüksek malzemeler olması gerekmektedir. Bu malzemeler sadece RPB de değil aynı zamanda yüksek dayanımlı betonların vazgeçilmez malzemeleri olmuştur. Bu malzemelerin doğal olanları betonun su ihtiyacı açısından yararlı etkilere sahip olduğu için tercih edilirken, kırmataş olanlar ise, bağlayıcı pasta ile çok iyi bir ara yüz oluşturduğu için tercih edilmektedir. Sonuçta her iki tipte RPB’da kullanılabilirlerdir.

RPB’de kullanılan agregalar, pudra ve kum olarak iki farklı tipte bulunmaktadır. Pudra malzeme 0-100 µm tane büyüklüğündeki malzemeleri kapsarken kum 100-2000 µm tane büyüklüğündeki malzemeleri kapsamaktadır. Doğal malzemelerden 0-100 µm boyutundaki malzemenin içerisinde aynı zamanda kil bulunmaktadır. Bu karışımın su ihtiyacını, işlenebilirliği, mekanik özellikleri ve dayanıklılığı olumsuz olarak etkilemektedir. Bu nedenle kullanılacak pudra inceliğindeki malzemelerin, dayanımı yüksek kayaların kırılıp öğütülmesi ile elde edilmesi beton özelliklerine olumlu etki yapmaktadır.

RPB’nın su/çimento oranının 0,20 mertebesinde olması işlenebilirlik için kimyasal katkı kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Yüksek dozajda silis dumanı (SD) kullanılması, hem taze betonun işlenebilirliğini azaltmakta, hem de gerekli su miktarı artırmaktadır. Bu durumda, silis dumanlı betonlarda, süper akışkanlaştırıcı kullanımı kaçınılmaz olmaktadır. SD tanelerinin yüzey alanlarının çok büyük olması, taze beton içerisindeki serbest suyun önemli ölçüde bağlanmasına ve bu suyun beton yüzeyine çıkmasının yavaşlamasına neden olmaktadır. Yani SD katkılı betonlarda terleme önemli miktarda azalmaktadır. Ancak terlemenin çok azalması veya hiç oluşmaması da plastik büzülmeden dolayı çatlama riskini artırmaktadır. Bu nedenle bu tip betonlarda etkili bir kimyasal katkı kullanılması kaçınılmazdır [5].

En etkili süper akışkanlaştırıcılardan olan polycrylate-içerikli dağıtıcı etkiler, bu betonlar için uygun gözükse de geciktirici özellik sergilemesi pratik uygulamalar için

bir problem olduğu için kullanımını kısıtlamaktadır. Bunun için geleneksel süper akışkanlaştırıcılar daha zayıf sonuçlar vermesine rağmen çimento ile uyumluluğundan dolayı tercih edilmektedir. Düşük s/ç oranları için bu katkılardan yüksek oranlarda RPB’de kullanılmaktadır. Bu oran, çimento içeriğinin %1,5-3’ü arasında değişiklik gösterirken, kimyasal katkının etkin madde kısmı yani katı kısmı dikkate alınarak, diğer kısmı karışım suyu olarak düşünülerek daha düşük oranlarda değerler gösterilebilmektedir. Kullanılacak katkı tipi ve miktarı, çimento tipi ve dozajından bağımsız düşünülmemelidir. Katkı oranı aynı zamanda pudra ve kumun özelliklerine bağlı olarak ta farklılık gösterebilmektedir. Örneğin kırma taş pudra ve kum kullanımı katkı miktarını artırırken doğal agrega kullanımı azaltmaktadır. Bununla birlikte çimento tane boyutuna yakın boyutta olan pudra miktarı da katkı oranını etkilediği yapılan ön deneylerde görülmüştür.

Çok yüksek basınç dayanımlı bir matris üretilmesine rağmen süneklilik normal betonlardan daha iyi değildir. Tellerin katılması çekme dayanımını artırır ve ayrıca süneklilik düzeyini yükseltir. Lifler RPB’nin sünekliliğinin artırılması için katılmak zorundadır. Düzgün kancasız çelik fiberler 0,16 mm’lik bir çapta ve 6-13 mm uzunluğunda olan mikro boyuttaki lifler hacmin %1,5 – 6 arasında bir oranda karışıma ilave edilir. RPB için mekanik performans (basınç ve çekme gerilmesi) iyileştirilmesi beton içerisinde rastgele dağılmış şekilde 3 mm’den daha kısa kesilmiş liflerin agrega olarak kullanılmasıyla elde edilir. Bu durumda basınç dayanımı artarken kırılma enerjisi azalmaktadır [5].

2.1.2. RPB’nin karışım oranları

RPB için bir araştırma programı yapan Richard ve arkadaşları [5], karışım belirlenmesinde, aşağıdaki prensipleri uygulanmışlardır.

- Kaba agregaların çıkartılması ile homojenliğin artırılması
- Sertleşme süreci ve öncesinde basınç uygulanması ve taneli karışımın optimize edilmesi ile sıkışmış yoğunluğun artırılması

- Sıcak kür etkisiyle hızlı sertleşme ve mikro yapının iyileştirilmesi
- Küçük boyutta çelik tellerin katılmasıyla sünekliğin artırılması
- Karışımın korunması için, dökümün bilinen tekniklerle iyi bir şekilde yapılması

Normal beton heterojen bir malzemedir ve agregalar çimento pastasının içerisinde bitişik taneli bir iskelet şeklindedir. Heterojenlik ile ilgili problemler aşağıdaki uygulamalar ile RPB’de azaltılmıştır.

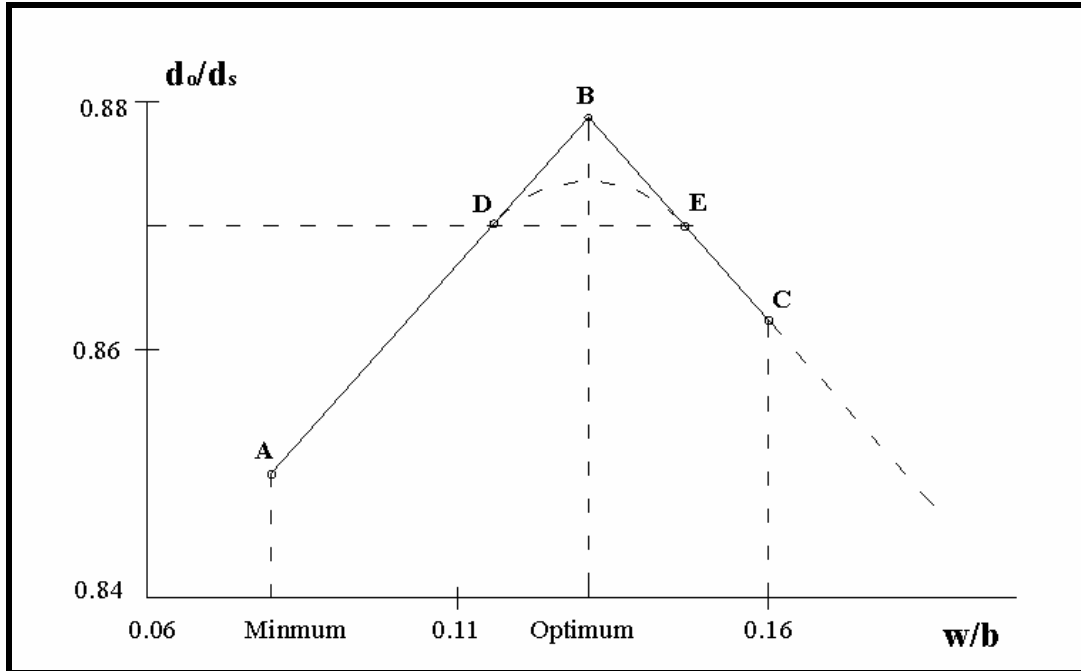
- Kaba agreganın çıkartılarak yerine ince kum (Maks. 600 μm) konması
- Agregam/matris oranının düşürülmesi
- Pastanın mekanik özelliklerinin artırılarak, pasta-agrega ara yüzeyinin iyileştirilmesi

İlk iki madde ile heterojenlik ile ilgili problemler büyük ölçüde giderilse de, pasta ile agrega ara yüzeyinde istenmeyen zayıf bağların olması heterojenlik ve dayanım açısından önemlidir. Normal betonlarda, agrega beton içerisinde sert bir yapı şeklindedir. Basınç kuvvetinin uygulanması, pasta-agrega ara yüzeyinde kesme ve çekme gerilmeleri ve genelde pastada çatlakların oluşmasını neden olur. Bu çatlakların boyutu çekme veya kesme gerilmeleri altındaki bölgenin uzamasıyla ilişkilidir. Küresel boşluklar durumunda çevresel çatlak boyu boşluğun çapıyla direkt olarak orantılıdır. RPB için kaba agrega boyutundaki (örneğin 20 mm yerine 400 μm) yaklaşık 50 katlık bir azalma ile mikro çatlaklarda büyük bir azalma elde edilir [5].

En az su ihtiyacına göre taneli karışım seçildikten sonra optimum su içeriği daha genel bir parametre kullanılarak analiz edilmektedir. Bu parametre relatif yoğunluk d_0/d_s ’dir. Burada d_0 kalıptaki betonun yoğunluğu ve d_s taneli karışımın sıkıştırılmış olarak varsayılan katı yoğunluğudur. Su içeriği ile relatif yoğunluktaki varyasyon

suyun bağlayıcıya (çimento+silis dumanı) oranı gibi ifade edilmekte ve Şekil 2.3’de gösterilmektedir.

Minimum su/bağlayıcı (w/b) oranı için relatif yoğunluk A noktasındaki gibidir. Burada ilave edilen su miktarı, sıkışmış hava ile yer değiştirmesiyle w/b oranı bir miktar artmaktadır. Karışımın hacmi sabit kalarak kütlesi artar, d_0 yoğunluğu ve relatif yoğunluk da artar. B noktasına ulaşıldığında karışımda sıkışmış hava kalmaz. Eğer w/b oranı yeniden artarsa eklenen su karışımın hacmini artırır ve relatif yoğunluk d_0/d_s düşer (C noktası).



Şekil 2.3. Su içeriği ile relatif yoğunluktaki değişimi [5]

B noktasında, teorik bir optimum su içeriğiyle maksimum relatif yoğunluk seviyesi yakalanabilir. İki farklı su içeriği değeri ile aynı seviye yakalanabilir. Bu seviyeler D ve E noktalarında teorik olarak optimum su seviyeleridir. Örnekte E noktası, D noktasına göre daha iyi bir mekanik performans gösterir. Çünkü önceki E noktası, daha fazla su ve daha az hava içerir ki buda hidrasyondan sonraki katı evre kısmi olarak bütünleşmiş olur. Teorik olarak optimum (B noktası) daha yüksek w/b oranı değerlerine doğru yavaşça değişmektedir. Bu yüzden etkili karışım AB'nin yerine grafiğin BE daire parçasında olması daha iyidir. Örneğin E'nin D'ye göre diğer bir

avantajı da kalıba betonun daha kolay yerleştirilmesidir. Pratikte optimum su içeriği değeri teorik su içeriği değerinden büyüktür. Bu nedenle taneli karışıma göre su ve katkı oranı, deneyler sonucu belirlenmektedir [5].

Reaktif pudra betonlarının karışım tasarımı için henüz yerli ve yabancı herhangi bir standart mevcut değildir. Karışımı oluşturan taneli malzemelerin sıkı bir yapı oluşturacak şekilde oranlanması için farklı karışım teorileri kullanılmıştır. Bu teoriler, Mooney'in süspansiyon viskozite modelinden türemiştir [18]. Mooney'in modelinden yola çıkarak farklı karışım tasarımları yapılmıştır. Bu karışım tasarımlarından genel olarak kullanılan karışımlar Tablo 2.1'de verilmiştir [5].

Tablo 2.1. Tipik RPB 200 ve RPB 800 betonlarının çimentoya göre karışımın oranları [5].

Malzemeler	RPB 200				RPB 800	
	Lifsiz		Lifli		Silis Agregalar	Çelik Agregalar
Portland Çimentosu	1	1	1	1	1	1
Silis Dumanı	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Kum 150-600 μm	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Kırılmış Kuartz $d_{50}=10 \mu\text{m}$	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Süper Akışkanlaştırıcı (Polyacrylate)	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Çelik Tel L = 12 mm	-	-	0,175	0,175	-	-
Çelik Tel L = 3 mm	-	-	-	-	0,63	0,63
Çelik agregalar < 800 μm	-	-	-	-	-	1,49
Su	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19

Dugat ve arkadaşları [19], reaktif pudra betonlarının mekanik davranışını inceledikleri çalışmalarında, RPB200 ve RPB800 betonları için karışımlar hazırlamışlardır. Bu karışımlara ait malzeme miktarları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. RPB200 ve RPB800’de kullanılan malzemeler ve miktarları [19].

Malzemeler (kg/m ³)	RPB200	RPB800
Portland çimentosu	950	980
Silis dumanı	237	225
Kırılmış kuvars	-	382
Silis kumu	997	490
13 mm çelik lif	146	-
3 mm paslanmaz çelik	-	617
Süper akışkanlaştırıcı	17	18
Toplam su	180	186
Su/bağlayıcı (Çimento+silis dumanı)	0,15	0,14

Bu karışım oranları kullanılacak malzeme türüne göre değişik göstermektedir. Bölgesel olarak malzeme değişiklikleri dikkate alınarak çok sayıda karışım dizaynı literatürde mevcuttur. Karışımın tasarımında normal beton için kullanılan Fuller teorisi gibi teorilerden yararlanılmaktadır.

Karışım oranları incelendiğinde, çimento miktarının normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre oldukça fazla olduğu su/çimento (s/ç) oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu betonlarda çimentonun tamamı yeterli su bulamadığı için hidrate olamaz ama çimento tane boyut ile silis dumanı ve pudra tane boyutu birbirine yakın olduğu için hidrate olmayan çimento taneleri agrega olarak görev yapmaktadır.

2.1.3. RPB’nin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı

RPB diğer betonlara göre üstün mekanik özelliklere sahip bir betondur ve bazı mekanik özellikleri çelikler ile kıyaslanabilecek düzeydedir. Bu mekanik özelliklerin kazanılmasında da en önemli özelliklerden olan homojenlik ve içyapı kusurlarındaki hataların minimize edilmesi her zaman çelik türü malzemeler dikkate alınarak düşünülmektedir. RPB’ler bazı uygulama alanlarında çeliğe alternatif malzeme olarak kullanılmaya başlamıştır [2].

Betonun mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için temel ilke, agrega-matris ara yüzeyinde iyi bir yapışma ve mümkün olan en yoğun matrisin elde edilmesidir. Bu bütün betonlarda istenilen bir durumdur. RPB konusu hakkında ilk çalışmaları yapan araştırmacılar RPB yi RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki tip olarak isimlendirmişlerdir. Bunlarda RPB200 olarak adlandırılan tip normal beton üretim teknikleri ile üretilebilirken RPB800 normal betondan farklı üretim teknikleri ile üretilmektedir. Her iki tipe ait mekanik özellikler bu konuda ilk çalışmaları yapan Richard ve arkadaşları tarafından ortaya konmuştur. Mekanik özellikler ve üretim tekniği hakkında genel bilgi Tablo 2.3'te verilmiştir [5].

Tablo 2.3. Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri [5].

	RPB 200	RPB 800	
Ön sertleşme basıncı	Yok	50	
Sıcak kür	20°C ile 90°C	250°C ile 400°C	
Basınç dayanımı (MPa)	170-230	Kuvars kumu	490-680
		Çelik agrega	650-810
Eğilme dayanımı (MPa)	30-60	45-141	
Kırılma enerjisi (J. m⁻²)	20000-40000	1200-20000	
Son deformasyon (m.m⁻¹)	5000 x 10 ⁻⁶ -7000 x 10 ⁻⁶	5000 x 10 ⁻⁶ -7000 x 10 ⁻⁶	
Elastisite modülü (GPa)	50-60	65-75	

RPB200 betonların üretim aşamasında ön basınç tekniği kullanılmaz yani taze haldeki betona basınç uygulanarak sıkıştırılmaz ve bu betonların üretimi geleneksel yüksek performanslı betonların üretimi ile benzerlik gösterir.

RPB'nun mekanik özellikleri Dugat ve arkadaşları tarafından da incelenmiş ve sonuçlar Tablo 2.4'te verilmiştir [19].

Tablo 2.4. Reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri [19].

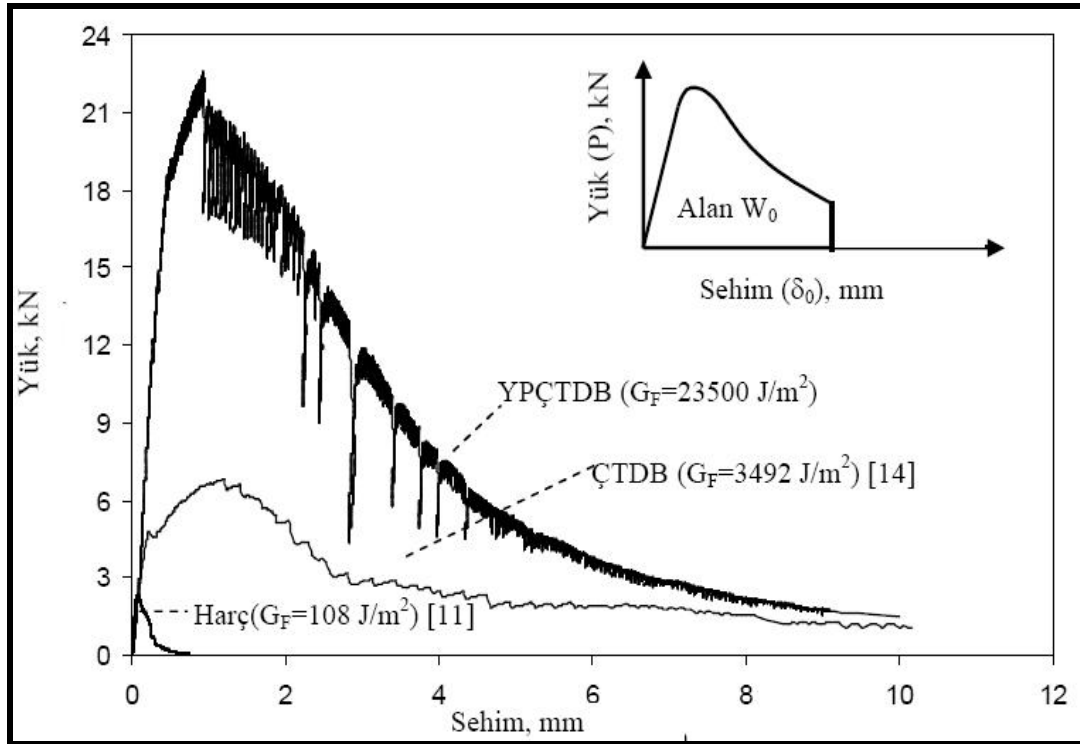
Özellikler	RPB200	RPB800
Basınç dayanımı (MPa)	194-203	422-520
Statik elastisite modülü (GPa)	62-66	63-74
Dinamik elastisite modülü (GPa)	59-61	32-36
Statik poisson oranı	0,22-0,24	0,19-0,28
Dinamik poisson oranı	0,22-0,24	-
Lineer elastik sınır (dayanımın) (%)	60	-

Aynı araştırmacılar RPB'yi normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile karşılaştırmışlardır (Tablo 2.5).

Tablo 2.5. RPB'nin mekanik özelliklerinin, normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile karşılaştırılması [19].

Mekanik Özellik	Normal Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	Reaktif Pudra Betonu
Basınç dayanımı (MPa)	20-50	60-80	200-800
Eğilme dayanımı (MPa)	4-8	6-10	15-140
Kırılma enerjisi (J/m ²)	130	140	1000-40000
Son gerilme uzaması (10 ⁻⁶)	100-150	100-150	2000-8000

Tablo 2.5 incelendiğinde RPB'yi, normal ve yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırıldığında RPB'nin mekanik özelliklerinin diğer betonlardan çok üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca, RPB'lerin en önemli özelliğinin yüksek enerji yutma kapasitesi olduğu görülmektedir. Karışıma eklenen çelik lifler sayesinde malzeme çok daha sünek bir davranış sergilemekte ve bunun sonucu olarak ta daha fazla enerji yutarak kırılmaktadır. Şekil 2.4'te Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB), Çelik Tel Donatılı Beton (ÇTDB) ve Normal harcın kırılması karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere UYPB normal harca göre daha uzun sürede ve çok daha büyük şekil değiştirme yaparak kırılmakta, böylelikle normal harca göre çok daha fazla enerji yutmaktadır [20].

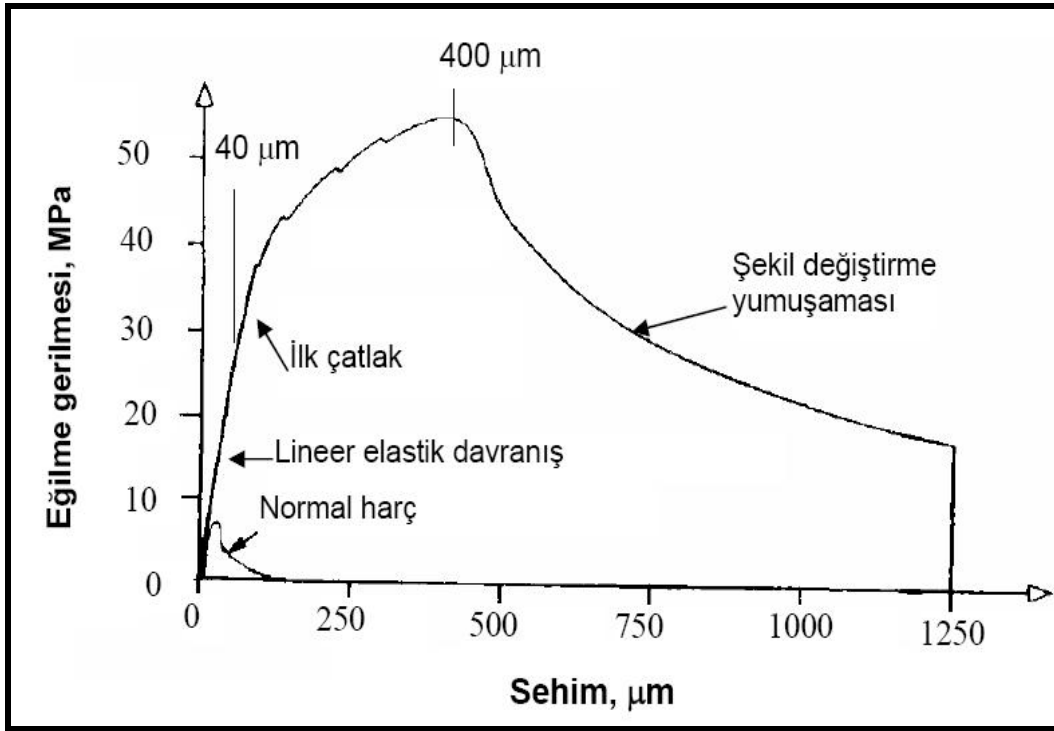


Şekil 2.4. Normal harç, çelik tel donatılı beton ve yüksek performanslı çelik tel donatılı betonun (RPB) eğilme davranışı [20].

Lif katkılı reaktif pudra betonunda en büyük yük, ilk çatlak yükünü belirgin biçimde aşmakta olup, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında, çeliğin gerilme deformasyon grafiğinde olduğu gibi, şekil değiştirme sertleşmesi sergilenmektedir (Şekil 2.5).

Şekil 2.5'te normal harcın ve RPB200'ün (basınç dayanımı 200 MPa) basit kiriş halindeki mekanik davranışını göstermektedir. Eğilme dayanımı ilk çatlama gerilmenin iki katı kadar yüksektir. Maksimum gerilmedeki deplasman ilk çatlaktaki deplasmandan yaklaşık 10 kat daha büyüktür [20].

Mikro yapının çok iyi olması, kompasitesinin yüksek olması ve mikro boyutta kullanılan malzemeler nedeniyle RPB'de geçirimsizlik çok düşük olmaktadır. Bu da dayanıklılığa direkt olarak olumlu etki yapmaktadır. Tablo 2.6'da ise RPB ile normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların durabilite yönünden karşılaştırılması verilmektedir [21-25]. Dayanıklılık özellikleri sayesinde RPB'ler, radyoaktif malzemelerin, kimyasal atıkların depolanması gibi yerlerde tercih edilmektedir.



Şekil 2.5. Normal harç ve lif katkılı RPB200'ün eğilme davranışı [20].

Tablo 2.6. RPB ile normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların dayanıklılık yönünden karşılaştırılması [21-25].

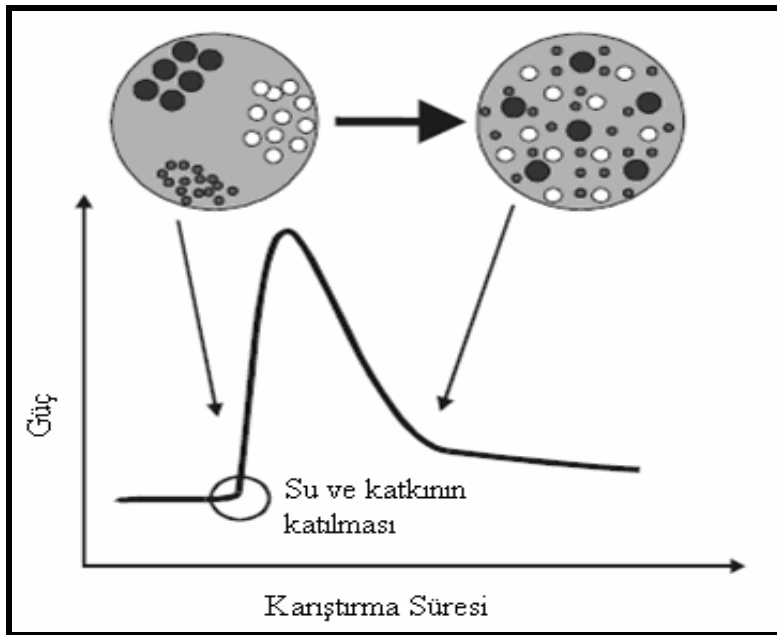
Özellik	Normal Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	RPB
Permabilite K (m ²)	6,7 ⁻¹⁷	4 ⁻¹⁷	0,01 ⁻¹⁷
Aşınma dayanımı	-	-	2-3 kat>YDB
Donma Çözünme (Çevrim)	50	150	Zarar yok
Su emme	1-4	0,25	0-0,05

2.1.4. RPB'nin üretim teknolojisi

RPB'nin mekanik özelliklerinin artması ile üretin teknolojisi değişmekte ve zorlaşmaktadır. Basınç dayanımı 200 MPa (RPB200) civarında olan RPB'nin üretim teknoloji normal betonlara yakın olmasına rağmen yine de ayrı bir teknik ve deneyim gerektirmektedir. RPB, düşük su/çimento oranına sahip bir beton olduğu için betonu kimyasal katkı yardımıyla akıcı bir hale getirmek gerekmektedir. Yeni nesil kimyasal katkıların diğer katkılardan ayıran en büyük özellik, hem diğer katkılar gibi çimento

tanelerini eksi elektrik yüklü birer elektron haline getirmesi hem de çimento ve diğer taneleri fiziksel olarak sararak birbirlerine yapışmamalarını ve birbiri üzerinde kaymalarını sağlamaktadır. Ancak katkıları betona karıştırıldıktan hemen sonra etkilerini gösterememektedir. Betonu bir süre karıştırdıktan sonra etkilerini yavaş yavaş göstermektedirler. Bu nedenle katkı etkisini gösterene kadar ki karıştırma işlemi önem kazanmaktadır.

RPB'nin karıştırma işlemi üzerine Ma ve Orgass bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda karıştırma işlemi ile ilgili Şekil 2.6'daki grafiği elde etmişlerdir. Grafiğe göre, karıştırmada harcanan güç, katkı ve suyun eklenmesi ile ani olarak artmakta ve daha sonra katkının etkisini göstermesiyle yine ani olarak azalmaktadır [26].



Şekil 2.6. Karışım işlemi süresince güç tüketimi [26].

Karışımında kullanılan mikserin Şekil 2.6'daki tepe noktasını aşacak güçte olması gerekmektedir. Aksi takdirde tepe noktası aşılamamakta ve beton elde edilememektedir. RPB'nin kıvamı genellikle likit duruma yakındır. Kendiliğinden kalıba yerleşme eğilimindedir. RPB200 için yerleştirmede genellikle herhangi bir ek işleme gerek yoktur. RPB800 için ise basınç uygulayarak sıkıştırılması ve bu basınç altında prizini alması gerekmektedir. Bu ayrı bir teknoloji ve beraberinde de bir

maliyet getirmektedir. Bu sıkıştırma işleminden dolayı RPB800 sadece prefabrik elemanların üretimi için uygundur.

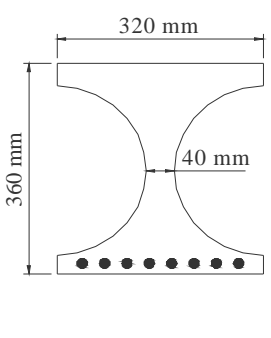
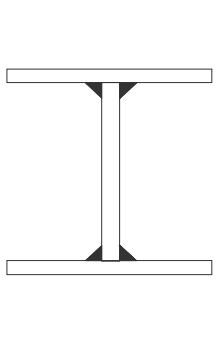
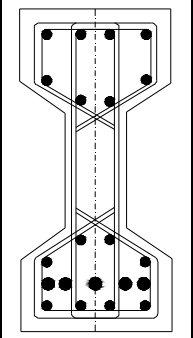
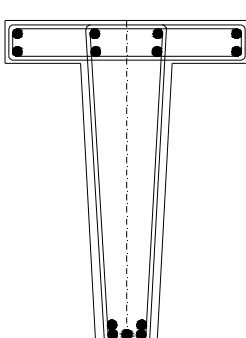
RPB'ye farklı tiplerde kürler uygulanmaktadır. RPB200 için normal beton kürü uygulanabildiği gibi sıcak kür işlemi de uygulanabilmektedir. RPB200 ve RPB800 de yüksek dozajda puzolan kullanıldığı için genellikle sıcak kür işlemi tercih edilmektedir. Bu kür tipleri, 20°C su, 90°C buhar, 90°C sıcak su, basınçlı buhar kürü, 200-500°C arasında sıcak hava ve bu kürlerin birbiri ile kombinasyonu şeklinde olabilmektedir. RPB800 için istenilen dayanıma ancak yüksek derecelerdeki kür işlemi ile ulaşılabilir. Yüksek derecelerdeki (250°C-400°C) sıcaklık hem puzolanik aktiviteyi hızlandırır hem de sertleşmiş pastanın büyük ölçüde yeniden hidratasyonuna eşlik ederek kristal hidratelerin oluşumuna yol açar [5, 12, 13, 14, 15].

2.1.5. RPB'nin kullanım alanları

Mekanik ve dayanıklılık özellikleri bakımından diğer betonlara göre daha üstün olan RPB'nin, şantiye şartlarında üretimi oldukça zordur. Bu nedenle şu ana kadar bütün ürünler prefabrik olarak üretilmiştir. Prefabrik olarak üretilen elemanlar genellikle köprülerde kullanılan kirişler şeklinde olmuştur.

Normal beton ile üretilen prefabrik ön gerilmeli kirişlerde, çelik ön germe halatlarının dışında, üretilen elemanın bütünlüğünün bozulmaması ve kompozit olarak hareket edebilmesi için ikinci bir donatı konulmasından dolayı maliyeti arttırmaktadır. RPB ile yapılan ön gerilmeli prefabrik kiriş elemanlarda ikinci bir donatıya gereksinim duyulmamakta ve eleman boyutları küçülmektedir. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmanın sonuçları Tablo 1.7'de verilmiştir (27-29). Tablo 1.7'de RPB, aynı moment taşıma kapasitesine (675 kNm) sahip, çelik, ön gerilmeli beton ve betonarme kirişler ile karşılaştırılmıştır. Burada RPB, çeliğe alternatif bir malzeme olarak gösterilmiştir. Geleneksel betonda biraz pahalı olmasına karşılık çelik malzemeden daha ucuzdur. Büyük mimari özgürlüklere sahip çok narin yapıların tasarımına olanak sağlamaktadır.

Tablo 2.7. Eşit moment taşıma kapasitesine sahip kirişlerinin karşılaştırılması [27-29].

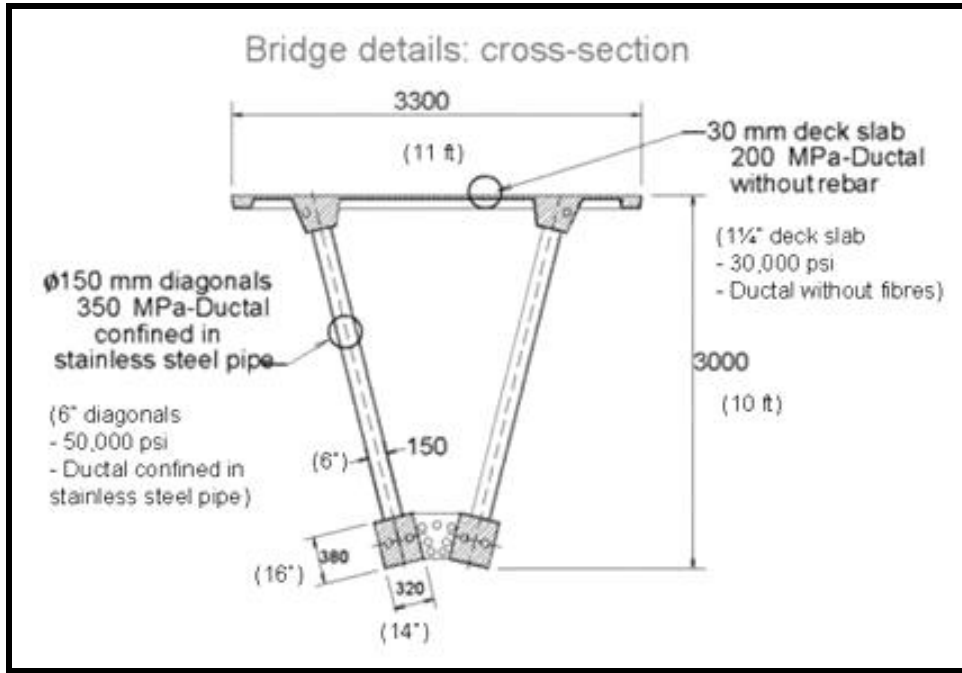
Kesit şekli				
Kesit tipi ve yüksekliği	Ön Gerilmeli RPB	Geniş Tablalı Çelik	Ön Gerilmeli Beton	Betonarme
	360 mm	360 mm	700 mm	700 mm
Ağırlık	130 kg/m	110 kg/m	470 kg/m	530 kg/m

RPB200'ün üretiminde ön basınç tekniği kullanılmaz ve geleneksel yüksek performanslı betonların üretimi ile benzerlik gösterir. Bu betonların yüksek süneklik göstermesi nedeniyle geleneksel pasif güçlendirmeye tabi olmayan yapılar için kullanıma elverişlidir. RPB'nin çekme ve basınç dayanımının yüksek olması nedeniyle çekme ya da eğilmeye çalışan ön gerilmeli elemanlarda kullanılır.

RPB800 yalnız prekast elemanların üretimi için kullanılır. RPB800 askeri yapılarda, mekanik parçaların üretiminde çeliğin yerine kullanılabilceği düşünülmektedir. Bu malzeme hem de patlama dağılma kopma etkisi yönünden çok iyi dayanıklılığına sahip olması ile askeri ekipman ve yapılarda kullanılabilir. Mekanik özelliklerin haricinde RPB betonlar ultra yoğun bir mikro yapıya sahiptirler. Buda dayanıklılık ve su geçirmezlik avantajı verir. Bu malzemeler endüstriyel ve nükleer atıkların depolandığı tesislerde de kullanılabilir [5, 30].

Reaktif pudra betonlarının ilk kullanımı, 1997 yılında Kanada'nın Quebec eyaletinin güney doğusunda bulunan Sherbrooke şehrinde bir yaya köprüsünde olmuş ve köprülerde kullanımı daha sonraki yıllarda giderek artmıştır (Şekil 2.7) [6].

Bu köprü Magog nehri üzerine ve daha önceden nehir üzerindeki çelik yaya köprüsünün hemen yanına yapılarak inşası bittikten sonra eski çelik köprü yıkılmıştır. Yapım amacı, yeni bir malzemenin denenmesinin yanı sıra estetikliktir. Köprü kirişleri ticari isim olarak Lafarge firmasının Ductal isimli sistemi ile yani ince cidarlı ve ön gerilmeli olarak yapılmıştır. Ductal ismiyle yapılan köprülere ait detaylı resimler Ek A'da verilmiştir.



Şekil 2.7. Sherbrooke şehrindeki, RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü kiriş kesiti [31].

Köprü yaya ve bisiklet köprüsü olarak prefabrik ve ön gerilmeli olarak imal edilmiştir. Köprünün açıklığı 60 m, genişliği 3,30 m'dir. Köprü, 6 adet 10 m uzunluğunda 3,30 m genişliğinde ve 55 ton ağırlığındaki parçaların bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur. Köprüde kullanılan diyagonal elemanlar 150 mm'lik paslanmaz çelik tüplerin içerisine yaklaşık 200 MPa basınç dayanımına sahip RPB doldurulup sıkıştırılması ile elde edilmiştir [31]. Ayrıca köprünün diğer bütün betonlarında aynı RPB kullanılmıştır.

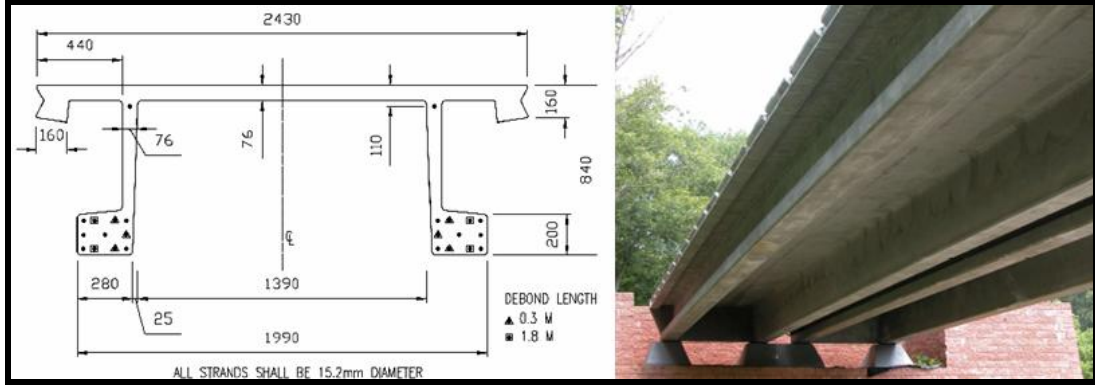
RPB kullanılarak 2005 yılında Avustralya'da Shepherds ırmağı üzerine araç köprüsü yapılmıştır (Şekil 2.8, 9) [32].



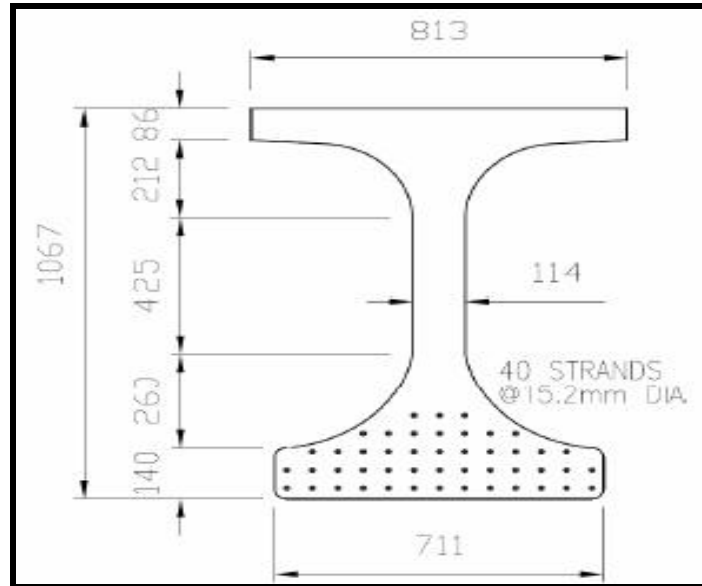
Şekil 2.8. Shepherds ırmağı üzerindeki, RPB kullanılarak yapılan ilk araç köprüsü kirişi [32].

Toplam açıklığı 15 m uzunluğunda olan ve 20,8 m genişliğinde olan köprünün yapımı prefabrik ve ön gerilmeli I kesitindeki RPB kirişler ile gerçekleştirilmiştir. Köprünün yapım aşaması, normal betonla yapılan köprü ile aynı şekilde olmuştur. Köprünün 15,1 m uzunluğundaki I kirişlerinin ağırlığı 4,2 ton olurken, aynı taşıma kapasitesine sahip normal beton ile yapılanın ağırlığı 9 ton olarak hesaplanmıştır. Bu RPB ile yapılan elamanların ağırlık yönünden daha üstün olduklarını göstermektedir.

Amerika'da araştırmacılar, RPB ile araştırma amaçlı portatif bir RPB köprüsü yapmışlardır (Şekil 2.9) [33]. RPB'den ilk kez otoban köprüsü 2005 yılında Amerika'da yapılmıştır (Şekil 2.10) [34, 35]. Köprü kirişlerinin uzunluğu 35,6 m ve kesiti şekildeki gibi PI şeklindedir. Kirişler ticari isim olarak adlandırılan Lafarge Ductal sistemi ile yapılmıştır.

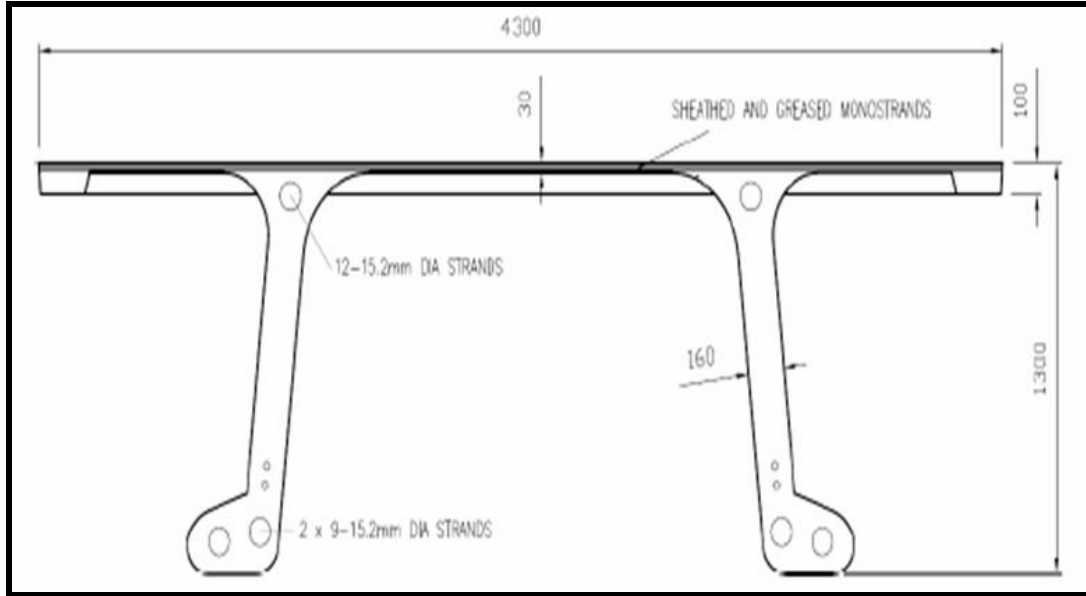


Şekil 2.9. RPB'den araştırma amaçlı yapılmış köprü ve kirişi [33].



Şekil 2.10. Wapello'daki, RPB kullanılarak yapılan şehir köprüsü kirişleri [34, 35].

RPB'den yapılan en büyük köprü Kore Sunyudo'da 2002 yılında, 120 m açıklığında olan yürüyüş ve bisiklet köprüsüdür (Şekil 2.11-12) [36]. Köprü kirişleri ticari isim olarak adlandırılan Lafarge Ductal sistemi ile PI şeklinde Şekil 2.11'de verilen şekildeki ölçülerde yapılmıştır.



Şekil 2.11. Sunyudo'da üzerinde RPB kullanılarak yapılan ilk köprünün kiriş kesiti [36].



Şekil 2.12. Sunyudo'da üzerinde RPB kullanılarak yapılan ilk yaya köprüsü [36].

RPB kullanılarak yapılan diğer bir yaya köprüsü de Japonya'da yapılan Sakata-Mirai yaya köprüsüdür (Şekil 2.13) [37]. Yaya köprüsü parça kirişlerden prefabrik ve ön gerilmeli olarak yapılmıştır.



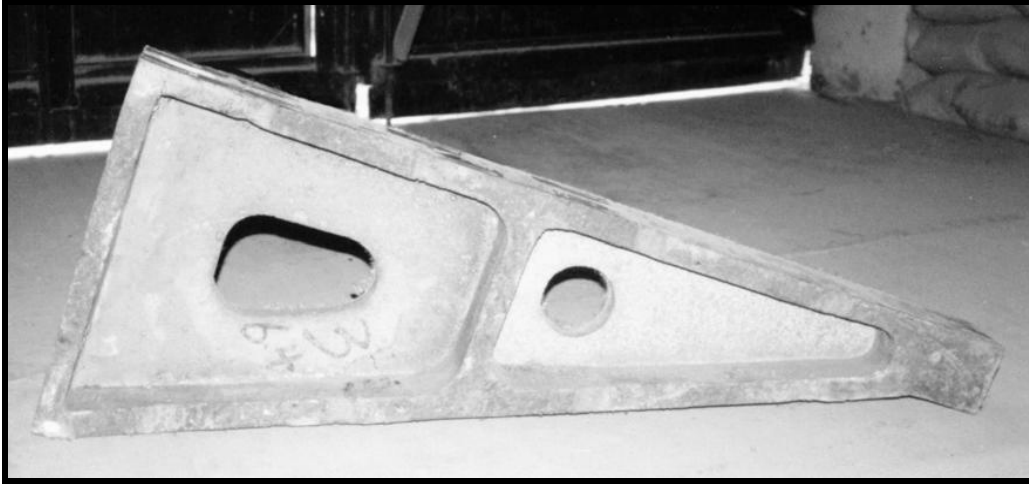
Şekil 2.13. Sakata-Mirai RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü kirişleri [37].

RPB kullanılarak yapılan ilk üst geçit köprüsü Yeni Zelenda'da yapılmıştır. [38]. Köprü toplam 10 adet ayağa, toplam 120 m uzunluğa ve en büyük 20 m açıklığa sahiptir (Şekil 2.14).

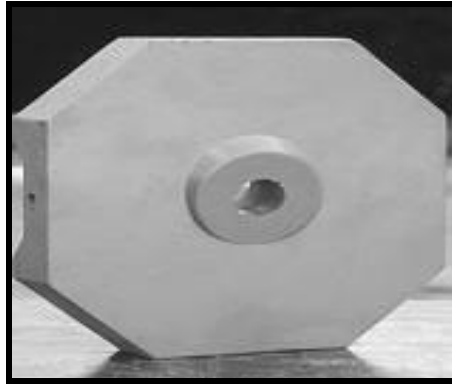


Şekil 2.14. Papatoetoe ve Penrose RPB kullanılarak yapılan üst geçit köprüsü kirişleri [38].

Üst geçit köprüsü Şekil 2.14'teki gibi tek bir parça kirişten prefabrik ve ön gerilmeli olarak yapılmıştır. Köprü kirişlerin dışında RPB, ankraj plakası, ses bariyeri, kaldırım elemanları, yağmur suyu ızgaraları ve kapakları gibi prefabrikasyon üretime uygun yapı elemanları üretilmektedir (Şekil 2.15-18) [39-41].



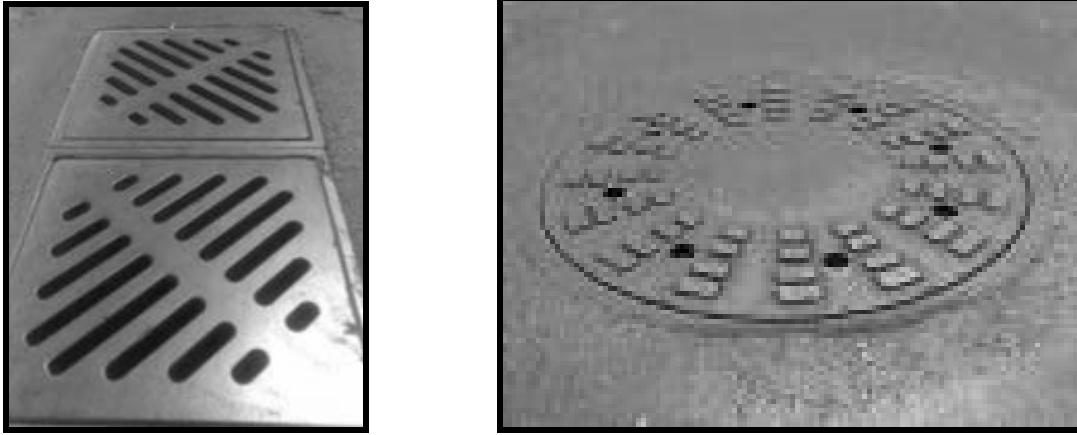
Şekil 2.15. RPB kullanılarak yapılan yaya kaldırımı elemanı [39].



Şekil 2.16. RPB kullanılarak yapılan ankraj plakası [40].



Şekil 2.17. RPB kullanılarak yapılan ses bariyeri [40].



Şekil 2.18. RPB kullanılarak yapılan yağmur suyu ızgaraları ve rögar kapağı [41].

2.1.6. RPB ile ilgili literatür taraması

Reaktif pudra betonu, Richard ve Cheyrezy tarafından geliştirilmiş ve bu araştırmacılar bir dizi çalışmalar yapmışlardır [5]. Çalışmalarındaki amaç, içyapısı daha sıkı tane düzenine sahip olan ve mümkün olan en sıkı mikro yapıyı elde etmek ve bu mikro yapıyı yine mikro boyuttaki teller ile güçlendirerek çimento matrisli en yüksek dayanımlı betonu elde etmektir. Çalışmada aynı zamanda taze betonu 50 MPa basınç altında sertleştirerek betona farklı sıcaklıklarda kür işlemi uygulamış ve dayanımın büyük oranda arttığını gözlemlemişlerdir. RPB'yi, basınç dayanımlarına göre RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki farklı gruba ayırmışlardır. Bu ayırımın asıl amacı karışıma giren malzemelerin farklılığı ve üretim teknolojisinin farklılık göstermesidir. RPB200 normal betonun üretim teknolojisi ve kür ortamına benzer yöntemlerle üretilen, basınç dayanımı 170 MPa ile yaklaşık 230 MPa arasında olan RPB'nuna denilmektedir. RPB800 ise karışımında çelik agrega gibi farklı malzemeleri bulunan ve üretim teknolojisi ile kür ortamı farklılık gösteren ve basınç dayanımı 490 MPa ile 810 MPa arasında olan RPB'nuna denilmektedir. Daha sonra bu tür bir ayırım dikkate alınmamış karışım ve üretim teknolojisi RPB200 olan ama uygulanan kür tekniği RPB800 olan veya karışımı RPB200 olup üretim tekniği RPB800 olan farklı çalışmalar yapılmıştır [19, 42, 43,44].

P. Richard ve M. Cheyrezy tarafından yapılan bu ilk çalışma [5], RPB üretimi için bir rehber olmuş ve bundan sonra yapılan çalışmaların temel kaynağını oluşturmuştur.

Dugat ve arkadaşları [19] yaptıkları çalışmada, RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki değişik karışım üzerinde basınç ve eğilme deneyleri yapmışlardır. Ürettikleri RPB200 numunelere, 7 gün 20°C'de su kürü, 4 gün 90°C'de sıcak su kürü ve 2 gün 90°C'de kuru sıcak hava kürü olmak üzere 3 farklı türde kür uygulanmışlardır. Ürettikleri RPB800 türdeki betonlara yerleştirme ve sertleşme sırasında 60 MPa basınç uygulamışlardır. Ayrıca RPB800 numunelere 4 gün 90°C sıcak su ve ardından 250°C'de ısıtma işlemi kürü uygulamışlardır. RPB200 numunelerinde basınç dayanımını yaklaşık 200 MPa, elastisite modülünü 66 GPa, eğilme dayanımını ortalama 32 MPa olarak bulmuşlardır. RPB800 numunelerinde ise basınç dayanımını yaklaşık 500 MPa ve elastisite modülünü 36 ile 74 GPa olarak bulmuşlardır. Ayrıca betona katılan lif hacminin kırılma enerjisine olan etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde, kırılma enerjisini 40,000 J/m² ulaştırmışlar ve lif hacmini optimum olarak %2 ile %3 arasında bulmuşlardır.

Chan ve Chu [45] yaptıkları çalışmada, RPB matrisinin çelik tellere yapışma özelliklerine, silis dumanının etkisi, yapışma dayanımı, pull-out enerjisi gibi özelliklerini araştırmışlardır. Silis dumanı içeriğini, %0'dan %40'a kadar çeşitli karışım oranlarında kullanmışlardır. RPB matrisine, çelik telin yapışma özelliklerini pull-out testi ile ölçmüşlerdir. Sonuç olarak, silis dumanının karıştırılması tel-matris ara yüzey özelliklerini özellikle de telin pull-out enerjisini etkili bir şekilde arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Yapışma özellikleri açısından optimum silis dumanı içeriğinin %20 ve %30 arasında olduğunu göstermişlerdir. Bu oranlar aynı zamanda mikro yapısal ara yüzey gözlemlerde, pull-out test sonuçlarını doğruladığını görmüşlerdir.

Bonneau ve arkadaşları [43] yaptıkları çalışmada, RPB'nin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada üç değişik karışımla oluşturulan numuneler, basınç dayanımı, donma ve çözülme direnci ve klorür iyonu geçirimsizliği açılarından test

edilmişlerdir. Aynı zamanda çelik bir tüp içinde kapalı RPB'nin davranışı da incelemişlerdir. Çalışmalarının sunucunda aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir.

- RPB malzemelerinin seçiminde dikkat ve özen gösterilmesi ve karışımın düzenlenmesinin tane boyut dağılımı açısından optimize edilmesi şartıyla, uygun yerel malzemeler kullanılarak yapılabilir.
- RPB, normal hazır betonlar gibi üretilebilir.
- 90 °C de sıcak su kürü ve veya standart düşük basınçlı buhar kürü uygulanan numuneler için 200 MPa ve kapalı çelik tüpteki RPB numuneleri için de 285 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir.
- Numuneler donma - çözülme deneylerinde yüksek dayanım göstermiş ve çok az bir kütle kaybı gözlenmiştir.
- Klorür iyonu geçirimsizliği çelik lifli numunelerde 10 Coulomb'un altında kalmıştır.

Matte ve Moranville [30] yaptıkları çalışmada, RPB'nun nükleer atıkların depolanmasında kullanımının uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Çalışmalarında, RPB'nun iç yapısını (Scanning electron microscopy) ve (X-ray diffraction analyses) inceleyerek, malzemedeki Ca (kalsiyum) konsantrasyonundaki değişimi inceleyerek nükleer atıkların beton içerisindeki ilerlemesini tahmin etmeye çalışmışlardır. RPB içinde silis dumanının yararlı etkilerini X ışını difraksiyon analizleri (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), trityum yayını ve boşluk dağılımı analizlerini (civalı porozimetre (MIP)) kullanarak göstermişlerdir. Sonuç olarak silis dumanının poroziteyi ve dayanıklılık üzerinde yararlı etkiye sahip olduğunu ve nükleer atıkların depolanmasında RPB'nin kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmaya benzer olarak, çimento matrisinin hidrasyon gelişimi ile elektriksel iletkenlik ve izotermal kalorimetri arasındaki ilişki araştırılmış ve sonuçta

hidratasyon derecesi ile iletkenliğin logaritması arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür [46].

Bayard ve Ple [47] yaptıkları çalışmada, RPB’de kullanılan mikro liflerin döküm işlemlerinin etkisi ile yön değişiminin, mekanik davranışına etkisini incelemişlerdir. En yüksek ilk çatlak dayanımını, liflerin 0° ile 45° açı ile düzenlendiği zaman verdiğini göstermişlerdir.

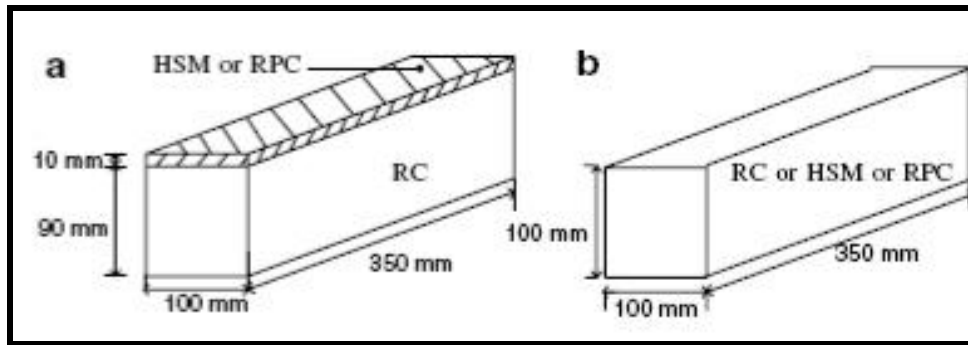
Ma ve Orgass [26] yaptıkları çalışmada, kaba agrega (bazalt 2-5 mm) kullanılan ultra yüksek performanslı beton ile kaba agrega kullanılmayan reaktif pudra betonunu karşılaştırmışlardır. Betonlara normal su kürü ve 90°C buhar kürü olmak üzere iki tip kür uygulamışlar ve 150-180 MPa arasında dayanımlı betonlar elde etmişlerdir. Sonuç olarak basınç dayanımı ve akıcılığı benzer olan ultra yüksek performanslı betonun çimento hacim oranı, reaktif pudra betonundan yaklaşık %20 daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Ultra yüksek performanslı betonun karışımı, akıcılığı ve homojenliği reaktif pudra betonundan daha kolay olduğunu ve kısa sürdüğünü ifade etmişlerdir. Ultra yüksek performanslı betonun otojen rötresi, reaktif pudra betonun otojen rötresinin %60’ı kadar olduğunu ve ultra yüksek performanslı betonun maksimum gerilme altındaki deformasyonun, reaktif pudra betonuna göre daha az ve buna bağlı olarak elastisite modülünün daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Sadrekarami [27] yapmış olduğu çalışmada, reaktif pudra betonunun birim hacim ağırlığını azaltmak için çimento ağırlığının %35 ile %100 aralığında yüksek oranda silis dumanı kullanmıştır. Çimento ağırlığının %80 oranında silis dumanı kullanarak birim ağırlığı, 2,45 t/m³’ten 1,93 t/m³ değerine kadar düşürmüştür. Yüksek oranda silis dumanı miktarı ile üretilen numunelerin bir kısmına 240°C etüv kürü bir kısmına da 90°C buhar kürü uygulamıştır. Etüv kürü uyguladığı bazı numuneleri, taze haldeyken 40 MPa’lık basınç uygulayarak sıkıştırmıştır. Sonuç olarak, 240°C etüv kürünün, 90°C buhar kürüne göre yoğunluğu azalttığı ve basınç dayanımını arttırdığını ifade etmiştir. Bunun nedenini, yüksek sıcaklıkta katılaşmış çimento pastasında yeniden hidratasyonun canlandığı ve kristalize olmuş hidratasyon ürünlerinin (C₆ S₆ H₆), kristalize olmamış C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrate)

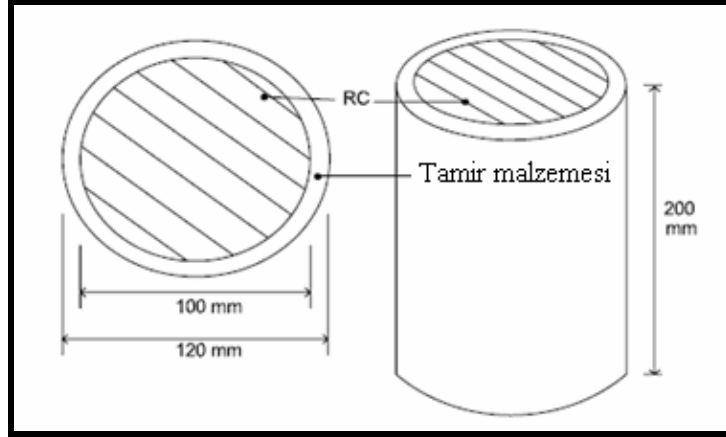
ürünlerden daha hafif olmasına bağlamıştır. Ayrıca taze haldeki betona uygulanan basıncın, birim hacim ağırlığı ve dayanımı arttırdığını ifade etmiştir.

Teichman ve Schmidt [25] yaptığı çalışmada, RPB'nin yapısal özelliklerini inceleyerek, bu yapısal özelliklerin dayanım ve dayanıklılığa etkisini incelemiş ve diğer beton türleri ile karşılaştırmışlardır. Normal ve yüksek dayanımlı beton örneklerine 20°C su kürü, ultra yüksek performanslı beton örneklerine 2 gün 90°C buhar kürü ve RPB örneklere kalıptan çıkartıldıktan 2 gün sonra, 250°C sıcak kürü 7 gün uygulamışlardır. Ayrıca RPB numunelerine taze haldeyken 50 MPa basınç uygulamışlardır. Dayanıklılık özellikleri olarak en iyi özellikleri RPB'nin verdiğini ifade etmişlerdir. Basınç dayanımı bakımından da en iyi dayanımı 487 MPa ile RPB numunelerinden elde etmişlerdir [25].

Lee ve arkadaşlarının [48] yaptığı çalışmada, RPB'yi betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Normal beton kullanılarak, eğilme ve basınç numuneleri üreterek, eğilme numunelerinin alt kısmına ve basınç numunelerinin etrafına RPB ve tamir harcı yapıştırmışlardır. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek için yalın normal beton, tamir harcı ve RPB kullanarak numuneler üretmişlerdir (Şekil 2.19-20).



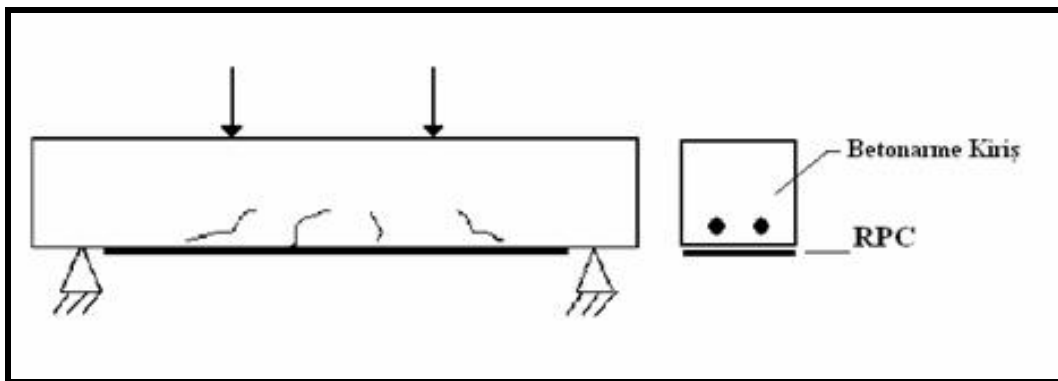
Şekil 2.19. Eğilme testi için tamir malzemeli ve malzemesiz numune boyutları a) Tamir harcı/normal beton yada RPB/normal beton numune boyutları b) Normal beton, tamir harcı ve RPB numune boyutları [48].



Şekil 2.20. Basınç testi için tamir malzemeli numune boyutları [48].

Bu şekilde hazırladıkları numuneleri aynı geometrik boyuttaki yalın normal beton, RPB ve tamir harcı ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak en yüksek eğilme dayanımı sırasıyla, yalın RPB, RPB ile güçlendirilmiş normal beton, yalın normal beton, tamir harcı ile güçlendirilmiş beton ve yalın tamir harcı vermiştir. En yüksek basınç dayanımını ise sırasıyla, yalın RPB, yalın tamir harcı, RPB ile güçlendirilmiş normal beton, tamir harcı ile güçlendirilmiş beton ve normal beton vermiştir.

Yerlikaya [49] yaptığı çalışmada, reaktif pudra betonunu, çelik bir levha gibi betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanmıştır. 2 cm kalınlığında imal edilen levhalar, epoksi ile kiriş altına yapıştırılarak güçlendirme yapılmıştır (Şekil 2.21). Sonuç olarak, reaktif pudra betonunu kullanılarak, yapıların daha ekonomik ve hızlı olarak güçlendirilmesinin mümkün olabileceğini ifade etmiştir.



Şekil 2.21. RPB'nin güçlendirmede kullanılması [49].

Yazıcı [50] yaptığı çalışmada, toz hale getirilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanını portland çimentosuna katarak bir çalışma yapmıştır. Uçucu kül ile yüksek fırın cürufu, çimento ile %0-20-40-60-80 oranlarında yer değiştirmiştir. Bazalt ve kuvars tozu, karışımlarda agrega olarak kullanılmıştır. Üç farklı kür yöntemi (Standart, autoclave ve buhar kürü), örneklere uygulanmıştır. Standart kür 20°C sıcaklıktaki su içerisinde 28 gün, autoclave kürü, 210°C sıcaklıkta 2.0 MPa buhar basıncında, 8, 16 ve 24 saat olmak üzere 3 farklı sürede, buhar kürü, 90°C sıcaklıkta basınçsız ve 6 ile 12 gün olmak üzere iki farklı sürede, numunelere uygulanmıştır. Test sonuçları, yüksek dayanımlı betonunun, yüksek hacimde mineral katkı ile elde edilebileceğini göstermiştir. Bu karışımların basınç dayanımı, 170 MPa'nın üzerindedir. Bu karışımların reaktif pudra betonlarında kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Talebinejad ve arkadaşları [51] yaptığı çalışmada, süper akışkanlaştırıcı miktarı, su/çimento oranı ve çimento miktarının etkisi ile silis dumanı içeriğinin RPB'nin nihai basınç dayanımı üzerine etkisini incelemiştir. 38'den fazla karışım oranı ve farklı kür koşulu uygulanmıştır. Çalışmada lif içeriği %1 olarak sabit tutulmuştur. En iyi sonucu veren karışımın birim ağırlığı 2400 kg/m³ ve basınç dayanımı 300 MPa olarak bulunmuştur. Kür koşulları 20°C ile değişik gün ve sürelerde 90°C olarak farklılık göstermiştir. En iyi çimento içeriği 1900 kg/m³, silis dumanı içeriği %25 olarak bulmuşlardır. En iyi kür tipini, 7 gün 20°C daha sonra 2 gün 90°C suda ve son olarak ta 2 gün 200°C'lik kuru hava olarak belirlemişlerdir.

Rougea ve Borys [52] yaptıkları çalışmada, yüksek performanslı ve ultra yüksek performanslı betonlarda, silis dumanı yerine ince taneli malzeme olarak, toz haline getirilmiş mikro boyutta kireç taşı, silis taşı, phonolith, metakaolin ve uçucu kül kullanmışlardır. Bu betonlar üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, porozite, su emme, karbonatlaşma direnci deneyleri yapmışlardır. Sonuç olarak, su emme değeri sırasıyla en düşük silis dumanı, metakaolin, silis taşı, kireç taşı, phonolith ve uçucu kül olmuştur. Hızlandırılmış karbonatlaşma deney sonucunda hiçbir numunede karbonatlaşma görülmemiştir. Silis dumanı içerikli numunenin basınç dayanımı 200 MPa olurken diğer malzemeler ile üretilen numunelerin basınç dayanımı 150 MPa civarında olmuştur. Silis dumanı içerikli numunelerin eğilme dayanımı 29 MPa

olurken diğer malzemeler ile üretilen numunelerin eğilme dayanımı 25 MPa civarında olmuştur.

Topçu ve Karakurt [53] yaptıkları çalışmada, hazırladıkları RPB karışımını, kalıplara döküldükten sonra 2,5 MPa aksenal basınç kuvveti altında prizini alana kadar kür uygulamışlardır. Daha sonra numunelere 7 gün süreyle 90°C suda ardından da 7 gün süreyle 250°C'de buhar kürüne tabi tutmuşlar ve bu kür sürecinin sonunda numunelere basınç ve eğilme dayanımı deneyleri uygulanmışlardır. Elde edilen sonuçlarda en fazla 253,2 MPa'lık basınç ve 63,67 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşabilmişlerdir.

Yazıcı ve arkadaşları [54] yaptıkları çalışmada, RPB'de yüksek oranda kullanılan silis dumanı ve çimentoyu azaltarak yerine uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu mineral katkıların, autoclave kürü ile RPB'nin basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. İlk olarak silis dumanı ve otoklav kürünün RPB'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İkinci olarak aşama aşama çimento ve silis dumanının miktarını azaltarak yerine farklı oranlarda uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu katmışlardır. Sonuç olarak RPB'de kullanılan uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu önemli bir dayanım düşüşüne yol açmadığını ifade etmişlerdir. Dayanımda en az düşüşe, çimento miktarının, %10 uçucu kül ve %10 granüle yüksek fırın cürufu katkılı numuneler olmuştur.

Copolla ve arkadaşları [55] yaptığı çalışmada, Portland çimentosu ve silis dumanı tipinin RPB'nin performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Serbest C₃A içerikli bir çimento ile beyaz silis dumanı kombinasyonu kullanılarak su/çimento oranını 0,18 kadar düşürmüşler ve 3 gün sonra numunelere 160°C sıcak kür uygulayarak 200 MPa basınç dayanımına kadar çıkmışlardır. Bununla birlikte erken dayanımda ciddi düşüşler olduğunu ifade etmişlerdir. Beyaz silis dumanı yerine gri ve koyu gri silis dumanı kullanımı, su/çimento oranını arttırırken basınç dayanımını (110-160 MPa) düşürdüğünü, bununla birlikte erken dayanımda azalma olmadığını ifade etmişlerdir.

Purkiss [56] yaptığı çalışmada, normal lifli betonların, lif içermeyen betonlara göre yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını incelemek amacıyla değişik lif yüzdelerinde çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bu karışımları 300-800°C arasında değişen sıcaklıklarda deneye tabi tutmuş ve lifli betonların lif şekli ve miktarından bağımsız olarak 600°C'nin altındaki sıcaklıklarda dayanımlarının normal betondan daha yüksek olduğunu görmüştür. Fakat genel olarak 800°C'lik bir sıcaklıkta tüm karışımların dayanımları azalmaktadır.

2.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Ülkemizde RPB ile ilgili henüz kapsamlı bir çalışma yapılmamış ve RPB kullanımının normal betonlara göre oldukça az olduğu görülmüştür. Dünyada özellikle de Avrupa'da konuyla ilgi yapılan çalışmalar oldukça fazla olup bu betonların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. RPB, 1990'lı yılların ortasına doğru ortaya çıkması nedeniyle güncel bir çalışma konusu olmuştur.

Konu üzerinde birçok çalışma yapılmasına rağmen, bu betonların boşluk yapısının azaltılması, yani en az boşluk ile kalıba yerleştirilmesi konusunda çalışma azdır. RPB üzerinde yapılan ön deneylerde yüksek dozajda kullanılan kimyasal katkının, betonun bünyesinde birbirinden bağımsız hava kabarcıklarına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca bağlayıcı dozajının (1000 kg/m^3) normal betonlara göre çok fazla olması kimyasal büzülme sonucu rötrenin artmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzlukların azaltılması için farklı kimyasal katkıları ve farklı yerleştirme teknikleri denenmiş fakat başarılı olunamamıştır. Literatürde de bunun için RPB, kalıba konduktan sonra taze haldeyken sıkıştırılmıştır. Bu konudaki en belirgin çalışma bu betonlar üzerine ilk çalışmayı yapan araştırmacılar tarafından yapılmıştır [5, 27]. Fakat bu çalışmada da beton normal bir çelik kalıba doldurularak, 40 ile 50 MPa'lık tek bir basınç kuvveti altında, 30 dakika veya 24 saat presin altında tutularak basınç uygulamışlardır. Bu şekilde sadece basınç numunesi üreterek sıkıştırma basıncının basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. RPB'ye sıkıştırma basıncı uygulanması detaylı bir şekilde inceleyen çalışmaya şu ana kadar literatürde rastlanılmamıştır. Normal taze betona sıkıştırma basıncı uygulamasında fazla bir zorluk olmamasına rağmen, hem ince taneli hem de akıcı bir betona sıkıştırma

basıncı uygulamak oldukça zordur. Bu zorluk bu konu üzerinde yapılan araştırmaları sınırlı kılmıştır.

Bu literatür ışığında, tezin birinci temel amacı reaktif pudra betonunun, bir çalışma programı çerçevesinde üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesidir.

Tezin ikinci temel amacı ise, RPB'ye sıkıştırma basıncı uygulamasıdır. Bunun işlem için, özel olarak tasarlanmış kalıplar yardımıyla plastik kıvamda bulunan reaktif pudra betonuna sıkıştırma basıncı uygulanmıştır. Kalıplara doldurulan plastik kıvamdaki RPB'yi, farklı basınçlar altında prizini alıncaya kadar tutarak (sıkıştırma basıncı), basınç ve eğilme numuneleri üretilmiştir. Sonuç olarak, priz süresince uygulanan basıncın betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırmaktır.

Tez çalışmasının ana hatları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Karışım oranlarını belirlemek için, RPB'yi oluşturan yerel malzemelerin özelliklerini belirlemek.
- Farklı karışım oranlarını; bilgisayar paket programları, literatür ve farklı karışım teknikleri ile belirlemek ve bunların içerisinden en uygun karışımı seçmek.
- Seçilen karışıma, hacimce farklı oranlarda mikro lif ikame ederek lif miktarının basınç, eğilme parametreleri ve maliyet üzerindeki etkisini incelemek ve uygun lif oranını belirlemek.
- Uygun lif içeriği katılarak hazırlanan deney numunelerine farklı türde kür uygulayarak, kürün dayanıma etkisini belirlemek.
- Önceki adımda belirlenen lif oranını kullanarak üretilen karışıma taze haldeyken özel tasarlanmış kalıp sistemi ile basınç uygulamak ve bu basınç altında prizini alana kadar tutmak. Farklı yük düzeylerinde uygulanan bu

sıkıştırma basıncının; betonun birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı ve elastisite modülüne etkisini incelemek.

- Eğilme numuneleri için de özel tasarlanmış kalıp sistemine taze haldeki karışım doldurularak basınç altında prizini alana kadar tutmak. Farklı sıkıştırma basıncının; betonun birim hacim ağırlığı, eğilme dayanımı ve kırılma parametrelerine etkisini incelemek.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneyde kullanılan malzemelerin, silis dumanı dışında tamamı ülkemizdeki kaynaklardan üretilen malzemelerden temin edilmiştir. Malzeme seçiminde öncelikle malzemelerin her zaman bol miktarda bulunan, homojen özelliklere sahip ve zamanla kalitesi ve özellikleri değişmeyen malzemeler olmasına dikkat edilmiştir.

3.1.1. Çimento

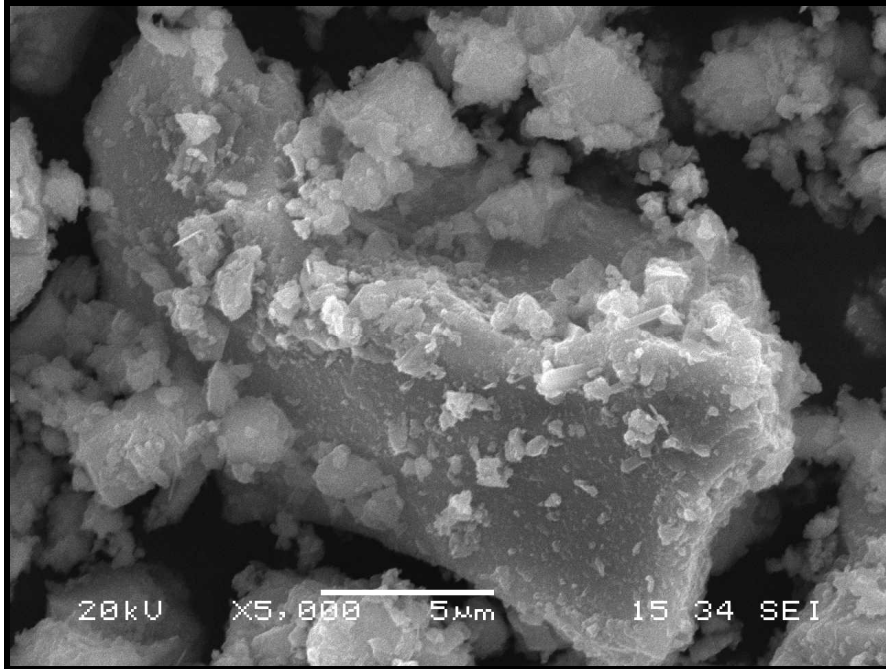
Reaktif pudra betonlarının ana bileşenlerinden miktar olarak en büyüğü olan çimentodur. Bundan dolayı bu betonlarda çimento seçimi çok daha önemlidir. Amaca uygun çimento seçiminde daha önce yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmaların genelinde yüksek performanslı çimentolar kullanıldığı görülmüştür [5, 9, 12, 19, 27, 50]. Ayrıca RPB konusunda yapılan ilk çalışmalarda da yüksek performanslı çimento kullanılmasının gerekliliği vurgulanmıştır [5]. Bu nedenle tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde yüksek performanslı çimento tercih edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların tamamında, Lafarge Aslan Çimento fabrikası tarafından üretilen, PÇ 52,5 CEM I R tipi yüksek performanslı çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait özellikler üretici firmadan temin edilerek, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.1'de verilmiştir. Çimentonun özellikleri incelendiğinde, çimentoya büyük oranda bağlayıcılık özelliği sağlayan C_3S ($3CaO.SiO_2$) ve C_2S ($2CaO.SiO_2$) bileşenlerinin fazla olduğu görülmektedir (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Çimento ve silis dumanının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

	Çimento	Silis Dumanı
Bileşen	Miktarı %	Miktarı %
CaO	64,47	0,50
SiO ₂	20,09	96
C	-	1,50
Al ₂ O ₃	5,01	0,70
Fe ₂ O ₃	2,73	0,25
MgO	1,72	0,60
K ₂ O	0,66	0,85
Cl	0,01	0,10
Na ₂ O	0,21	0,25
P ₂ O ₅	-	0,10
SO ₃	3,03	0,50
H ₂ O	-	0,80
Kızdırma kaybı	2,11	1,50
İri Parçacıklar(>45µm)	-	1,00
pH değeri (taze)	-	5,0-8,0
C ₃ S	60,7	-
C ₂ S	11,8	-
C ₃ A	8,6	-
C ₄ AF	8,3	-
Silikat Modülü	2,6	-
Alümina Modülü	1,8	-
Hidrolik Modül	2,3	-
Toplam alkali	0,58	-
Özellik	Değer	Değer
Blaine özgül yüzeyi	5162 cm ² /gr	200000 cm ² /gr
Birim hacim ağırlık	-	0,650 gr/cm ³
Özgül ağırlık	3,14	2,260
Priz başlangıcı	154 dakika	-
Priz sonu	191 dakika	-
Hacim Genleşmesi	0,8 mm	-
2 günlük basınç dayanımı	39,8 MPa	-
7 günlük basınç dayanımı	54,2 MPa	-
28 günlük basınç dayanımı	61,8 MPa	-

Çimentonun Blain değeri de normal çimentolara (yaklaşık 2000-4000 cm²/gr) göre fazla olduğu görülmektedir. Bu durum betonun su gereksimini arttıracak olmasına rağmen yüksek dayanım için tercih edilmektedir.

Deneyde kullanılan çimento tanelerinin içyapı görüntüleri, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan tarama elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope (SEM)) cihazı ile çekilmiştir. Çimento taneleri geometrik yapı itibarıyla şekilsiz tanelerden oluştuğu görülmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Çimento taneleri SEM görüntüsü

Karışım oranlarının belirlenmesi işlemlerinde çimentonun ve karışıma giren diğer malzemelerin hassas olarak tane dağılımının bilinmesi gerekmektedir [57, 58]. Deneylerde kullanılan çimentonun elek analizi Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin (TÇMA) laboratuvarında kuru olarak lazer tane dağılım analizi ile yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Çimento ve silis dumanının tane dağılımı

Tane Boyutu	Çimento Kümülatif Geçen %	Silis Dumanı Kümülatif Geçen %
1	6,25	0
2	15,26	6,08
3	21,96	8,31
4	27,84	10,59
5	32,95	13,43
10	50,8	35,1
15	65,09	57,06
20	72,64	72,83
25	80,14	82,45
30	85,69	88,23
35	89,62	91,22
40	92,34	94,13
45	94,17	95,67
50	95,36	97,88
60	96,39	97,96
75	96,69	98,73
90	96,71	98,96
100	96,72	98,98
125	96,73	99,00
150	96,81	99,03
200	97,16	99,27
250	97,58	99,55
300	97,95	100
400	98,19	100
500	98,48	100
600	98,97	100
700	99,3	100
800	100	100

Tane dağılımına göre deneylerde kullanılan çimentonun ortalama tane büyüklüğü 10 μm ve tanelerin %90'ından fazlası 40 μm 'nin altındadır.

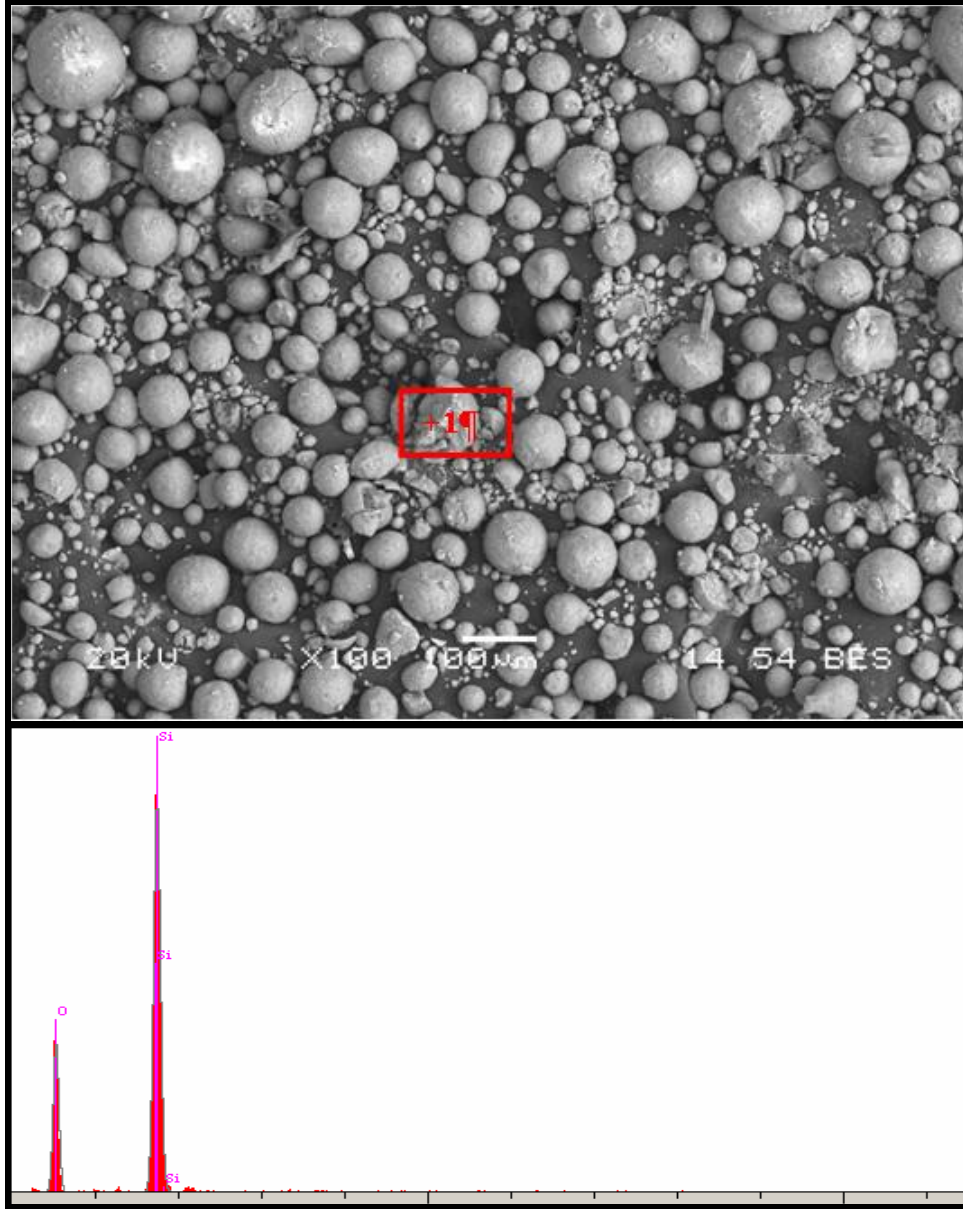
3.1.2. Silis dumanı

Silis dumanı, silikon veya demirli silisyum imalatı sırasında atık olarak ortaya çıkan şekilsiz şeffaf silisyum dioksit (SiO_2) kürelerinden oluşan bir mineraldir (Şekil 3.2). Bu kürelerin ortalama büyüklüğü $0,5 \mu\text{m}$ altındadır yani çimento tanesinden yaklaşık 100 kat daha küçüktür. Silis dumanının Blain değeri yaklaşık $20000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dir [11, 59].

Yapılan deneysel çalışmaların tamamında, silis dumanı olarak Norveç'te bulunan Elkem firmasının 968-U kodlu yoğunlaştırılmamış silis dumanı kullanılmıştır. Ülkemizde ETİ Maden İşletmeciliği tarafından da silis dumanı atık olarak üretilmektedir. Literatürde bulunan çalışmaların tamamında çalışma yapılan ülke fark etmeksizin Norveç'ten ithal edilen silis dumanı kullanılmaktadır. Ayrıca bu ürünün temini kolay olduğu için tercih edilmiştir. Deneyde kullanılan silis dumanı tanelerinin iç yapı görüntüleri SEM cihazı ile çekilmiş ve EDS (energy dispersive spectroscopy) ile çıkartılan kimyasal yapısı Şekil 3.2'de verilmiştir.

Ayrıca silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri üretici firmadan temin edilerek Tablo 3.1'de verilmiştir. EDS sonuçları ile üretici firma tarafından verilen silis dumanı kimyasal içeriği birbiri ile uyumlu olduğu kimyasal içeriğin büyük bir kısmını SiO_2 oluşturduğu görülmektedir. Puzolanik aktivitede ana bileşenlerden birinin SiO_2 olması nedeniyle bu durum oldukça önemlidir.

Karışım oranlarının belirlenmesi işlemlerinde kullanılmak için silis dumanının elek analizi, TÇMA laboratuvarında kuru olarak lazer tane dağılım analizi ile bulunmuş ve sonuçlar Tablo 3.2'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan silis dumanının tane dağılımı üretici firma tarafından verilen verilere göre daha iri tanelerden oluştuğu anlaşılmıştır. Bunun nedeni silis dumanının pazarlanabilmesi için bir miktar yoğunlaştırılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.2. Silis dumanı taneleri ve EDS analizi

3.1.3. Kuvars pudrası

Reaktif pudra betonunun ismindeki pudra kelimesi, bu betonlarda kullanılan mikron boyuttaki silis ve kuvars pudrasından gelmektedir. Kuvars pudrası yapay yani kırma taş agregadır. Pudranın kimyasal özelliklerine ait bilgiler üretici firma tarafından verilmiştir. Fiziksel özelliklere ait bilgiler ise yapılan deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Fiziksel özelliklerden birim hacim ağırlık, özgül ağırlık ve su emme Sakarya Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında, özgül yüzey ise TÇMA

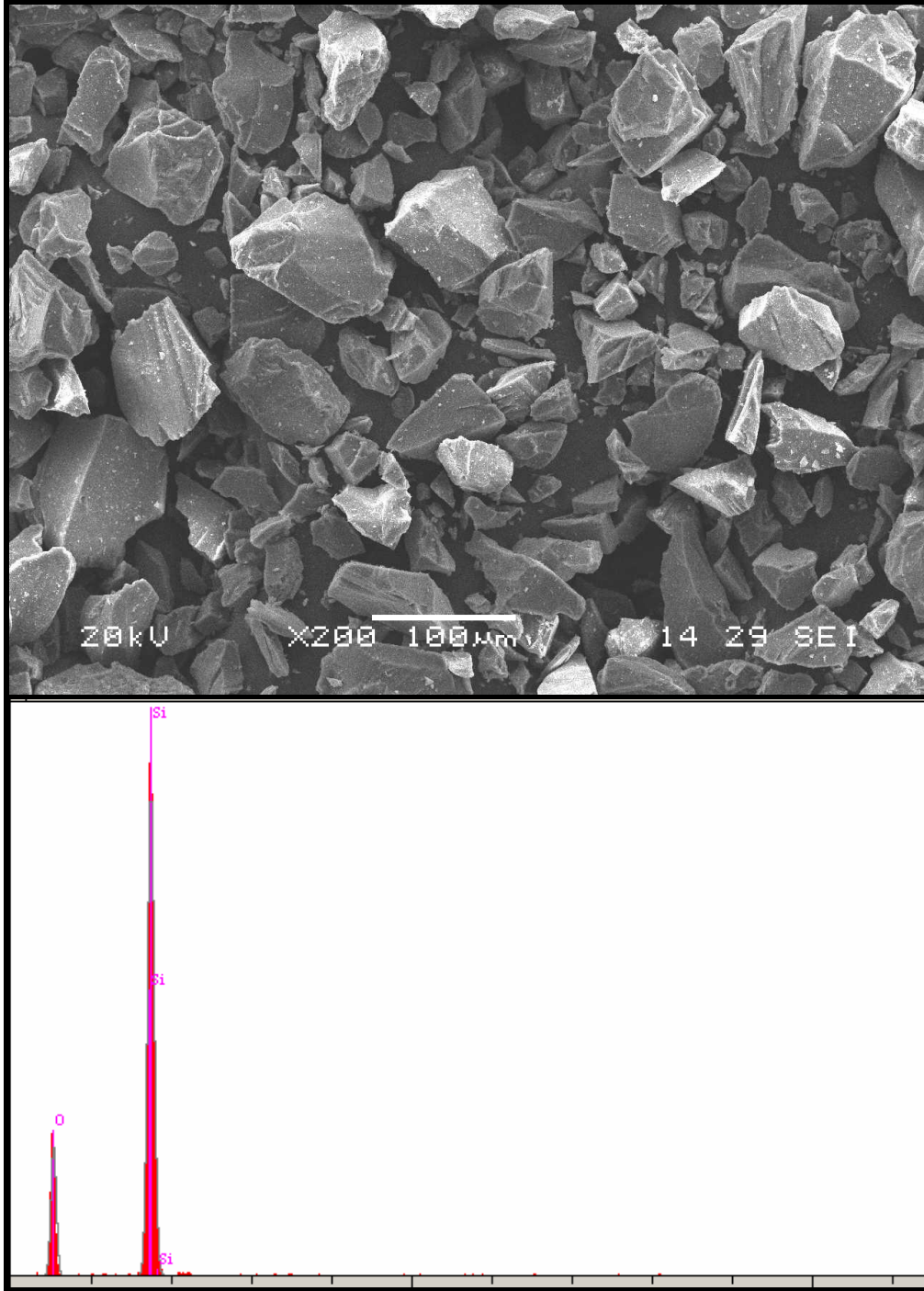
laboratuvarında test edilmiştir. Bu pudraların kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Kuvars pudrasının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Bileşen	Kuvars pudrası %
SiO ₂	99,50
Al ₂ O ₃	0,01
Fe ₂ O ₃	0,01
CaO	-
MgO	-
Na ₂ O+K ₂ O	0,37
TiO ₂	0,07
Kızdırma Kaybı	0,40
Toplam	100
Renk	Beyaz
Yoğunluk	1,341 gr/cm ³
Özgül ağırlığı	2,701 gr/cm ³
Özgül yüzeyi	2142 cm ² /gr
Nem içeriği	% 0,08

Kuvars pudrası normal olarak kum boyutundaki agreganın özel teknikler sayesinde istenilen boyutlara getirilmesiyle oluşmaktadır. Kuvars pudrası, kuvars kayasının parçalanmasından elde edildiği için içerisinde kil veya silt gibi küçük taneler yoktur. Bu pudranın elde edilmesinde kullanılan eleme yöntemi, kuru olarak ve basınçlı hava yardımıyla yapılmaktadır.

Deneylerde kullanılan kuvars pudrası, Aydın’ın Çine ilçesinden Santoz Sanayi Tozları Firmasından elde edilmiştir. Deneyde kullanılan kuvars pudrasının geometrik yapısı (SEM) ve kimyasal içeriği (EDS) Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Kuvars pudrası EDS analizi

EDS sonuçlarına göre kuvars pudrasının tamamına yakını silisyum (Si) ve oksijen (O) oluşturmaktadır ve bu durum üretici firma tarafından da verilen ($\text{SiO}_2 = \%99,5$) kimyasal içerik ile uyşmaktadır.

Kuvars pudrası olarak 0-100 μm tane aralığındaki pudradan numuneler alınmış ve karışım oranlarının belirlenmesi işlemlerinde kullanılmak için bu numunelerin TÇMA laboratuvarında granülometrisi belirlenmiştir. Elek analiz değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Kuvars pudrası elek analiz sonuçları

Tane Boyutu (μm)	Kümülatif Elekten Geçen %
1	2,01
2	4,99
3	7,47
4	9,98
5	12,5
10	23,87
15	32,78
20	39,75
25	45,4
30	50,14
35	54,23
40	57,85
45	61,1
50	64,06
60	75,13
75	85,93
90	96,15
100	100

3.1.4. Kuvars kumu

Genellikle reaktif pudra betonlarında kullanılan en büyük taneye sahip olan malzeme kuvars kumudur. Kuvars kayacı diğer kayalara göre çok sert ve sağlamdır. Normal dayanımlı betonlarda kullanılan agregaların dayanımı yaklaşık 100 MPa iken, kuvars agregasının basınç dayanımı yaklaşık 180 MPa'a kadar ulaşmaktadır. Sertlik olarak da çok sert bir agrega olduğu için aşınma direnci yüksektir [60, 61].

RPB’de istenilen dayanımlara çıkılabilmesi için bu betonlara uygun agrega kullanılmalıdır. Kuvars kumu hem RPB için uygun bir agrega hem de ülkemizde bol miktarda bulunmaktadır. Kuvars kumu elde edilmiş şekli ve mineralojik bakımdan kuvars pudrası ile aynı özelliklere sahiptir ve sadece tane büyüklüğü açısından farklılık göstermektedir. Deneyde kullanılacak malzemelerin fiziksel özelliklerinden birim hacim ağırlık, özgül ağırlık ve su emme Sakarya Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmış, özgül yüzey ise TÇMA laboratuvarında yaptırılarak sonuçlar Tablo 3.5’de verilmiştir.

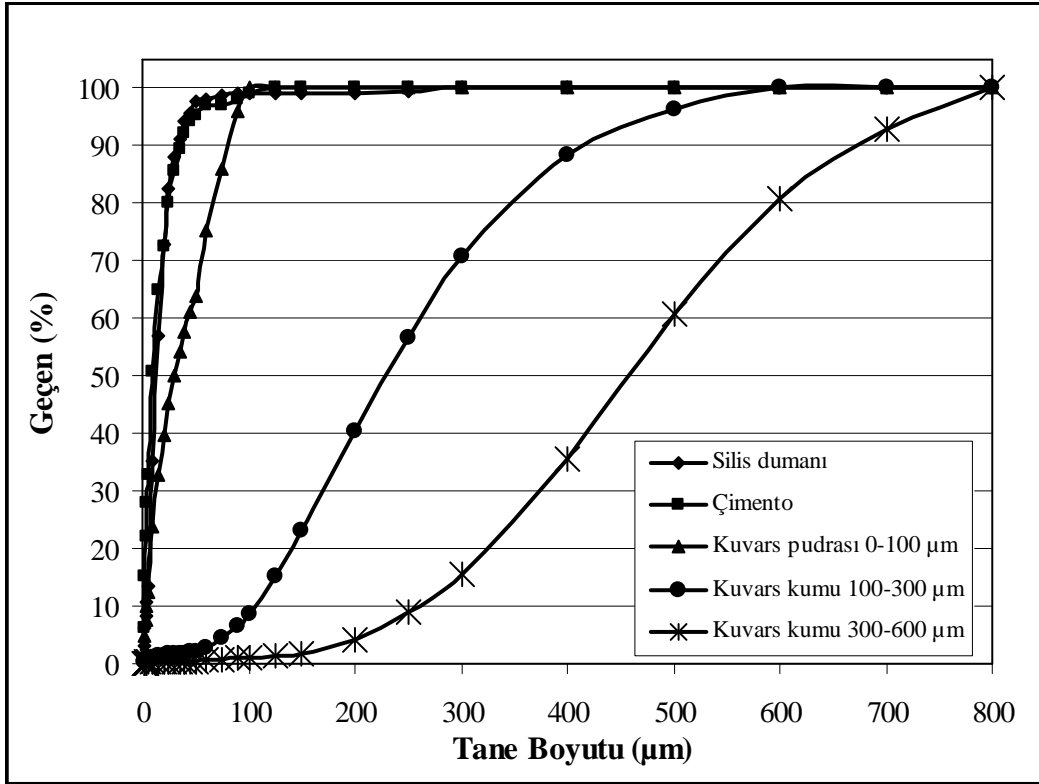
Tablo 3.5. Kuvars kumlarının fiziksel özellikleri

Özellik	150–300 µm Kuvars Kumu	300–600 µm Kuvars Kumu
Birim hacim	1,603 gr/cm ³	1,595 gr/cm ³
Özgül ağırlığı	2,676	2,680
Özgül yüzeyi	219 cm ² /gr	81 cm ² /gr
Nem İçeriği	% 0,067	% 0,036

Deneylerde kullanılan kuvars kumu, 100–300 µm ve 300-600 µm aralıktaki iki farklı sınıfta bulunmaktadır. Kuvars kumu olarak 100-300 µm ve 300-600 µm tane aralığında kumlardan numuneler alınmış ve bu numunelerin granülometrisinin belirlenmesi için TÇMA laboratuvarına gönderilmiştir. Bu numuneler üzerinde kuru olarak lazer tane dağılım analizi ile yapılmıştır. Bu analizlere ait sonuçlar Tablo 3.6’da verilmiştir. Reaktif pudra betonunda kullanılan taneli malzemelerin toplu olarak granülometri eğrisi Şekil 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.6. Kuvars kumu tane dağılımı

Tane Boyutu (μm)	Kuvars Kumu 100-300 μm Elekten Geçen %	Kuvars Kumu 300-600 μm Elekten Geçen %
1	0,2	0,06
2	0,39	0,12
3	0,52	0,15
4	0,65	0,18
5	0,78	0,2
10	1,14	0,29
15	1,32	0,32
20	1,45	0,33
25	1,57	0,33
30	1,66	0,34
35	1,76	0,36
40	1,86	0,39
45	2,01	0,43
50	2,2	0,49
60	2,8	0,62
75	4,33	0,83
90	6,71	0,98
100	8,75	1,12
125	15,32	1,26
150	23,24	1,77
200	40,44	4,24
250	56,58	8,84
300	70,71	15,71
400	88,34	35,71
500	96,52	60,85
600	100	80,87
700	100	92,79
800	100	100



Şekil 3.4. Taneli malzemelerin granülometri eğrisi

3.1.5. Çelik tel

RPB'nin basınç ve eğilme dayanımı ile kırılma tokluğunu arttırmak için karışıma katılacak olan lifler, Beksa Çelik ve Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir [62]. Lifler çelik olup üzeri korozyona karşı pirinç ile kaplanmış ve 6 mm uzunluğunda 0,16 mm çapındadır. Üretici firma tarafından çelik liflere ait fiziksel ve mekaniksel özellikler Tablo 3.7'de verilmiştir. Kullanılan lifin kritik boyu aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir [63].

Tablo 3.7. Kullanılan lifin teknik özellikleri [62].

Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık
Mezo	6	0,16	37,5	2250	7,181

$$L_{cr} = \frac{\sigma_f D}{2\tau} \quad (3.1)$$

Burada;

L_{cr} = Kritik lif boyu

σ_f = Lifin çekme gerilmesi

D = Lif çapı

τ = Lif ile beton arasında oluşan kayma gerilmesi

olarak ifade edilmektedir. Chan ve Chu [45] yaptıkları çalışmada pull-out testi sonucunda %30 lif içeren RPB'nin çelik tel ile arasında oluşan kayma gerilmesini 5,48 MPa olarak bulmuşlardır. Bu çalışmadaki değer kullanılarak yapılan hesaplama sonucu çelik lifin sıyrılmadan kopması için kritik lif boyunun 32,8 mm olması gerekmektedir. Lif boyunun kısa olması durumunda ise lifler, beton içerisinden sıyrılarak çıkacaktır. Sıkıştırma basıncı uygulanan numunelerde lif ile beton arasında oluşan kayma gerilmesi değerinin artmasından dolayı kritik lif boyu azalacaktır. Lif boyunun uzun olması RPB'nin karıştırma ve yerleştirme problemlerini beraberinde getireceği için mikro boyutta lif kullanılmasına karar verilmiştir.

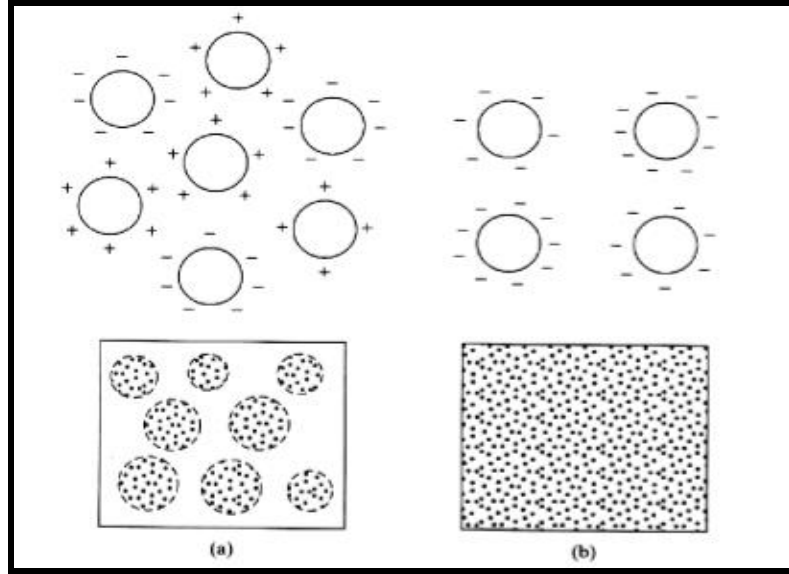
3.1.6. Kimyasal katkı

Deneylerde düşük su çimento oranından dolayı istenilen işlenebilirliği elde etmek için yeni nesil katkılara ihtiyaç duyulmuştur. Yeni nesil katkıların karışım üzerindeki etkisi, süper akışkanlaştırıcı içeren çimentolu sistemde, çimento tanelerinin dağılma özeliği genel olarak “elektrostatik” ve “stearik” etki mekanizmasıyla açıklanabilir.

3.1.6.1. Elektrostatik etki

Süper akışkanlaştırıcı, çimento tanelerinin topaklanmasını önleyerek çimento hamurunun akışkanlığını arttırmaktadır. Çimento tanelerinin topaklanmasına neden olan çekim kuvvetleri, negatif yüklü polimerlerin çimento tanesi üzerinde tutunması sonucu, nötr veya negatif yüklü hale gelmekte ve böylece dağıtma etkisi gerçekleşmektedir [61, 64, 65].

Katkının etkisiyle katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan kuvvetler, karışımın kararlılığını etkiler. Askıdaki çimento tanesi benzer elektriksel yük taşır ve bunların arasında bir itme kuvveti oluşur. Bu elektriksel yükler yeterince fazla ise taneler birbirinden ayrı kalır ve topaklaşma oluşmaz. Şekil 3.5’de su azaltıcı katkının çimento tanelerinin dağıtılmasına olan etkisi gösterilmiştir.

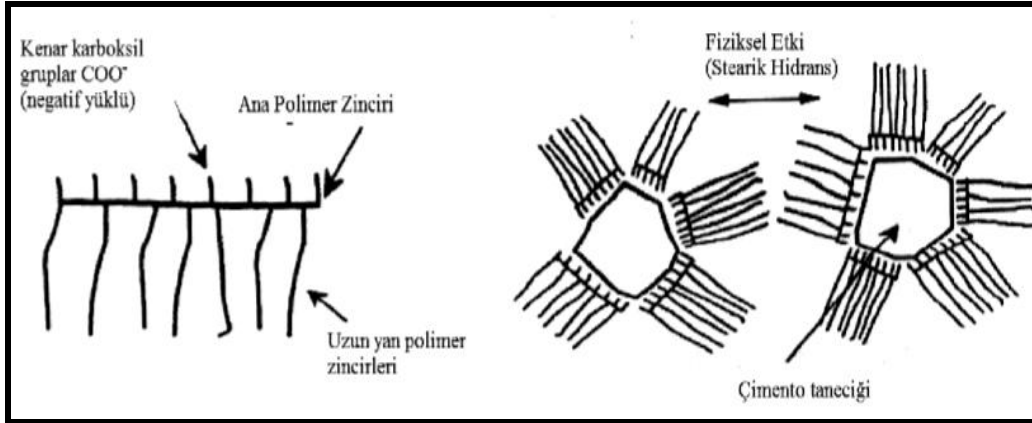


Şekil 3.5. Su azaltıcı katkıların dağıtma etkisi a) topaklaşmış hamur; b) katkılı hamur [64].

3.1.6.2. Stearik etki

Polikarboksilat esaslı katkıların dağıtma etkisi elektrostatik itkiden çok, stearik (fiziksel-geometrisel) engelleme etkisi ile açıklanmaktadır. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi, polimer molekülündeki yan zincirler çimento taneleri arasında fiziksel bir etki oluşturmakta ve topaklanmayı önlemektedir.

Deneylerde bu özelliklere sahip İksa firması tarafından üretilen yeni jenerasyon bir polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı olan Polycar 100 kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Katkıların stearik etkisi [64].

Süperakışkanlaştırıcı düşük su/çimento oranında yüksek islenebilirlikli beton elde edilmesinde, taze betonun zaman içerisinde islenebilirliğinin korunmasında ve betonun erken yüksek dayanım kazanmasında oldukça etkilidir. Özellikle reaktif pudra betonlarında ihtiyaç duyulan reolojiyi koruması ve dayanım gerektiren uygulamalarda kullanımı tavsiye edilmektedir. Malzemeye ait özellikler Tablo 3.8’de özetlenmiştir.

Tablo 3.8. Kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri

Özellik	Değerler
Görünüm	Sıvı
Renk	Amber
Yoğunluk	1,1 gr/cm ³
pH	7,0±0,5
Klorür içeriği	≤ % 0,1
Katı madde	%35±1,5

3.1.7. Su

Deneylerde, içilebilir nitelikte olan Adapazarı Büyük Şehir Belediyesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Suyun kimyasal analiz sonuçları Adapazarı Su ve Kanalizasyon İdaresinden (ADASU) temin edilerek Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9. Deneyleerde kullanılan suyun kimyasal özellikleri

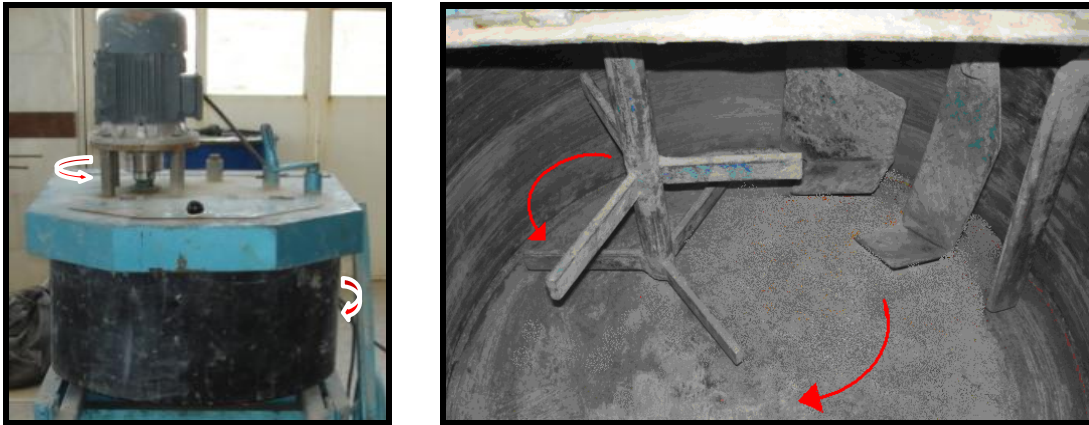
Kimyasal Özellikler	Değerler
Sertlik (Fs °)	12,83
Nitrit (mg/l)	0,010
Nitrat (mg/l)	0,45
Bakır (mg/l)	0,002
Siyanür (mg/l)	0,001
Kurşun (mg/l)	0,003
Kadmiyum (mg/l)	0,001
Krom (mg/l)	0,001
Nikel (mg/l)	0,001
Amonyum (mg/l)	0,010
Demir (mg/l)	0,017
Mangan (mg/l)	0,007
Alüminyum (mg/l)	0,127
Sülfat (mg/l)	20,0
Klorür (mg/l)	8,16

3.2. Ön Deneyler

3.2.1. Deney Numunelerinin Üretilmesi

Deneyler, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ve Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarları ile Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır.

Deney numunelerinin hazırlanması normal betonlara göre farklılık göstermektedir. Özellikle reaktif pudra betonlarında karıştırma işlemi normal betonlara göre oldukça farklıdır. RPB'nin performans özellikleri mikserde karıştırılma işlemine karşı son derece duyarlı olup bu işlemin hassasiyetle gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Karıştırma işlemi için kullanılan mikserin karıştırma hızı ve karışıma giren malzemelerin miksere konulma sırası belli bir düzen içerisinde olmalıdır. Aksi takdirde aynı malzemeler ile çok yüksek dayanımlı bir beton elde edilebileceği gibi çok düşük dayanımlı bir beton da elde edilebilir. Bu nedenle numunelerin üretilebilmesi için özel bir mikser tasarlanmıştır. Bu mikserin, hem numunelerin konulduğu hazne hem de mikserin çırpıcısı her iki yönde dönebilmekte ve karıştırma hızı da elektronik kumanda sayesinde ayarlanabilmektedir (Şekil 3.7).



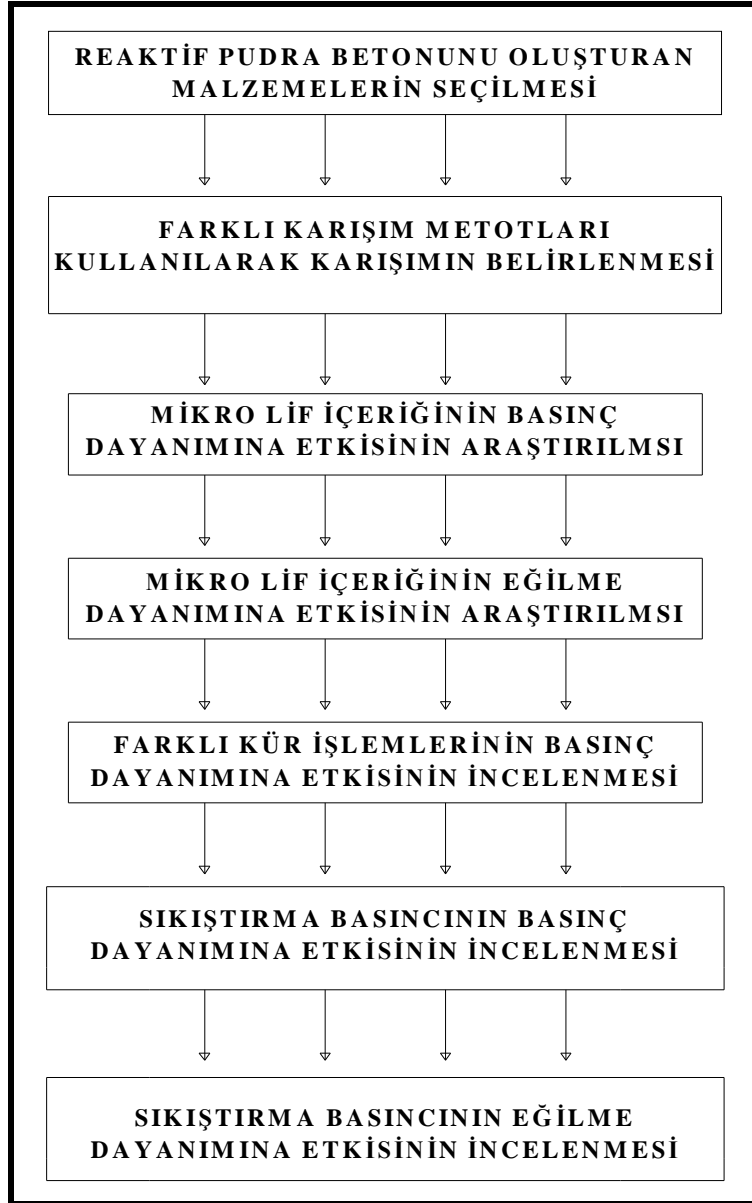
Şekil 3.7 RPB için tasarlanmış mikser

Karıştırma işleminde ilk olarak miksere lifler hariç bütün taneli malzemeler konularak 5 dakika, 400 devir/dakikalık düşük bir devirde karıştırılmış ve daha sonra

katkı ile karışım suyu karıştırılarak bu karışım püskürtmeli olarak ilave edilmiştir. Katkı ve suyun birlikte katılması ile mikserin hızı 1400 devir/dakikaya çıkarılarak yaklaşık 5 dakika bu hızda karıştırılmış ve daha sonra lifler ilave edilerek 5 dakika da lifli olarak karıştırılmıştır. Numuneler kalıplara doldurulmadan önce kalıp ayırıcı yağ ile kalıplar yağlanmıştır. Sıkıştırma basıncı uygulanmayan numunelerin kalıplara yerleştirilmesinde en iyi yerleştirme metodunu belirlemek amacıyla vibrasyon, şişleme ve revibrasyon denenmiş ve bunlardan şişleyerek yerleştirmenin en iyi yöntem olduğuna karar verilmiştir. Vibrasyonun kimyasal katkının bir takım özelliklerinden dolayı beton içerisindeki hava boşluğu miktarını arttırdığı görülmüştür. Normal betonlarda dayanımı arttırıcı özelliğinden yola çıkarak, numunelere farklı zamanlarda revibrasyon uygulanmış fakat dayanımı düşürdüğü için çalışmada bu uygulamadan vazgeçilmiştir. Numuneler bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak, daha önceden belirlenen farklı kür işlemlerine tabi tutulmuştur.

3.2.2. Deneylerde kullanılan yöntem

Bu çalışmada Şekil 3.8'deki akış şeması oluşturulmuş ve deneysel çalışmalar bu sıraya göre yapılmıştır.



Şekil 3.8. Deney akış şeması

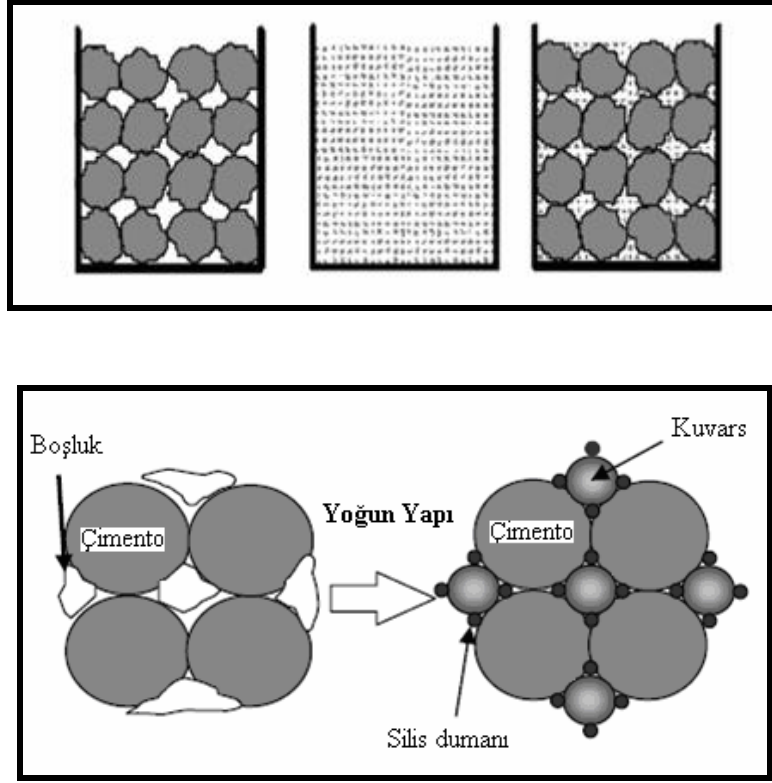
Bu şemaya göre RPB'yi oluşturan malzemeler temin edilmiş ve özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra karışım oranları farklı yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Bu karışıma RPB'de kullanılan mikro boyuttaki lif farklı oranlarda

karışıma giren tüm malzemeler ile ikame edilerek lif içeriğinin basınç ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu deney sonucu uygun lif içeriği belirlenmiştir. Belirlenen lif içeriği ile deney numuneleri üretilerek kür tipinin basınç dayanımına etkisi araştırılmış ve uygun kür tipi belirlenmiştir. Belirlenen uygun kür tipi ve lif içeriği kullanılıp hazırlanan karışımlara taze haldeyken farklı sıkıştırma basıncı uygulanarak basınç ve eğilme deney numuneleri üretilmiştir. Sıkıştırma basıncının, RPB'nin birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu gibi parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Deneysel çalışmaların ve sonuçlarının değerlendirilmesi ile ilgili detaylar Bölüm 4'te verilmiştir.

3.2.2.1. Karışımın belirlenmesi

Reaktif pudra betonlarının karışım dizaynı için henüz yerli ve yabancı herhangi bir standart mevcut değildir. Karışımı oluşturan taneli malzemelerin sıkı bir yapı oluşturacak şekilde oranlanması için farklı karışım teorileri kullanılmaktadır. Bu çalışmada da farklı karışım teorilerinden yararlanılmıştır. Bu teorilerden birisi reaktif pudra betonları için en çok kullanılan teori olan Mooney'in katı süspansiyon viskozite modelidir [58]. Bu teoride lineer olarak taneler birbirinin arasını doldurmakta, ama malzemelerin reaktifliği göz önüne alınmamaktadır. Bu teorinin kullanılabilmesi için karışıma giren bütün malzemelerin kompositesinin, en büyük, en küçük ve ortalama tane boyutu ile granülometrisinin bilinmesi gerekmektedir. Buradaki amaç lineer olarak her bir tane grubunun diğer bir tane grubunun arasını doldurmasına dayanmaktadır (Şekil 3.9.). Ancak, agrega granülometri eğrileri lineer olmadığı için oluşacak karışımın teorik kompositesi ile gerçek kompositesi farklı olmaktadır. Teorilerin temel mantığı Şekil 3.9'daki gibi daima büyük tanelerin arasını daha küçük taneli malzeme ile doldurarak doluluk oranını arttırmaktır.



Şekil 3.9. Taneli malzemelerin karışım teorisi [67]

Büyük ve küçük tanelerden oluşan kapların doluluk oranı eşitse, bu tanelerin karışımlarından oluşan şekildeki üçüncü kabın doluluk oranı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$K = 1 - (1 - k_0)^n \quad (3.2)$$

Burada;

K = Toplam doluluk oranı

k_0 = Tane gruplarının doluluk oranı

n = Tane grubu sayısı

olarak ifade edilmektedir. Şayet iki tane gruplarının kompozitesi eşit değilse bağıntı aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$K_{1,2} = k_1 + k_2(1 - k_1) \quad (3.3)$$

Burada;

$K_{1,2}$ = İki malzemenin birleşiminin doluluk oranı

k_1 = 1. Tane grubunun doluluk oranı

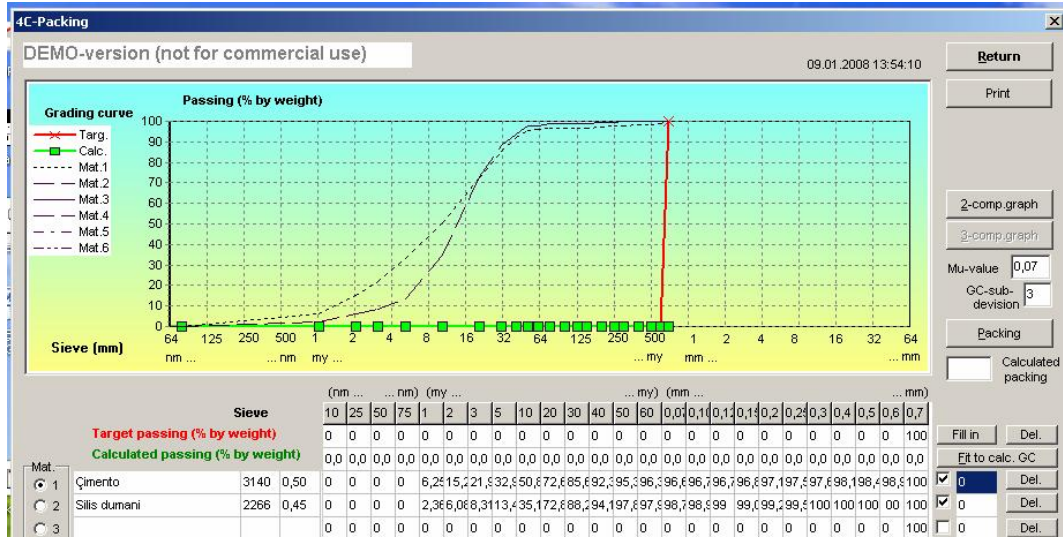
k_2 = 2. Tane grubunun doluluk oranı

olarak ifade edilmektedir. Bu ana teori kullanılarak karışım dizayn programları geliştirilmiştir. Çalışmada da karışımın dizayn edilmesinde hazır bilgisayar paket programından yararlanılmıştır. Bu programın temel olarak çalışma prensibi şu şekildedir. Her bir agreganın bulunduğu hacim içerisinde homojen yayılı olduğu kabul edilmektedir. Bu kabul eşit büyüklükteki küresel parçalardan oluşan agregalar için geçerli olur. Ancak hiçbir tane küresel olmadığından teorik açıdan elde edilebilecek doluluk oranına erişilemez. Dolayısıyla aynı boyutlardaki fakat farklı biçim özelliklerine sahip agregalar için doluluk oranları en iyi deneysel yollarla elde edilebilir. Geliştirilen modelde her iki unsur da göz önünde bulundurulmuştur.

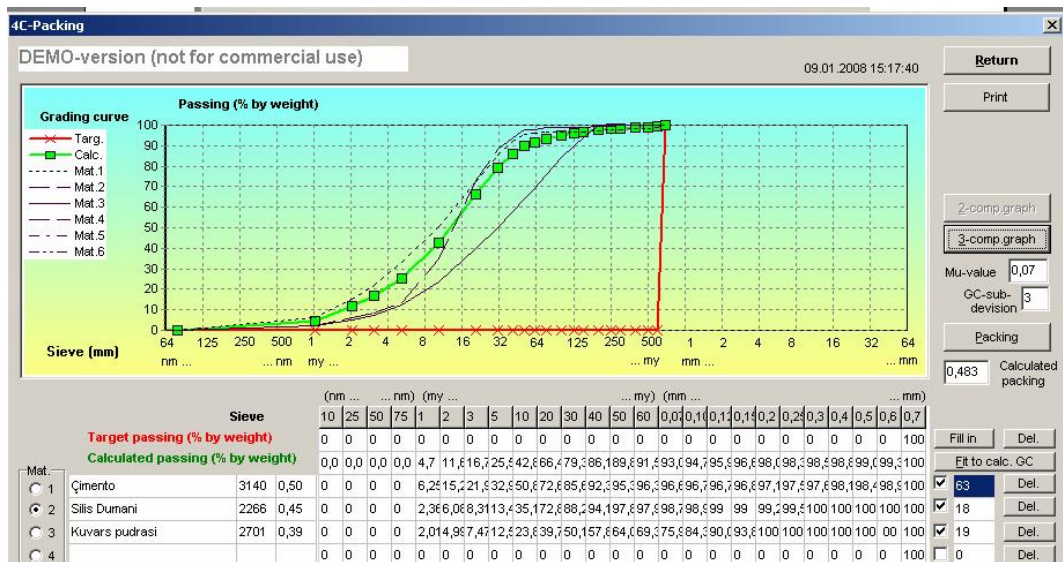
Bu modelde agregalar karşılıklı etkileşim içerisindedir. Etkileşimlerden birincisi “duvar” etkisi olarak tanımlanır. Buna göre, büyük bir parça yanındaki veya bulunduğu kabın çeperinde bulunan küçük parçadan dolayı daha sıkı bir şekilde yerleşmeyecektir. İkincisi ise, büyük parçalar arasındaki boşlukları dolduran küçük parçalar, olmaları gerekenden daha büyük iseler, mevcut büyük parçaların düzenlerini bozmadan araya yerleşemezler [68,69].

Bu modele dayanarak Danimarka Teknoloji Enstitüsü’nce geliştirilen “4C-Packing” ticari ismine sahip bilgisayar programı yardımıyla ikili ve üçlü bileşime sahip agrega karışımlarının doluluk oranları hesaplanabilmektedir [57]. Bu çalışmada karışımların doluluk oranları program yardımıyla hesaplanmıştır.

Programa ilk olarak iki veya daha fazla malzemelerin, adı, özgül ağırlığı, kompozitesi ve yüzde geçen şekilde ayarlanmış elek analiz sonuçları girilmiştir (Şekil 3.10-11).



Şekil 3.10. Bilgisayar programının ara yüzü ve ikili karışım için girilen değerler



Şekil 3.11. Bilgisayar programının ara yüzü ve üçlü karışım için girilen değerler

Programa malzeme özelliklerinin girilmesinin ardından, program tarafından gösterilen doluluk haritası üzerinden maksimum doluluk oranı seçilir ve maksimum doluluk oranı için her bir malzemeden ne kadar kullanılması gerektiği program tarafından verilmektedir (Şekil 3.12, 13).



Şekil 3.16. Bilgisayar programı tarafından oluşturulan karışım ile başka bir karışımın karıştırılması

Yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem de fuller parabolüdür. Bu parabolün temel formülü bağıntı 3.4'te verilmiştir. Karışımı oluşturan taneli yapının oranlarının belirlenmesinde bu bağıntıdan yararlanılmıştır.

$$M = 100(d / D_{max})^a \quad (3.4)$$

Burada;

M = % Kümülatif geçen

d = Bulunmak istenilen elek ya da tane çapı

D_{max} = Agrega yığının en büyük tane çapı

a = Fuller eğrisi derecesi

olarak ifade edilmektedir. Fuller eğrisi derecesi (a) agrega türüne ve betondan istenilen işlenebilirliğe göre 0,3 ile 0,5 arasında değer almaktadır. İnce malzeme miktarının fazla olmasının istenmesi durumunda 0,3 değeri daha iyi sonuç vermektedir [70-73]. Bu çalışmada da farklı fuller eğrisi derecesi değerleri kullanılarak karışım oranları belirlenmiştir.

3.2.2.2. Lif oranının belirlenmesi

Lif oranının belirlenmesi için, lifsiz olarak üretilen karışımlardan en iyi basınç dayanımını veren karışıma, %2-4-6-8-10 olmak üzere 5 farklı oranda, 6 mm uzunluğunda 0,16 mm çapındaki çelik lif RPB'yi oluşturan tüm malzemeler ile ikameli olarak kullanılmıştır.

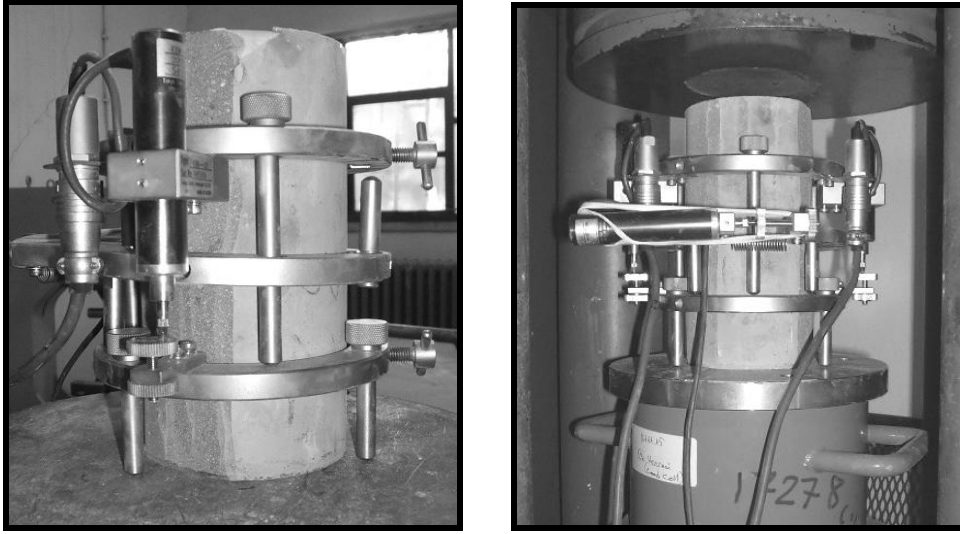
Betonu oluşturan tüm malzemeler, kullanılacak lif hacmi oranına göre azaltılarak lif ikamesi yapılmıştır. Reaktif pudra betonlarında agrega olarak tanımlanan malzemeler neredeyse tüm katı malzemeler olduğu için böyle bir yöntem seçilmiştir. Lifin sadece kuvars kumu ile yer değiştirmesi, özellikle yüksek oranlardaki lifli karışımlarda karışım oranlarını önemli ölçüde değiştireceği de göz önüne alınarak, bu yöntem tercih edilmiştir. Bu yöntemin diğer bir avantajı da bütün lif oranlarında, su/çimento, su/bağlayıcı ve su/kimyasal katkı oranlarının sabit kalmasıdır. Sonuç olarak, karışıma giren tüm malzemelerin kendi içindeki oranları, tüm lif yüzdelerinde sabit tutulmuştur. Lif hacminin belirlenmesi için kullanılan deney numuneleri, basınç ve eğilme için ayrı ayrı hazırlanmıştır.

3.2.2.3. Lif oranının basınç numunelerinde belirlenmesi

Basınç deneyi ile ilgili olarak, elastisite modülü ve poisson oranı deneyleri göz önüne alınarak, 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler üretilmiştir. Ayrıca küp basınç dayanım testi için 100 mm'lik küp numuneler üretilmiştir.

Basınç dayanım testleri, yükleme hızı ayarlanabilen 3000 KN kapasiteli beton presinde TSE standartlarına uygun olarak yapılmıştır [74, 75].

Elastisite modülü ve poisson oranı testleri, beton presine yerleştirilen yük hücresi ile uygulanan düşey ve yatay deformasyonu ayna anda ölçerek bilgisayar ortamına aktaran bir sistem tarafından yapılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Düşey ve yanal deformasyonların ölçümü

Deney sonuçları ilgili standarda göre değerlendirilerek numunelere ait mekanik özellikler elde edilmiştir [76, 77]. Buna göre elde edilen veriler kullanılarak numunelerin basınç dayanımlarının hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.5)$$

Burada,

σ = Net basınç dayanımı (MPa)

P = Kırılma yükü (N)

A = Numune kesit alanı (mm²)

olarak ifade edilmektedir. Numunelere ait elastisite modülü hesaplanmasında bağıntı 3.6 kullanılmıştır. Bu bağıntı ile numunelerin statik elastisite modülleri hesaplanmıştır.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

Burada,

E = Elastisite modülü (MPa)

σ = Net basınç dayanımı (MPa)

ε_y = Birim deformasyon

olarak ifade edilmektedir. Numunelere ait poisson oranı hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\nu = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (3.7)$$

Burada,

ν = Poisson oranı

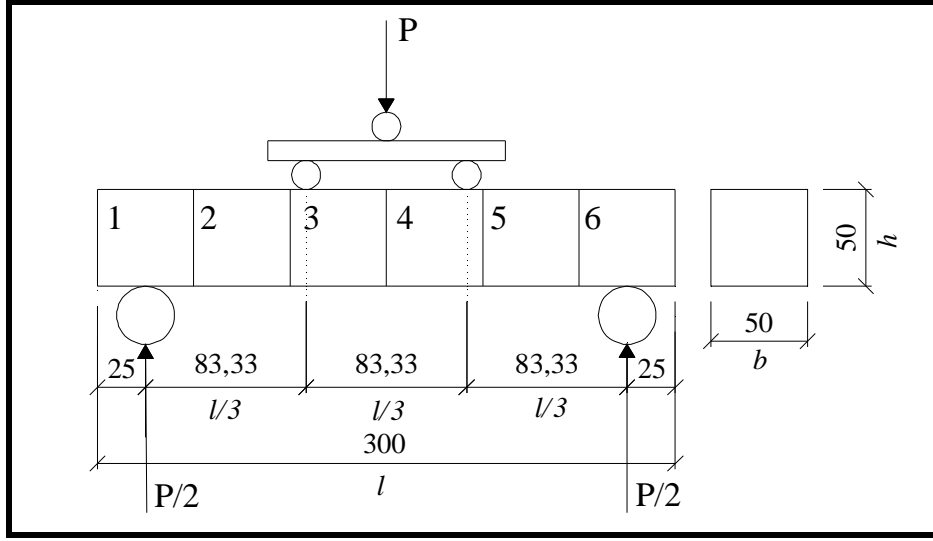
ε_x = Yanal birim deformasyon

ε_y = Düşey birim deformasyon

olarak ifade edilmektedir. Oluşturulan bu sistem sayesinde numunelere ait basınç dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı değerleri bulunarak deneysel sonuçlar bölümünde verilmiştir.

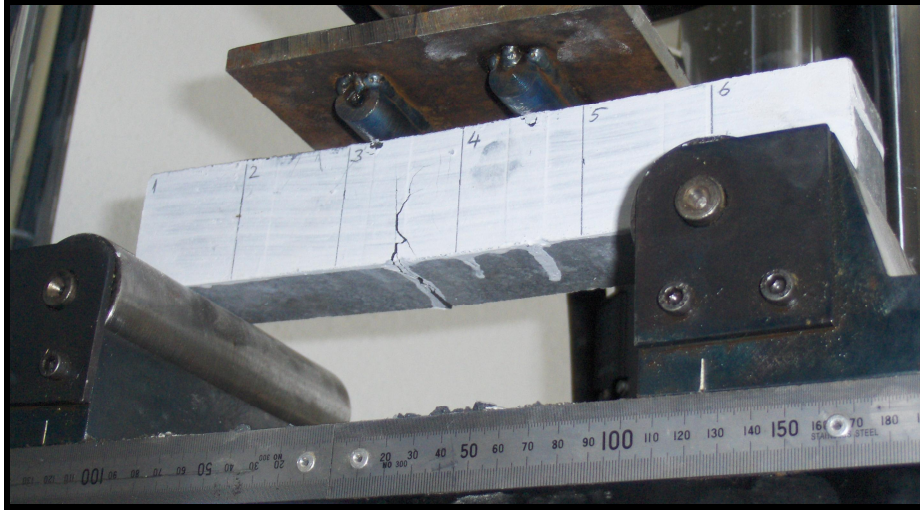
3.2.2.4. Lif oranının eğilme numunelerinde belirlenmesi

Eğilme deneyi ile ilgili olarak, her bir numuneden 3 adet olmak üzere 30×30×300 mm numune üretilmiştir. Numuneler deneyden önce çatlakların olduğu yeri ve ilerlemesini daha iyi görebilmek için beyaz renge boyanıp 50 mm uzunluğunda bölgelere ayrılarak numaralandırılmıştır (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Eğilme deneyi numune ve yükleme şekli

Eğilme deneyleri bilgisayar donanımlı ve yük sehimi grafiğini otomatik olarak çizebilen eğilme test cihazında yapılmıştır. Kiriş numuneleri her iki ucundan mesnetleri 25 mm geçecek şekilde kendi etrafında dönebilen rulo şeklindeki mesnetler üzerine konulmuştur (Şekil 3.19). İki mesnet arasındaki açıklık olan 250 mm, üç eşit parçaya bölünerek kiriş numunesi Şekil 3.19'daki gibi iki noktadan yüklenmiştir. Deney cihazının yükleme hızı TS 10515'te belirtildiği gibi kiriş orta noktasında, 0,05-0,10 mm/dak. sehimi yapacak şekilde ayarlanmıştır [78-83]. Numuneler bu hızda tamamen kırılıncaya kadar yüklenerek yük sehimi grafikleri elde edilmiştir. Eğilme numunelerine ait mekanik özellikler ilgili standarda göre ayrı başlıklar altında verilmiştir.



Şekil 3.19. Eğilme deney düzeneği

Net eğilme dayanımlarının hesaplanması; Numunelerin ilk çatlak ve eğilme dayanımlarının hesaplanmasında bağıntı 3.8 kullanılmıştır.

$$\sigma_e = \frac{P_e l}{bh^2} \quad (3.8)$$

Burada,

σ_e = Net eğilme dayanımı (MPa)

P_e = Kırılma yükü (N)

l = Mesnetler arası uzaklık (mm)

b = Numune kesitinin genişliği (mm)

h = Numune kesitinin yüksekliği (mm)

olarak ifade edilmektedir. Numunelere ait dayanımlar hesaplanarak deneysel sonuçlar bölümünde verilmiştir.

Elastik şekil değiştirme indeksleri; ASTM C 1018'de tokluk değerlendirme, betonun yük sehim eğrisi altında kalan alan cinsinden ifade edilmektedir [81]. Lifli betonun taşıma gücünü yitirmesi için gereken enerji, yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın büyümesi ile artmaktadır. Bu alan kullanılarak malzemenin eğilme özellikleri hakkında değerlendirme yapılabilmektedir. ASTM C 1018 standardına

aşamalarda hasarın derecesi kalıcı dayanım faktörleri ile de gösterebilir. ASTM C 1018'e göre kalıcı dayanım faktörleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

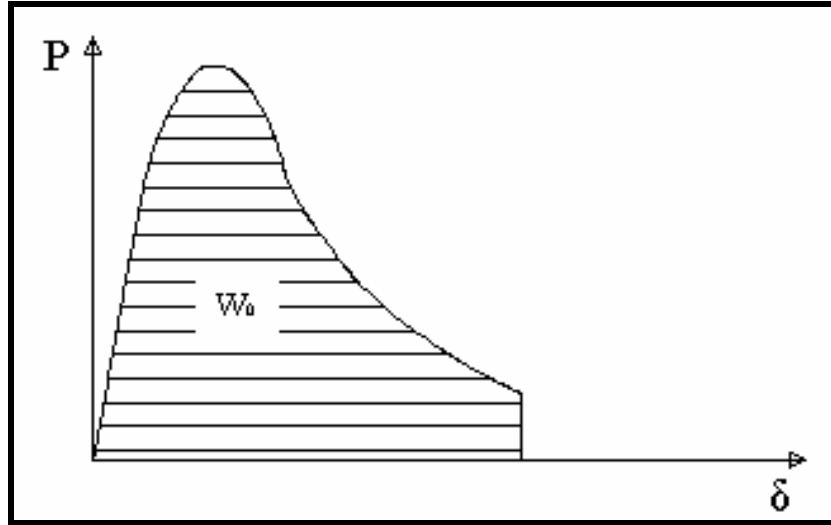
$$R_{5,10} = 20 (I_{10}-I_5) \quad (3.12)$$

$$R_{10,20} = 10 (I_{20}-I_{10}) \quad (3.13)$$

R değerleri, liflerin beton yapısı üzerindeki fonksiyonları ve tel donatılı betonların birbirleri ile mukayeseleri konusunda somut sayılardır. Bu somut sayılar, yük-sehim grafiğinin ne şekilde olduğunu ifade etmektedir. Örneğin $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}$ 'nin değeri küçük olan numunenin yük-sehim eğrisi ile ilgili olarak, numunenin çatlak dayanımından sonra eğrinin kolunun yatay eksene yaklaştığı anlaşılmaktadır. İndeksler ve kalıcı dayanım faktörlerinin ifade ettiği anlam birbirine benzerdir.

Kırılma tokluğu ve enerjilerinin hesaplanması; Bir numunenin yük-sehim eğrisi oluşturulduğunda, bu eğrinin altında kalan alan kırılma tokluğunu vermektedir. Ayrıca bu alan kullanılarak, kırılma süresince harcanan enerji bulunabilmektedir. Birim alan başına çatlak oluşturmak için gereken enerji miktarı malzemenin kırılmaya karşı direncini belirler. Sünek malzemelerde şekil değiştirme kapasitesi yüksek olduğu için, kırılma anında büyük sehimlere ulaşmakta ve harcanan enerji artmaktadır. Burada, numunelerin yük sehim eğrileri elde edilerek kırılma enerjileri hesaplanabilmektedir. Gevrek malzemelerde şekil değiştirme miktarı küçük olduğundan bu tür malzemelerin enerji yutma kapasitesi, yüksek sehim yapabilen sünek malzemelere karşın düşüktür. Bu çalışmada kullanılan çelik lifler betona yüksek süneklik özelliği kazandırır ve Üretilen numunelerde çelik lifler kullanıldığı için kırılma yavaş gerçekleşmekte ve sehim miktarı artmaktadır. Böylece, numunelerin kırılma enerjileri normal betona göre daha yüksek olacaktır [85].

Şekil 3.21'de örnek bir yük-sehim eğrisi ve denklem 3.14'te kırılma enerjisinin (G_f) hesaplanma yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Yük sehim grafiği ve kırılma tokluğu [85].

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A} \quad (3.14)$$

Burada;

G_f = Kırılma enerjisi (N/m)

W_0 = Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan-tokluk (Nm)

m = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

g = Yer çekimi ivmesi (9,81 m/sn²)

δ_0 = Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)

A = Etkin kesit alanı (m²)

olarak ifade edilmektedir. Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu olarak tanımlanan değer her kiriş için farklı olacağı ve bu son deformasyonun ani olarak kirişin parçalanması durumunda ölçülmesinin zor olduğu bilinmektedir. Yerli ve yabancı standartlarında iki mesnet arasındaki açıklığın 150 sabit sayısına bölünmesi ile elde edilmektedir ve standarda göre üretilen numunelerde 3 mm'ye tekabül etmektedir [80-85]. Numunelerin normal standartlara göre daha küçük boyutta olmasına rağmen sünekliliği normal betonlara göre fazla olmaktadır. Bu nedenle son deformasyon değeri olarak 10 mm kabul edilmiş ve yük sehim eğrisinin bu sehime kadar olan kısmı dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Yük sehim eğrisinin altında kalan düzensiz şekilli alanların belirlenmesi Simpson matematik kuralının uygulanmasını veya bilinen alanlardaki karelerin sayılmasını gerektirmektedir. Bu alanların bulunmasında Matlab 6.5 hazır paket programından yararlanılmıştır [86].

Japon standardı olan JSCE SF-4'e göre, tokluk değerlendirmesi kiriş açıklığının 1/150 değerindeki sehime kadar olan kısım dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Daha sonra bağıntı 3.15 ile tokluğa bağlı eşdeğer eğilme dayanımı hesaplanmaktadır [82].

$$\sigma_e = \frac{W_0 l}{\delta b h^2} \quad (3.15)$$

Burada;

$\sigma_{eş}$ = Tokluğa bağlı eşdeğer eğilme dayanımı (MPa),

W_0 = Yük - Sehim eğrisinin altında kalan alan (Nmm),

l = Kiriş açıklığı (mm),

b = Kiriş genişliği (mm),

h = Kiriş yüksekliği (mm),

δ = Kiriş açıklığının 1/150 değerindeki sehim

olarak ifade edilmektedir. Eğilme deney sonuçları bu standarda göre değerlendirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

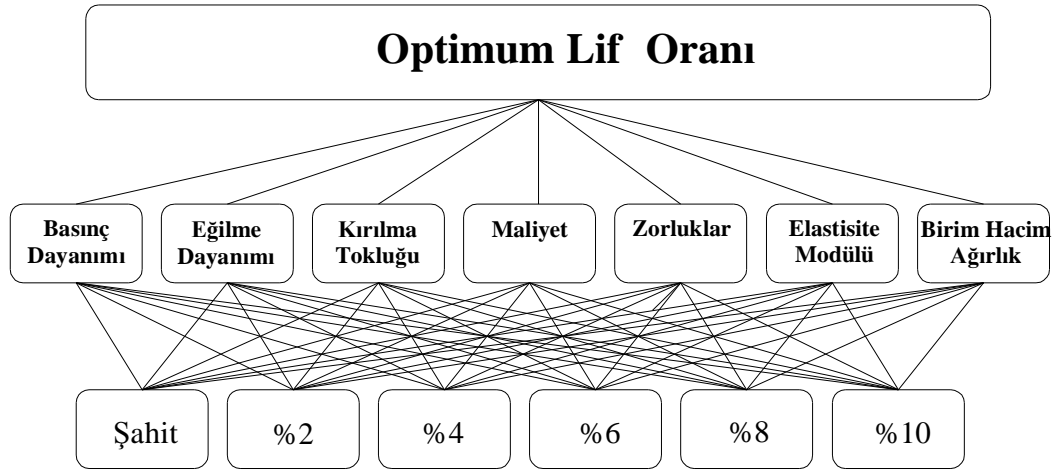
3.2.2.5. Lif oranının optimizasyonu

Lif katkılı numunelerin mekanik özellikleri ve maliyet analizleri göz önüne alınarak değerlendirme yapılmış ve uygun lif oranı belirlenerek daha sonraki deneyler için karışımlarda bu lif oranı kullanılmıştır.

Optimum lif oranına karar vermede “analitik hiyerarşi proses” diğer bir adı ile “analitik hiyerarşi yaklaşımı” (AHP) yöntemi kullanılmıştır. AHP, bireylere, karar verme sürecindeki nitel ve nicel faktörleri birleştirme olanağı veren güçlü ve kolay anlaşılır bir yöntem bilimidir [87, 88].

AHP'nin püf noktası, karar alternatiflerinin derecelendiği ağırlıkların belirlenmesidir. Verilmiş olan bir hiyerarşide n adet kriterle ilgilendiğimiz varsayılırsa; prosedür, karar vericinin farklı kriterlerin önemini yorumlamasını yansıtan ve A ile tanımlanan $n \times n$ ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. İkili karşılaştırma, i satırındaki ($i= 1, 2, 3, \dots, n$) kriterlerin n sütunla temsil edilen her bir kriterle ilgili olarak derecelendirilmesiyle yapılır. a_{ij} , A 'nın (i, j) elamanını tanımladığında, AHP, 1 ile 9 arasında bir ölçek önerir, burada $a_{ij}= 1$, i ve j 'nin eşit önemde olduğunu, $a_{ij}= 5$, i 'nin ve j 'den çok önemli olduğunu, $a_{ij}= 9$, i 'nin ve j 'den kesinlikle çok önemli olduğunu yansıtır. 1 ile 9 arasındaki diğer değerler ara değerler olarak yorumlanır. Tutarlılık için $a_{ij}= k$, $a_{ji}= 1/k$ 'yı ifade etmelidir. Ayrıca A 'nın tüm diyagonal a_{ij} elemanları, kendilerine bağlı kriteri derecelendirdikleri için “1” olmalıdır [89].

Yukarıda anlatılan yöntemle göre matematiksel bir model kurulmuştur. Bu modelde şahit numunede dahil olmak üzere 6 farklı lif oranı değişken olarak kabul edilmiş ve bu değişkenlerden etkilenen, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, maliyet, karıştırmada ve yerleştirmede yaşanan zorluklar, elastisite modülü ve birim hacim ağırlık değeri olmak üzere 7 adet sonuç ele alınmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Optimum lif oranının belirlenmesinde kullanılan hiyerarşi sistemi

7 adet sonuçların birbirlerine göre önem dereceleri yukarıda anlatıldığı gibi 1 ile 9 aralığına göre değerlendirilerek 7×7 'lik bir matris oluşturulmuştur. Oluşturulan bu matrisin sütun değerleri toplanarak, her bir sütun değeri kendi sütun toplamına bölünerek matrisin normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Normalizasyon işlemi yapılmış 7×7 'lik matrisin her bir satır ortalamaları bulunarak 1×7 'lik matris elde edilir ve matrisin bu değerleri o satıra ait olan sonucun karar vermedeki ağırlık değeri olmuştur. Bu ağırlıkların farklı önem derecelerine göre bulunması, sonucun hassasiyetini ve güvenilirliğini arttırmaktadır. Bu nedenle 3 farklı şekilde önem derecesi belirlenmiştir. Bu önem dereceleri; tüm sonuçlara, basınç ve eğilme dayanımı ile kırılma tokluğu sonuçlarına, maliyet ve zorluk sonuçlarına duyarlı olarak oluşturulmuştur.

Lif oranına göre deney sonucunda elde edilen değerler kullanılarak ta 6×7 'lik bir matris oluşturulmuştur. Bu matrisin tamamının 0 ile 1 arasında değerler alması için normalizasyon yapılmıştır. Bu normalizasyon işlemi bağıntı 3.16 kullanılarak yapılmıştır.

$$c = \frac{(z - E_k)}{(E_b - E_k)} \quad (3.16)$$

Burada;

c = Normalizasyon işlemi sonucu bulunan değer (0-1 arasında)

z = Normalizasyon uygulanacak gerçek değer

E_k = Normalizasyon uygulanacak sütundaki en küçük gerçek değer

E_b = Normalizasyon uygulanacak sütundaki en büyük gerçek değer

olarak ifade edilmektedir. Normalizasyon işleminde dikkat edilmesi gereken E_k ve E_b değerlerinin bulunmasıdır. Burada bizim için olmasını istediğimiz değer en büyük olmasını istemediğimiz değer ise en küçük değer olarak algılanmalıdır. Örneğin basınç dayanım sonucunda en büyük değer en yüksek basınç dayanım değeri olurken maliyet analizinde en büyük değer, maliyetin minimum olduğu değer olarak alınmalıdır.

Lif oranlarına bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarının normalizasyon yapılarak oluşturulan 6x7 matris ile her bir sonucun ağırlık matrisi ile çarpılmış ve elde edilen matrisin sütunları toplanarak en büyük verimlilik değerine ait lif oranı optimum lif oranı olarak belirlenmiştir.

3.2.2.6. Kür tipinin belirlenmesi

Literatürde RPB'ye farklı şekillerde ve sürelerde kür uygulanmıştır [90-93]. Bu bilgiler ışığında kür tipinin belirlenmesi için numunelere Tablo 3.10'daki sekiz farklı kür uygulanmıştır. Farklı yaşlarda bulunan basınç dayanım sonuçları değerlendirilerek daha sonraki deneylerde kullanılacak kür tipi belirlenmiştir. Kür tipinin belirlenmesinde kullanılan fırın ve buhar tankı kapasitesi dikkate alınarak deney numuneleri 50 mm'lik küp olarak üretilmiştir. Numune kalıpları, hassas ölçülerde ve numunelerin örselenmeden çıkabileceği şekilde özel olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.23). Numuneler kalıptan bir gün sonra çıkarılarak Tablo 3.10'daki kür tipleri uygulanmıştır. Deney numunelerinde kullanılan kodlar ve kür tipleri Tablo 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.23. Küp numunelerin kalıp resmi

Tablo 3.10. Kür programı ve numune kodları

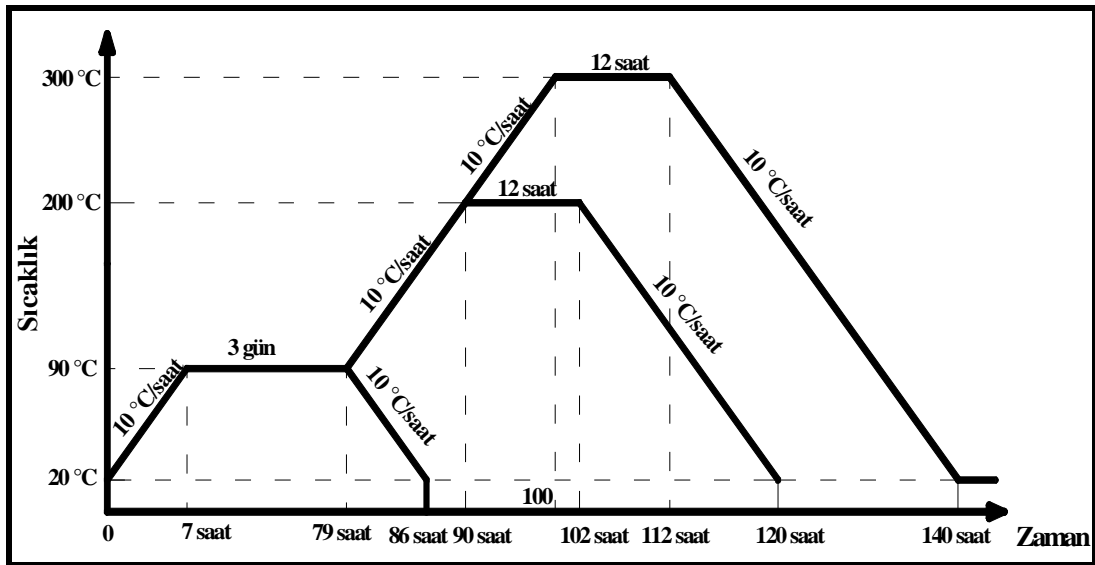
Numune kodu	Kür Tipi
S	28 gün 20 °C suda
3SS	3 gün 90 °C sıcak suda 25 gün suda
3B	3 gün 90 °C buhar küründe 25 gün suda
3BE200	3 gün 90 °C buhar küründe ardından 12 saat 200 °C etüvde
3BE300	3 gün 90 °C buhar küründe ardından 12 saat 300 °C etüvde
3S3B	3 gün 20 °C suda, 3 gün 90 °C sıcak suda 22 gün suda
5S3B	5 gün 20 °C suda, 3 gün 90 °C sıcak suda 20 gün suda
7S3B	7 gün 20 °C suda, 3 gün 90 °C sıcak suda 18 gün suda

Bu kodlandırmada, ilk rakamsal ifade kür süresini, “S” harfi normal su kürünü, “SS” sıcak su kürünü, “B” buhar kürünü, “E” etüv kürünü ve bu harfin arkasından gelen rakam etüv sıcaklığını göstermektedir.

Kür işlemi, ısıtma ve soğutma sıcaklığı adımları ayarlanabilen bir fırında yapılmıştır (Şekil 3.24). Kür işlem sıcaklığındaki artış ve azalış hızı, numunelerde lif bulunmasından dolayı birkaç deneme sonucunda 10°C/saat olarak bulunmuştur. Numunelere uygulanan sıcak kürün uygulaması Şekil 3.25’de verilmiştir.



Şekil 3.24. Kür tankı ve fırın



Şekil 3.25. Kür uygulama grafiği

Kür denemelerinde sıcak etüv kürü, numunelere buhar kürü uygulanmadan direk olarak uygulanmış, fakat sıcaklık artış hızı çok düşük olmasına rağmen olumlu bir sonuç alınamamıştır (Şekil 3.26) Bu numuneler etüv sıcaklığı 100°C'ye ulaşmadan çatlamış veya dağılmıştır.



Şekil 3.26. Termal gerilmeler sonucu zarar görmüş numuneler

Bu nedenle sıcak etüv kürü uygulanan numunelere, önce 3 gün sürecince 90°C buhar kürü uygulanmış ve daha sonra 90°C deki etüvün içerisine konularak istenilen sıcaklığa 10°C/saat hızla çıkarılmıştır. Sıcak kür işlemi uygulanan numunelerin sıcak kür işlemi bittikten sonra 20°C ye kadar soğuması beklendikten sonra deney gününe kadar normal su kürü uygulanmıştır. Numuneler üzerinde 10, 28 ve 56 günlük basınç dayanım testleri yapılmış ve sonuçlar deneysel bulgular ve tartışma bölümünde verilmiştir.

3.3. Deneyleer

3.3.1. Katılaşma sũeresince sıkılaştırma basıncının uygulanması

3.3.1.1. Basınc numunelerine uygulanması

Normal betonlarda birim hacim ağırlığın artması ile basınç dayanımı da artmaktadır. Bu, betondaki fazla suyun ve havanın en aza indirilmesi sayesinde olmaktadır. RPB için de aynı durum geçerlidir.

Betonun, hemen hemen bütün özelliklerini etkileyen faktörlerden birisi olan betonun yerleştirilmesi ve sıkılaştırılmasıdır. Beton en az boşluk olacak şekilde kalıba yerleştirilmesi gereklidir. Boşluk miktarının azalması, sertleşmiş betonun mekanik özelliklerine ve dayanıklılık özelliklerine olumlu etki yaptığı bilinmektedir [94].

Betonun iyi bir şekilde yerleştirilmesi için en çok kullanılan metot şişleme ve vibrasyondur. Bu metotlar normal ve yüksek performanslı betonlar için yeterli olabilmektedir. Yapılan ilk denemelerde bu metotlar RPB için de uygulanmıştır. Fakat kullanılan kimyasal katkı dozajının fazla olması, işlenebilirliğe olumlu etkisinin yanı sıra, beton içerisine hava kabarcıkları sürüklemesi gibi olumsuz etkilere de neden olmaktadır. RPB'ye vibrasyon uygulanması sırasında katkının sürüklediği hava miktarında artış olduğu, betonun hava kabarcıkları sayesinde şişerek kalıptan taştığı yapılan çalışmalar sırasında görũlmüřtür. Bu nedenle RPB'de vibrasyon uygulamasından vazgeçilmek zorunda kalınmıştır.

Yerleştirmede uygulanan diğer bir yöntemde, normal beton dayanımını yaklaşık %20 kadar artış sağlayan revibrasyon uygulamasıdır [95, 96]. Benzer şekilde RPB'ye de revibrasyon uygulaması yapılmıştır. Belirlenen karışım üzerinde yapılan revibrasyon denemesinde, 10 cm'lik küp numunelere şahit, 20, 40, 60, 80, 100 dakika sürelerde 6 farklı tip revibrasyon uygulanmıştır. Revibrasyon uygulaması, numune kalıba doldurularak vibrasyon tablası üzerinde sarsılması ile yapılmıştır. Fakat revibrasyon denemelerinin tamamından olumlu bir sonuç alınamamıştır. Bu numunelere ait sonuçlar, Bölüm 4.4.1.1'de verilmiştir.

Vibrasyon ve revibrasyondan vazgeçilmesi ile betonun yerleştirilmesinde ilkel bir metot olan şişleme işlemine geçilmiştir. Şişleme işlemi diğer metotlara göre iyi sonuçlar vermesine rağmen, minimum boşluklu bir beton üretmek için yeterli gelmemektedir.

Bu nedenle düşük su/çimento oranına sahip normal betonlarda sıkıştırma basıncı uygulaması işlemi yapılmaktadır. Buna örnek olarak, baraj yapımı ve prefabrikasyon yapı elemanlarının üretimi gösterilebilir. Bu yöntemin temel amacı, düşük işlenebilirlikteki betonu boşluksuz olarak yerleştirilebilmektir. İşlenebilirliğin düşük olması, betonun yerleştirilmesinde zorluklar çıkarmakta, dayanımın artırılması için düşük su/çimento oranı kullanılması nedeniyle iyi bir yerleştirilme sağlanamadığı için dayanımda azalmalara yol açmaktadır. Bu nedenle bu tip kuru kıvamlı betonlara yüksek düzeyde sıkıştırma basıncı uygulanmaktadır.

RPB düşük su/çimento oranına sahip olmasına rağmen yüksek orandaki kimyasal katkı sayesinde işlenebilirliği istenilen düzeye getirilebilmektedir. Buna rağmen RPB'de su/çimento oranı normal betonlara göre çok düşük olsa da taze haldeki RPB içerisinde kapalı ceplerde su ve sıkışmış hava bulunmaktadır. Bu su ve havanın beton içerisinden çıkarılması için de taze haldeki betona basınç uygulanması düşünülmüştür. Su ve havanın çıkması ile birim hacim ağırlığın ve buna bağlı olarak da mekanik özelliklerde olumlu değişimler gözleneceği düşünülmüştür.

Uygulanacak sıkıştırma basıncının ne kadar olacağı ne şekilde ve süresinin ne olması gerektiği konusunda literatürde henüz kapsamlı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Literatürde bu konu ile ilgili çalışmada, bu işlemin uygulanmasının zorluğundan dolayı, RPB'ye genellikle tek bir basınç yükü uygulanmış ve onun da uygulama şekli ve süresi net olarak sunulan çalışmalarda belirtilmemiştir. Sıkıştırma basıncının miktarı ve uygulama süresinin betonun özelliklerini etkileyeceği düşünülmüş ve bu konuda kapsamlı bir deneysel çalışma yapılması kararlaştırılmıştır.

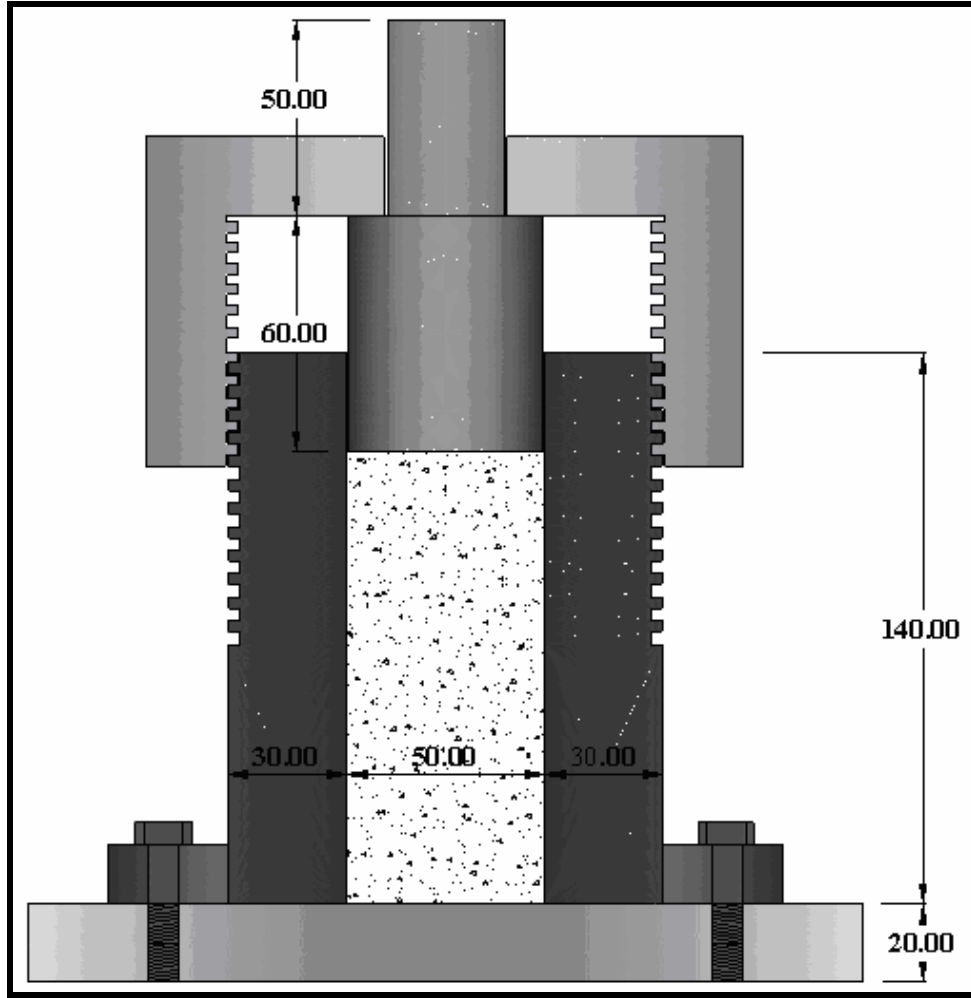
Sıkıştırma basıncı işlemi için öncelikle kullanılacak kalıp sisteminin tasarlanmasına geçilmiştir. Bu işlem için kullanılacak kalıplar aşağıda istenilen koşulları yerine getirecek şekilde tasarlanmıştır;

- Sıkıştırma yükü altında deformasyona uğramamalıdır.
- Sıkıştırmak için uygulanacak basıncı, betonun prizi süresince muhafaza edebilmelidir.
- Betonun içerisindeki hava ve suyun çıkışına izin verecek aynı zamanda da en küçük katı tanenin çıkışını engelleyecek şekilde olmalıdır.

Özellikle son madde, karışımının tamamı ince partiküllerden oluşan RPB için oldukça büyük bir problem olacağı düşünülmektedir.

Eğer uygulanan basınç, betonun sertleşme evresi boyunca yani karıştırmadan sonra prizi bitene kadar sürdürülürse, numunede kimyasal büzüşmenin (bünyesel rötrenin) bir sonucu olarak görülen boşlukların bir bölümü ortadan kaldırılabilir. Beton içerisinde oluşan kimyasal rötrenin ortadan kaldırılması için betonun priz süresi boyunca sürekli olarak basınç altında kalması gereklidir [5]. Aynı zamanda basıncın uygulanmasından hemen sonra basınç kaldırılırsa, numune içerisindeki basınç boşalacağı için sıkışmış tanelerin birbirini itmesi sonucu numune bir miktar genişerek çok az da olsa yoğunlukta bir azalma olacaktır ve bu durumda da sıkışma miktarı istenilen düzeyde yapılamamış olacaktır. Bu işlem beton numunesinin priz süresi boyunca pres altında kalmasını gerektirmektedir. Bu uygulanabilirlik açısından oldukça sıkıntılı bir durum olmaktadır. Bunun için kalıp tasarımında bir takım ilaveler yapılarak kalıp içerisinde bulunan betonu presten aldıktan sonra da kalıp içerisindeki basıncın boşalmaması ve betonun basınç altında katılaşması sağlanmıştır.

Bütün bu gereklilikleri yerine getirecek şekilde bir kalıp tasarlanmıştır. Kalıbın teknik resmi Şekil 3.27’de verilmiştir. Kalıba ait detaylı resim Ek B’de (Şekil B.1) verilmiştir.



Şekil 3.27. Beton sıkıştırma kalıbı

Kalıp, 1040 çeliğinden imal edilmiş ve daha sonra basınç altında herhangi bir boyut değişikliği olmaması için ısıtılarak sertleştirilmiştir [97].

Silindir kalıbın iç ölçüleri, 50 mm çapında ve 140 mm yüksekliğindedir. Numunenin konulduğu iç silindirin yan cidarlarında 6 adet, 0,1 mm derinliğinde ve genişliğinde olan ve silindirin monte edildiği alt tablaya kadar inen ve yine aynı şekilde alt tablada da bulunan su tahliyesi için özel olarak açılmış kanallar bulunmaktadır.

Kalıp tasarım aşamasında çok farklı kalıplar tasarlanmıştır. Bu kalıplar ile yapılan deneyler sırasında, herhangi bir olumsuz durum yokmuş gibi gözükse de üretilen numunelerin birim hacim ağırlık değerlerindeki tutarsızlık oluşturulan sistemin başarısızlığını açıkça ortaya koymuştur. Nihai kalıp tasarımında açılan su ve hava

tahliye kanallarının sayısı ve boyutlarının belirlenmesinde, deney sırasında gözlem ve birim hacim ağırlık değerleri dikkate alınmıştır.

Sertleşmiş numunenin örselenmeden çıkarılabilmesi için iç silindir yukarıdan numuneyi sıkıştıran pistonun çalışma alanı olarak 40 mm'lik bir pay bırakıldıktan sonra aşağıya doğru 0,05 derecelik bir açı verilerek çok hafif bir koniklik sağlanmıştır. Sertleşmiş numunenin örselenmeden çıkarılabilmesi için iç silindir, özel bir kalıp ayırıcı yağ ile yağlanmıştır.

Kalıp tasarımında yapılan ilaveler ile kalıp içerisinde bulunan betonu presten aldıktan sonra da kalıp içerisindeki basıncın boşalmaması ve betonun basınç altında sertleştirilmesi sağlanmıştır (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. Beton sıkıştırma kalıbını oluşturan parçalar

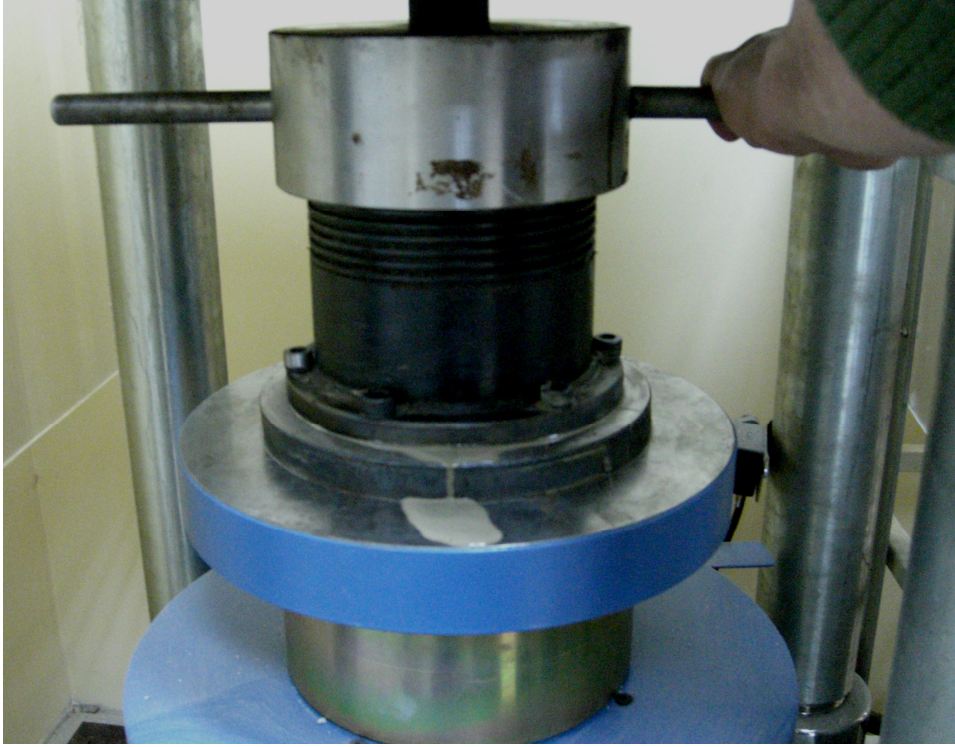
Akıcı kıvamdaki beton, kalıp üst yüzeyinden yaklaşık 15 mm boşluk kalacak şekilde doldurulmuştur. Pistonun yükü boşaltıldıktan sonra, geri gitmesini engellemek için silindir gövdenin dışına vidalanan parça kalıba monte edilmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. Beton sıkıştırma kalıbının monte edilmiş durumu

Deney sırasında pres altındaki beton sıkıştıkça piston aşağıya doğru hareket etmektedir. Pistonun aşağı hareketi ile birlikte, dışta bulunan ve silindirin üzerine vidalanan parça arasında boşluk oluşmaktadır. Silindir üzerine vidalanan bu parçanın yanlarında bulunan kolları sayesinde döndürülerek bu boşluk giderilmektedir. Sonuç olarak arada pistonun yukarı doğru hareket edebileceği boşluk kalmadığı için presteki yükün boşaltılması ile pistonun yukarı doğru gitmesini engellenmekte ve böylece silindirin içerisinde bulunan basınç muhafaza edilmektedir (Şekil 3.30).

Betona sıkıştırma basıncının uygulanması ile birlikte, büyük hava boşluklarındaki hava dışarı çıkmakta daha sonrada su çıkmaktadır. Betona uygulanmak istenilen basınç, suyun çok dar olan kanallardan çıkmasına zaman tanıyacak şekilde oldukça düşük bir yükleme hızında olması gerekmektedir. Bu nedenle kalıba doldurulan taze haldeki betona pres altında 0,13 MPa/sn'lik bir yükleme hızı ile istenilen yüke kadar yüklenmiş ve bu yük altında deformasyonu sabitleninceye kadar beklenerek pistonu tutan aparat sıkıştırılıp presin yükü boşaltılmıştır. Kalıbın içerisinde numune 24 saat sonra örselenmeden çıkarılarak, bir önceki bölümde belirlenen 3 gün 90°C buhar kürü, ardından 12 saat 300°C etüvde kür edilerek 28 günlük basınç dayanımına kadar normal su küründe bekletilmiştir (Şekil 3.31).



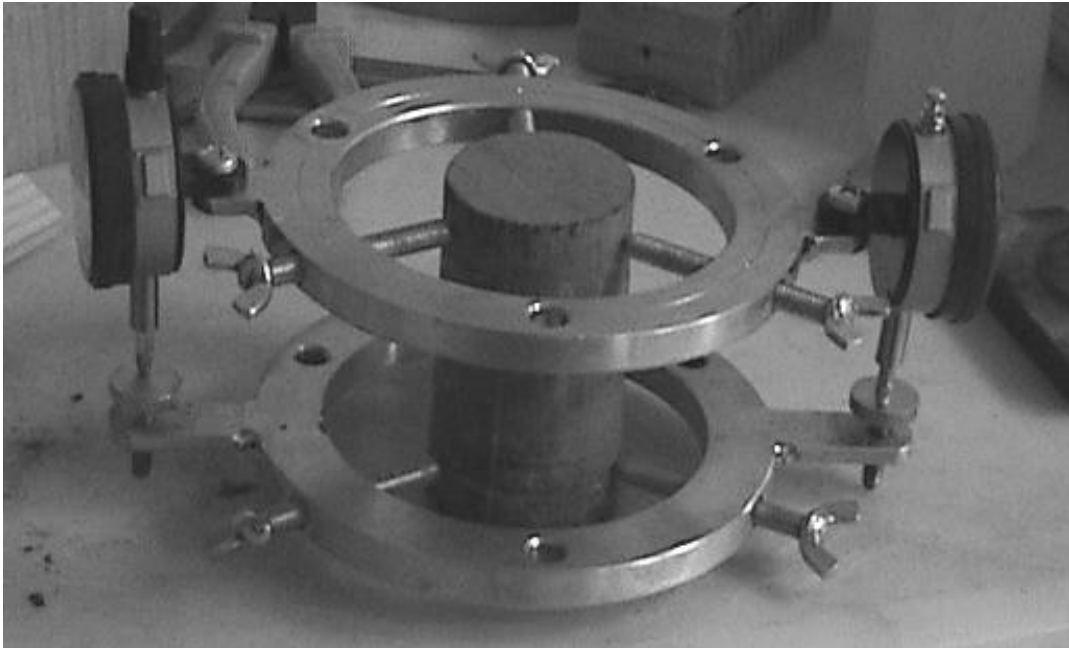
Şekil 3.30. Taze haldeki RPB'ye sıkıştırma basıncının uygulanması



Şekil 3.31. Sıkıştırma basıncı uygulanmış numuneler

Oluşturulan bu düzenek ile kalıp içerisine yerleştirilen taze haldeki karışıma, Şahit (basınçsız), 25, 50, 75, 100, 125 MPa'lık basınçlar uygulanarak numuneler üretilmiştir. Numune boyutlarının çapı 50 mm yükseklikleri 100 mm'dir. Numunelerin ilk olarak sıkıştırma etkisinin görülmesi için birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Sıkıştırma basıncının artması ile birlikte, birim hacim ağırlık değerlerinin artacağı açıktır. Ancak, silindir içerisinde numuneyi sıkıştıran pistonun, yükü farklı nedenlerden dolayı numuneye aksel olarak tam uygulayamaması ve kalıp yan cidarlarına takılması veya fark edilemeyecek diğer olumsuzluklardan dolayı birim hacim ağırlığı değeri azalabilmektedir. Bu olumsuzlukların oluşabilme ihtimalinden dolayı birim hacim ağırlık değerleri deneyin denetimi açısından son derece önemlidir.

Bu kalıplar kullanılarak üretilen numunelerin, 28 günlük basınç ve elastisite modülü değerleri bulunmuştur (Şekil 3.32). Elastisite modülü çerçevesi, numunelerin elastisite modüllerini belirleyebilmek için özel olarak tasarlanmıştır. Yükleme hızı 0,25 MPa/sn olarak ve 0,001 mm ölçüm hassasiyetinde okumalar alınarak gerilme-deformasyon grafiği çizilmiş ve bu grafik üzerinden elastisite modülleri bulunmuştur.

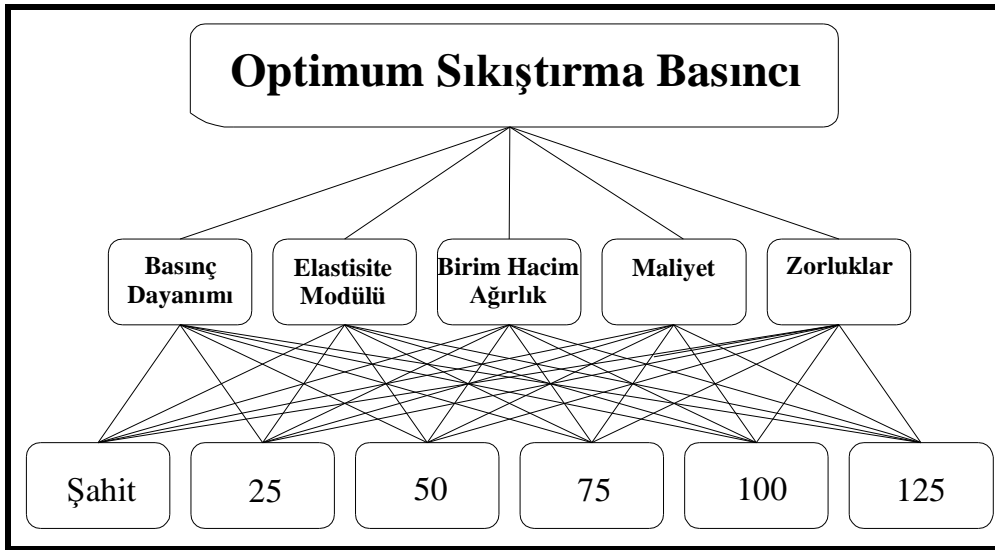


Şekil 3.32. Elastisite modülü çerçevesi

3.3.1.2. Basınçta sıkıştırma basıncının optimizasyonu

Sıkıştırma basıncı uygulanmış basınç numunelerinin mekanik özellikleri, uygulamanın zorluğu ve maliyet analizleri göz önüne alınarak değerlendirme yapılmış ve optimum sıkıştırma basıncı bulunmuştur.

Optimum sıkıştırma basıncına karar vermede detayları Bölüm 3.2.2.5’de anlatılan “analitik hiyerarşi proses” diğer bir adı ile “analitik hiyerarşi yaklaşımı” (AHP) yöntemi kullanılmıştır [87-89]. Bu yönetime göre şahit numunede dahil olmak üzere 6 farklı sıkıştırma basıncı değişken olarak kabul edilmiş ve bu değişkenlerden etkilenen, basınç dayanımı, elastisite modülü, birim hacim ağırlık, maliyet, ve sıkıştırma basıncının uygulanmasında yaşanan zorluklar olmak üzere 5 adet sonuç ele alınmıştır (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Optimum sıkıştırma basıncının belirlenmesinde kullanılan hiyerarşi sistemi

5 adet sonucun birbirlerine göre önem dereceleri 1 ile 9 aralığına göre değerlendirilerek 5x5’lik bir matris oluşturulmuştur. Oluşturulan bu matrisin normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Normalizasyon işlemi yapılmış 5x5’lik matrisin her bir satır ortalamaları bulunarak 1x5’lik matris elde edilir ve matrisin bu değerleri o satıra ait olan sonucun karar vermedeki ağırlık değeri olmuştur.

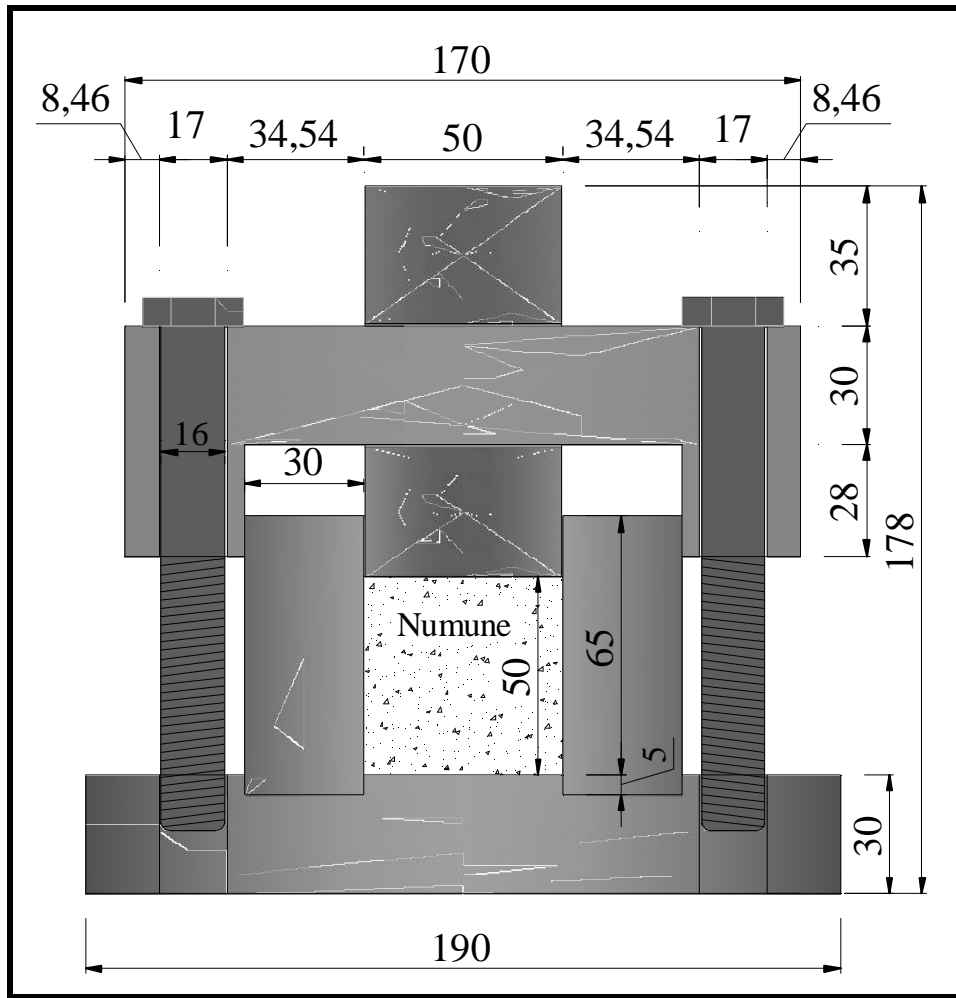
Sıkıştırma basıncına göre deney sonucunda elde edilen değerler kullanılarak ta 6x5'lik bir matris oluşturulmuştur. Bu matrisin tamamının 0 ile 1 arasında değerler alması için normalizasyon yapılmıştır. Bu normalizasyon işlemi, Bölüm 3.2.2.5'de verilen bağıntı 3.16 kullanılarak yapılmıştır. Sıkıştırma basıncına bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarının normalizasyon yapılarak oluşturulan 6x5'lik matris ile her bir sonucun ağırlık matrisi ile çarpılmış ve elde edilen matrisin sütunları toplanarak en büyük verimlilik değerine ait sıkıştırma basıncı değeri optimum sıkıştırma basıncı olarak belirlenmiştir.

3.3.1.3. Eğilme numunelerine uygulanması

Eğilme numunelerindeki sıkışmış hava miktarını ve suyu dışarı atmak ve böylece daha yoğun bir beton elde ederek betonun, hem kendi içindeki hem de lifler ile olan aderansını arttırmak için kiriş numunelerine sıkıştırma basıncı uygulanmıştır. Uygulanan basınç aynı zamanda rötreye olumlu katkı yapmakta, betonun yoğunluğunu arttırmakta ve bunlara paralel olarak dayanıklılık özelliklerine önemli katkılar sağlamaktadır.

Basınç numunelerinde olduğu gibi eğilme numunelerinde de, düşük su/çimento oranına sahip olmasına rağmen yüksek orandaki kimyasal katkı dozajı sayesinde işlenebilirlik istenilen düzeye getirilebilmektedir. Buna rağmen beton içerisindeki boşluklar minimize edilememektedir. Kimyasal katkıdan ve diğer etkilere dolayı oluşan birbirinden bağımsız boşlukların eğilme dayanımı üzerindeki etkisi basınç dayanımına göre daha fazla olmaktadır. Kiriş numunelerindeki bu boşluklar, ilk olarak çentik etkisi yapmakta ve çatlak oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Ayrıca çatlak oluşuktan sonra çatlağın ilerlemesi de kolay olmakta, bu da ilk çatlak dayanımı, maksimum eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu boşlukların bir diğer etkisi de betonun lif ile olan aderansını azaltmasıdır. Lifler, aderansın yetersiz olmasından dolayı beton içerisinden daha kolay sıyrılmakta ve betonun eğilmedeki mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

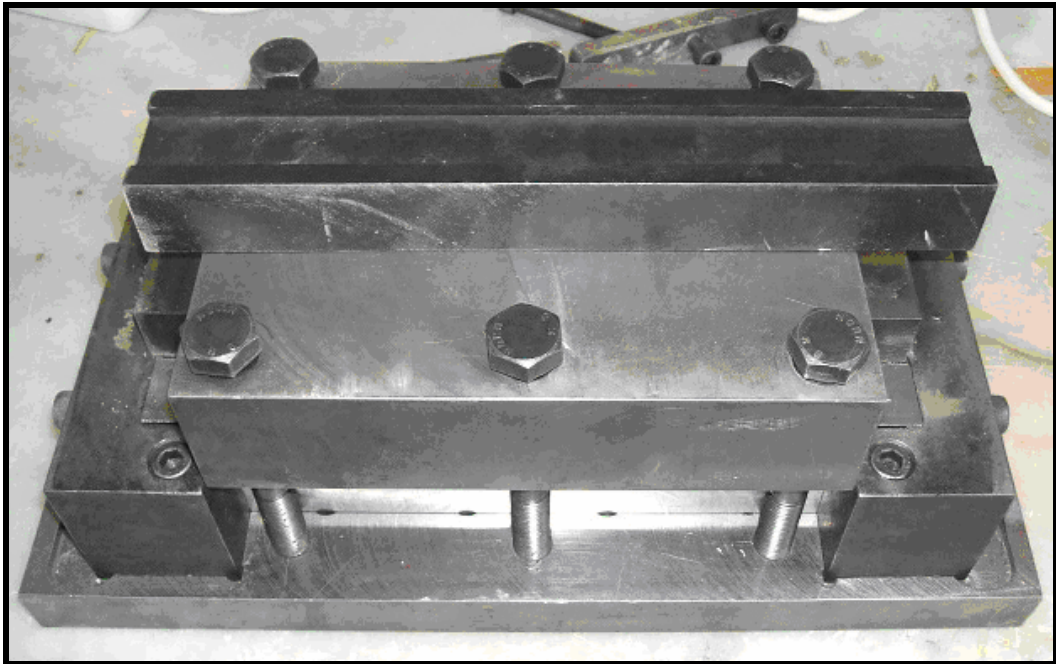
Basınç numunelerinin üretilmesinde kullanılan kalıbın malzeme özellikleri dikkate alınarak, dikdörtgen prizma şeklinde bir kalıp tasarlanmıştır. Kalıpların ölçüsü, sıkıştırma basıncı uygulanmayan eğilme numuneleri ile bir kıyaslama yapılabilmesi açısından 50×50×300 mm şeklinde seçilmiştir. Kalıp, betona uygulanan basınç altında, her hangi bir şekil değişimine uğramaması için kalıbı oluşturan metal (1040 çeliği) malzemelere ısıtma işlemi uygulanarak malzeme sertliği artırılmıştır [97]. Kalıplara ait çizim ve fotoğraflar Şekil 3.34, 35a,b’de verilmiştir. Kalıba ait detaylı resimler Ek B’de (Şekil B.2-5) verilmiştir.



Şekil 3.34. Tasarlanan eğilme numunelerine ait kalıbın teknik resmi ve ölçüleri (mm)



a)

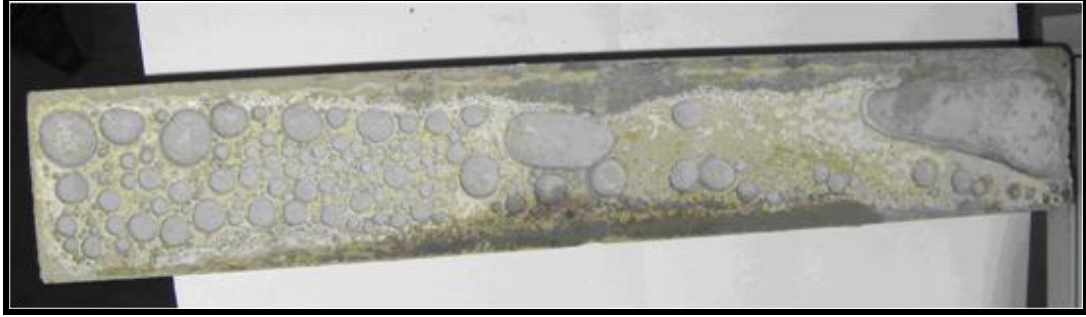


b)

Şekil 3.35.a Kiriş kalıbının monte edilmiş şeklinin önden görünüşü
b Kiriş kalıbının monte edilmiş şeklinin üstten görünüşü

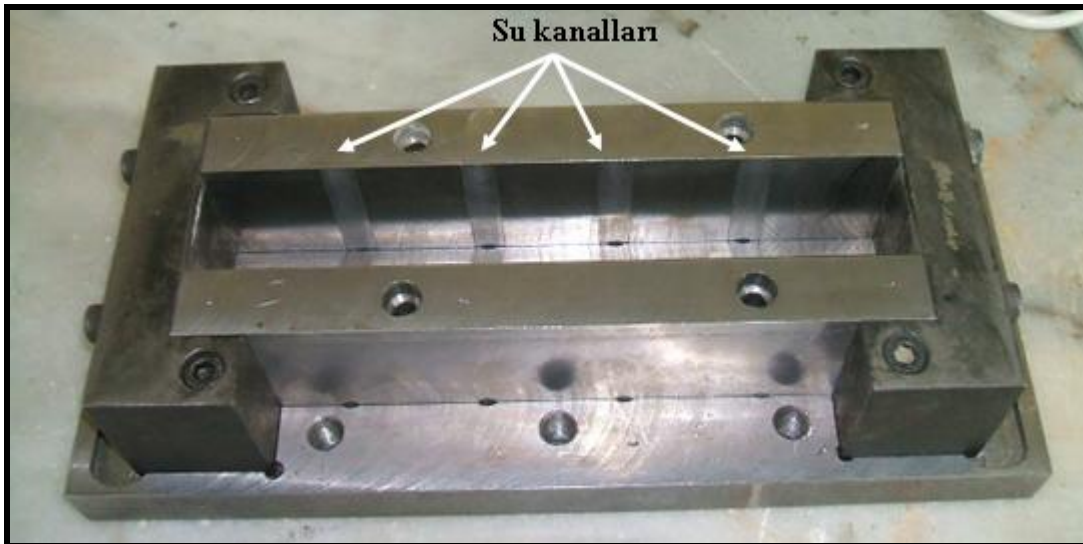
Yapılan ön çalışmalarda suyun çıkması için kalıba herhangi bir su kanalı açılmamış, suyun kalıbın birleşim noktalarından çıkacağı düşünülmüştür. Fakat durum

beklenildiği gibi olmamıştır. Suyun ve havanın çıkmaması numunenin boşluk yapısını arttırmıştır (Şekil 3.36).



Şekil 3.36. Su ve havanın kalıp içerisinde kalması sonucu numunede oluşan boşluklar

Suyun çıkması için basınç numune kalıplarında olduğu gibi su kanalları açılmıştır. Su kanallarının sayısı, yeri, şekli ve boyutunun ne olması gerektiği yapılan bir takım denemeler sonucunda ancak belirlenebilmiştir. İlk olarak kalıbın yan taraflarına 0,1 mm derinliğinde, 1 mm genişliğinde ve 6 cm aralıklar ile 4 adet su kanalı açılmış ve suyun bu kanallardan yukarı doğru çıkarak kalıbı terk etmesi planlanmıştır. Ancak yapılan ön çalışmalarda bu kanalların dar olduğu ve su çıkışının yeterli düzeyde olmadığı görülerek kanal genişlikleri 15 mm olarak değiştirilmiştir (Şekil 3.37).

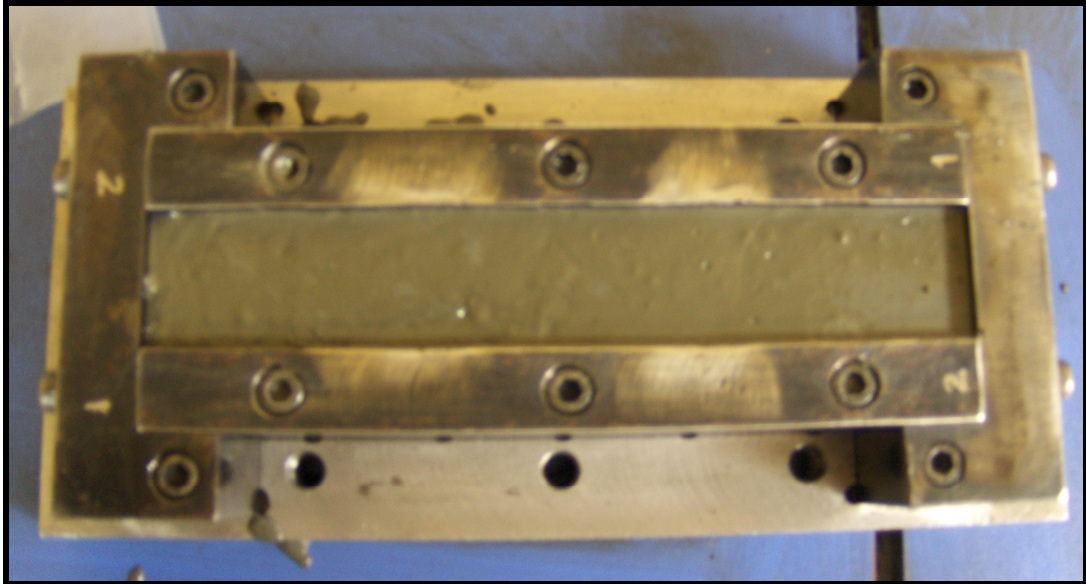


Şekil 3.37. Kalıbın yan kenarlarına açılan su çıkış kanalları

Suyun istenildiği gibi üst kısımdan çıkışı sağlanmış olmasına rağmen bu yeterli görülmemiş ve alt tablaya da yan parçalarda bulunan kanalların altına aynı ebatlarda su kanalı açılarak suyun hem alttan hem de üstten çıkışı sağlanmıştır.

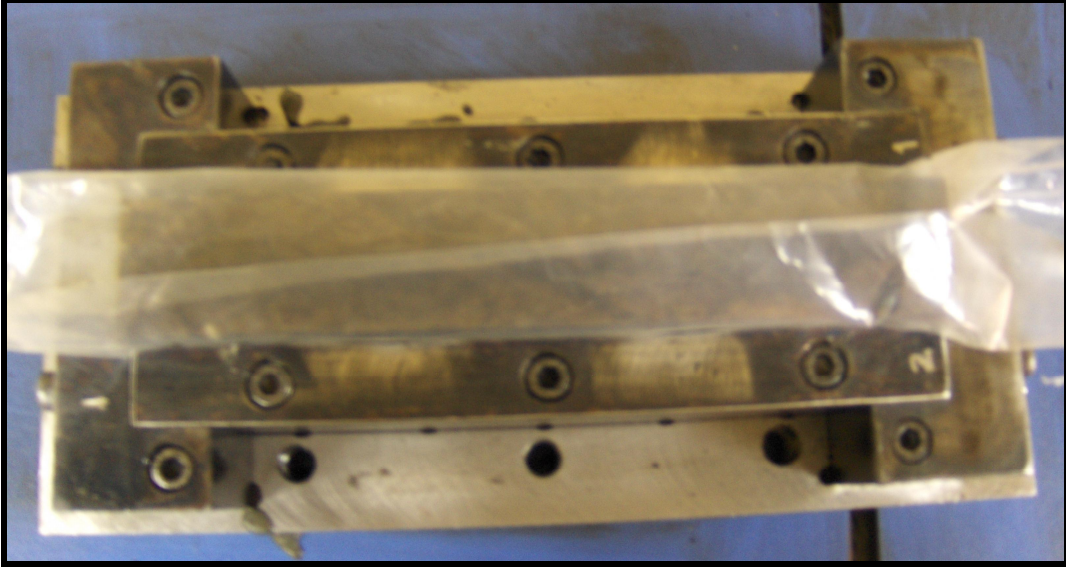
Önceki çalışmada, basınç numunelerine uygulanan sıkıştırma basıncının, betonun nihai dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışma sonuçları dikkate alınarak kiriş numunelerine uygulanacak sıkıştırma basıncı; Şahit, 5, 10, 15, 20, 25 MPa olarak belirlenmiştir.

Taze haldeki RPB, kalıbın üst yüzeyinden yaklaşık 5 mm kalacak şekilde kalıba doldurulmuştur (Şekil 3.38).



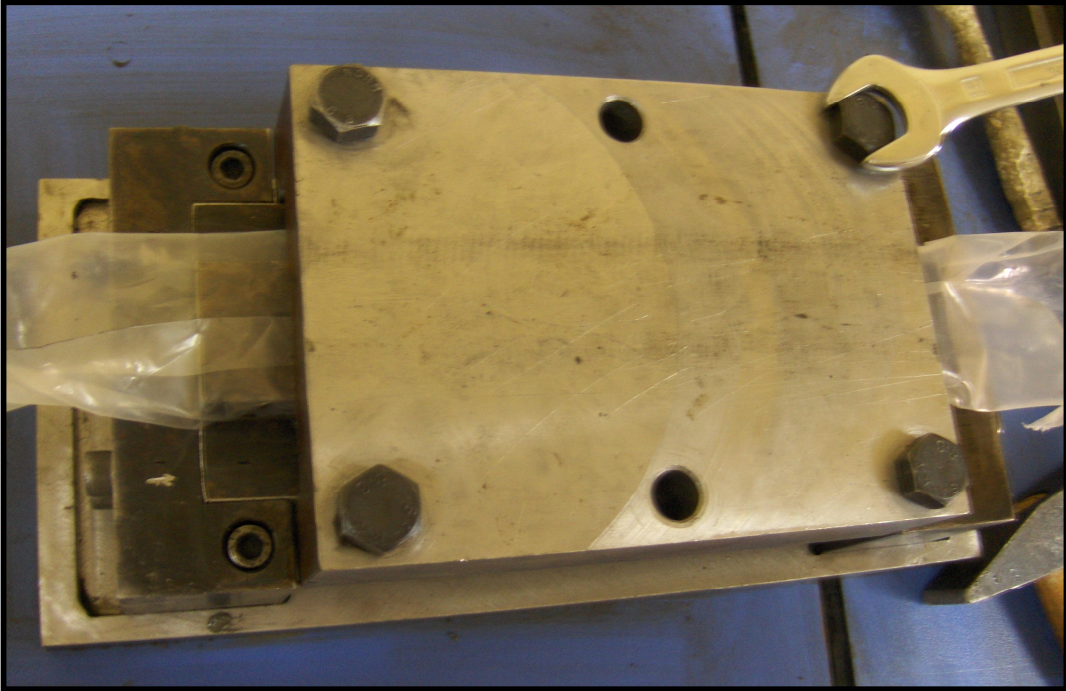
Şekil 3.38. Taze haldeki numunenin kalıba doldurulması

İkinci adım olarak taze betonu sıkıştıran dikdörtgen prizma şeklindeki ısıtılmış işlem gören sertleştirilmiş sıkıştırma parçası beton üst yüzeyine yerleştirilmiştir. Sıkıştırma parçasının kalıp yan cidarlarına takılmaması ve taze haldeki betona yapışmaması için bu temas yüzeyleri arasına ince plastik malzemenin bir ayırıcı konulmuştur (Şekil 3.39).



Şekil 3.39. Sıkıştırma basınç elamanının yerleştirilmesi

Basınç altındaki kalıbın yan taraflarının açmaması ve dikdörtgen sıkıştırma parçasının yük boşaldıktan sonra geri gitmesini engellemesi için alt tablaya vidalar ile bağlanan “U” şeklinde bir parça yerleştirilmiştir (Şekil 3.40).



Şekil 3.40. Pistonun geri gitmesini engelleyen parçanın monte edilmesi

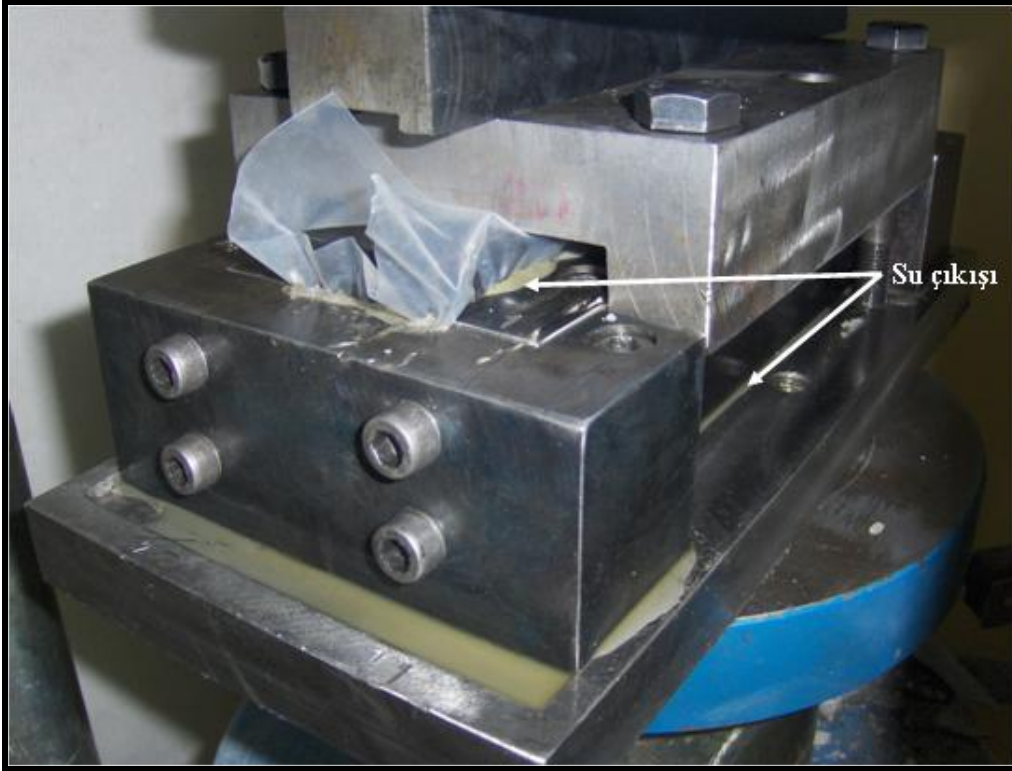
“U” şeklindeki parçanın takılmasından sonra, parça 6 adet vida ile alt tablaya, yüklemenin her noktaya eşit olarak etkimesi için su terazisi yardımı ile ayarlanarak, sabitlenmiş ve kalıp prese yerleştirilmiştir. Presin üst tablası ile vidaların başlıkları arasında, istenilen yüke gelindiğinde vidaları sıkmak için bir miktar mesafeye ihtiyaç vardır. Bu işlem için 50×50×300 mm boyutlarında ısıtılarak sertleştirilmiş dikdörtgen bir prizma kullanılmıştır.

Bu basınçların uygulama süresi basınç numunelerin üretiminde olduğu gibi, kalıba doldurulan taze haldeki betona pres altında 0,13 MPa/sn’lik bir yükleme hızı ile istenilen yüke kadar yüklenmiş ve bu yük altında deformasyonu sabitleninceye kadar beklenmiştir. Daha sonra betonu sıkıştıran aparatların üzerindeki 6 adet 16 mm çapındaki ısıtılarak sertleştirilmiş vidalar sıkıştırılarak presin yükü boşaltılmıştır (Şekil 3.41).

Kalıbın içerisinden numune, 24 saat sonra kalıbın bütün parçaları sökülerek örselenmeden çıkarılmıştır (Şekil 3.42). Kür bölümünde belirlenen 3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 300°C etüvde kür edilmiştir.

Numuneler deneyden önce çatlakların oluşumunun yerini ve ilerlemesini daha iyi görebilmek için beyaz renge boyanarak, 50 mm uzunluğunda bölgelere ayrılarak numaralandırılmıştır.

Kiriş numuneleri her iki ucundan mesnetleri 25 mm geçecek şekilde kendi etrafında dönebilen rulo şeklindeki mesnetler üzerine konulmuştur (Şekil 3.43). İki mesnet arasındaki açıklık olan 250 mm, üç eşit parçaya bölünerek kiriş numunesi Şekil 3.51’deki gibi iki noktadan yüklenmiştir. Deney cihazının yükleme hızı TS 10515’te belirtildiği gibi kiriş orta noktasında, 0,05-0,10 mm/min sehim yapacak şekilde ayarlanmıştır [80-82]. Numuneler bu hızda tamamen kırılıncaya kadar yüklenerek yük sehim grafikleri elde edilmiştir.

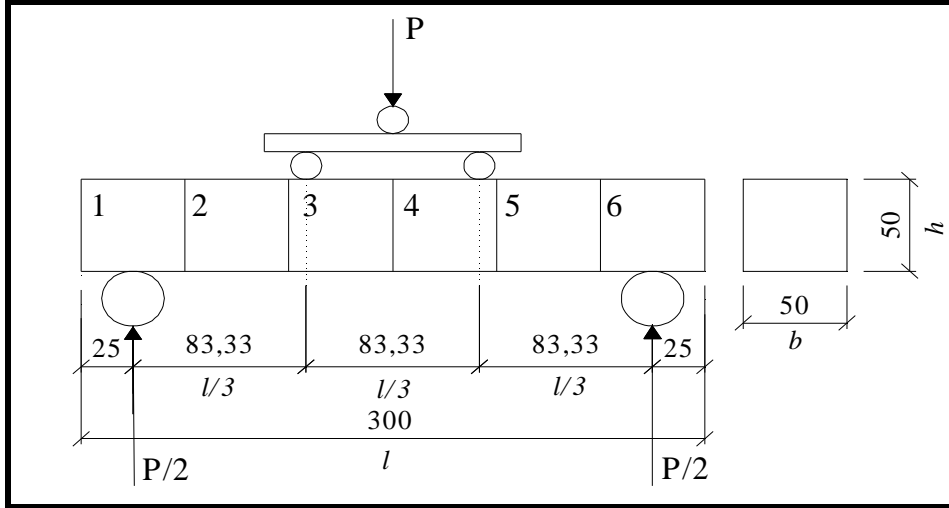


Şekil 3.41. RPB'nin sıkışması sonucu sıvının dışarı çıkması



Şekil 3.42. Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB kiriş numunesi

Numunelerin ilk çatlak dayanımı, eğilme dayanımı, elastik şekil değiştirme indeksleri, kırılma tokluğu ve enerjilerinin hesaplanmasında normal eğilme numunelerine kullanılan bağıntılardan (Bölüm 3.2.2.4.) yararlanılmıştır. Numunelerin aynı zamanda birim hacim değerleri bulunarak sıkıştırma basıncının etkisi araştırılmıştır.

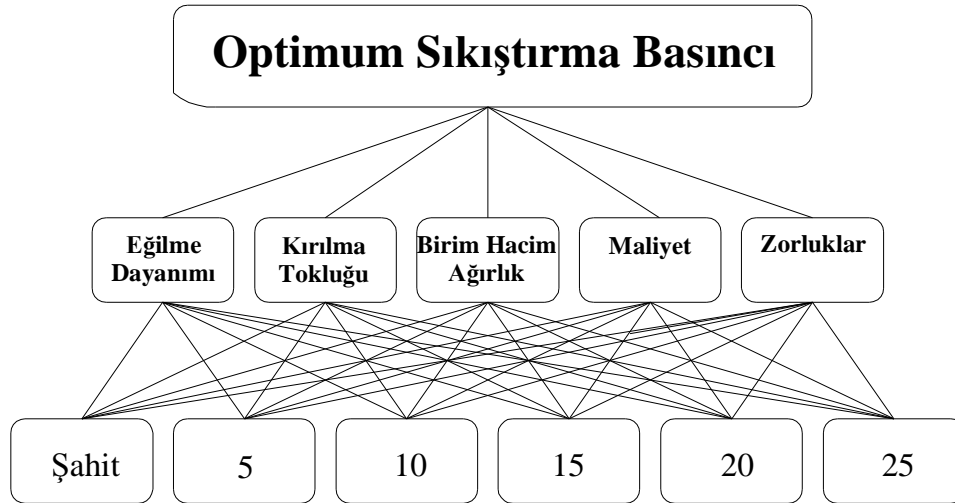


Şekil 3.43. Eğilme deney numunesinin yükleme şekli ve ölçüleri (Ölçüler mm'dir.)

3.3.1.4. Eğilmede sıkıştırma basıncının optimizasyonu

Sıkıştırma basıncı uygulanmış basınç numunelerinin mekanik özellikleri, uygulamanın zorluğu ve maliyet analizleri göz önüne alınarak değerlendirme yapılmış ve eğilme numunelerinde optimum sıkıştırma basıncı bulunmuştur.

Optimum sıkıştırma basıncına karar vermede detayları Bölüm 3.2.2.5'de anlatılan “analitik hiyerarşi yaklaşımı” (AHP) yöntemi kullanılmıştır [87-89]. Bu yöntemle göre şahit numunede dahil olmak üzere 6 farklı sıkıştırma basıncı değişken olarak kabul edilmiş ve bu değişkenlerden etkilenen, eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, birim hacim ağırlık, maliyet, ve sıkıştırma basıncının uygulanmasında yaşanan zorluklar olmak üzere 5 adet sonuç ele alınmıştır (Şekil 3.44).



Şekil 3.44. Eğilme numunelerinde optimum sıkıştırma basıncının belirlenmesinde kullanılan hiyerarşi sistemi

Sıkıştırma basıncına göre deney sonucunda elde edilen değerler kullanılarak ta 6x5'lik bir matris oluşturulmuştur. Sıkıştırma basıncına bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarının normalizasyon yapılarak oluşturulan 6x5'lik matris ile her bir sonucun ağırlık matrisi ile çarpılmış ve elde edilen matrisin sütunları toplanarak en büyük verimlilik değerine ait sıkıştırma basıncı değeri optimum sıkıştırma basıncı olarak belirlenmiştir.

BÖLÜM 4. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Karışımın Belirlenmesi

Karışımın belirlenmesinde 1. aşama olarak literatürden yararlanılmıştır ve I. Grup karışım RPB ile ilgili yapılan çalışmalardan yararlanılarak oluşturulmuştur [5, 9, 18, 19, 21, 26, 27]. Literatürden elde edilen karışım oranları kullanılarak farklı çimento içeriklerinde karışımlar hazırlanmış ve bu karışımların 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. 2. aşamada ise çimento miktarı 800, 900, 1000 ve 1100 kg için %35, 40, 45, 50 oranlarında kuvars pudrası, kuvars kumu ile ikameli olarak kullanılmış ve basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Buradan elde edilen uygun kuvars pudrası ve çimento miktarı içeriği kullanılarak 3. aşamaya geçilmiştir. 3. aşamada silis dumanı %15, 20, 25, 30, 35 oranlarında kuvars kumlarına ikameli olarak kullanılmış ve basınç dayanımına olan etkisi incelenmiştir. 4. aşamada ise Bölüm 3.2.2.1'de açıklanan bilgisayar hazır paket programı kullanılarak karışım oranları bulunmuştur. Yapılan bu deneysel çalışmaların sonucunda daha sonraki deneysel çalışmalarda kullanılacak karışım oranları belirlenmiştir. Her bir karışım için 3 adet deney numunesi üretilmiş ve bu 3 numuneyi en iyi şekilde temsil eden grafikler ve ortalama değerler, tablo ve şekillerde verilmiştir.

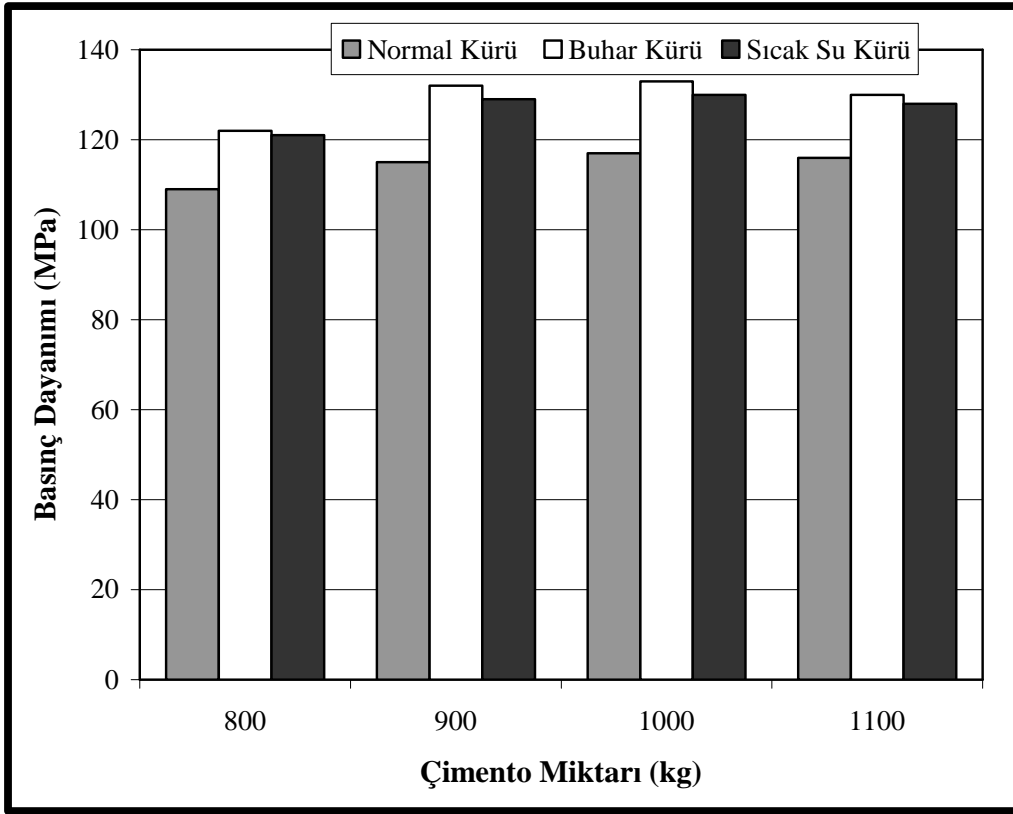
Literatürden elde edilen karışımlar, Mooney süspansiyon modelinden yararlanılarak elde edilmiştir. Bu konu ile ilgili yapılan ilk ve temel çalışmada karışımı oluşturan malzeme miktarları çimentoya bağlı olarak oranlanmış ve sadece bu oranlar verilmiştir [5]. Çalışmadaki oranlara göre çimento miktarı literatürde bulunan diğer kaynaklardan yararlanılarak ilk olarak 800 kg alınmış ve diğer malzeme miktarları bu oranlar kullanılarak hesaplanmıştır. Karışımı oluşturan tüm malzemelerin hacimleri bulunarak toplanmıştır ve toplam hacim değeri 1000 dm³'e eşitlenmesi için artan veya eksik kalan hacim miktarı malzemelerin çimentoya göre olan hacimsel oranları dikkate alınarak dağıtılmıştır. Bu işlem için taneli malzemelerin her birinin hacmi

çimento hacmine bölünerek, çimentoya göre hacimsel olarak oranlanmıştır. Elde edilen bu değer çimentoya göre bulunmuş hacimsel oranlar ile çarpılarak ilk başta bulunan hacim fazla ise, her bir malzemenin hacminden çıkarılmış az ise toplanmıştır. Bu yöntem sayesinde, bütün malzemelerin hacim miktarları azaltılmış veya arttırılmış ama çimentoya göre olan hacimsel oranları sabit tutulmuş ve karışım oranları korunmuştur. Karışımlar laboratuarda hazırlanarak su ve katkı düzeltmesi yapılmış ve I. Grubun 1. karışımı hazırlanmıştır. Daha sonraki karışımlar için çimento, silis dumanı ve kuvars pudrası arasındaki oranlar sabit tutularak çimento miktarı her bir karışım için yaklaşık 100 kg arttırılmış ve her iki kuvars kumu azaltılarak karışım miktarları oluşturulmuştur. Karışımlara ait malzeme miktarları ve üç farklı kür tipi olan, normal, 90°C buhar ve 90°C sıcak su kürlerine göre 28 günlük basınç dayanımı değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tabloda karışımı oluşturan malzeme miktarları ile parantez içerisinde her bir malzemenin çimentoya göre ağırlıkça oranı verilmiştir.

Karışım miktarları ve oranlarının verildiği tablolardaki kısaltmalar, çimento “Ç”, silis dumanı “SD”, kuvars pudrası “KP”, 100-300 µm tane aralığındaki kuvars kumu “1.KK”, 300-600 µm tane aralığındaki kuvars kumu “2.KK” ile gösterilmiştir. Ayrıca bağlayıcı olarak, çimento+silis dumanı tanımlanmaktadır.

Tablo 4.1. Karışımlara ait malzeme miktarları ve farklı kür tiplerine göre 28 günlük basınç dayanımları

		Malzeme										Basınç Dayanımı (MPa)		
Grup No	Karışım No	Ç (kg)	SD (kg)	KP (kg)	1. K K (kg)	2. K K (kg)	Su (lt)	K. Katkı (lt)	Hava (%)	Toplam (kg)	Su/Bağlayıcı	Su Kürü	Buhar Kürü	Sıcak Su Kürü
I	1	800 (1)	184 (0,23)	240 (0,30)	429 (0,54)	429 (0,54)	216 (0,27)	24 (0,03)	2	2322	0,22	109	122	121
	2	900 (1)	207 (0,23)	270 (0,30)	330 (0,38)	330 (0,37)	234 (0,26)	27 (0,03)	2	2298	0,21	115	132	129
	3	1000 (1)	230 (0,23)	300 (0,30)	232 (0,23)	232 (0,23)	250 (0,25)	30 (0,03)	2	2274	0,20	117	133	130
	4	1100 (1)	253 (0,23)	330 (0,30)	124 (0,15)	124 (0,15)	264 (0,24)	33 (0,03)	3	2228	0,20	116	130	128



Şekil 4.1. I. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği

Çimento miktarı 800 kg iken basınç dayanımı normal küre oranla buhar ve sıcak su küründe ortalama %12 arttığı görülmüştür. Bu artış sıcaklık etkisi ile çimento hidratasyon ürünlerinin, silis dumanı ile olan puzolanik aktivitenin artması ile açıklanabilir. Çimento miktarı 800 kg'dan 900 kg çıkması ile basınç dayanımı; su kürü uygulanmış numunelerde %5, buhar kürü uygulanmış numunelerde %8 ve sıcak su kürü uygulanmış numunelerde %7 arttığı tespit edilmiştir. Silis dumanının çimentoya oranının sabit tutulması ve çimento miktarının artması ile silis dumanı miktarının doğru orantılı olarak artması sıcaklık etkisi ile puzolanik aktiviteyi arttırmış ve bunun sonucunda da basınç dayanımı artmıştır. Çimento miktarı 900 kg'dan 1000 kg çıkması ile basınç dayanımı; su kürü uygulanmış numunelerde %2, buhar ve sıcak su kürü uygulanmış numunelerde ise çok az bir miktar (%0,8) artmıştır. Çimento miktarı 1000 kg'dan 1100 kg çıkması ile basınç dayanımında belirgin bir değişim görülmemiştir.

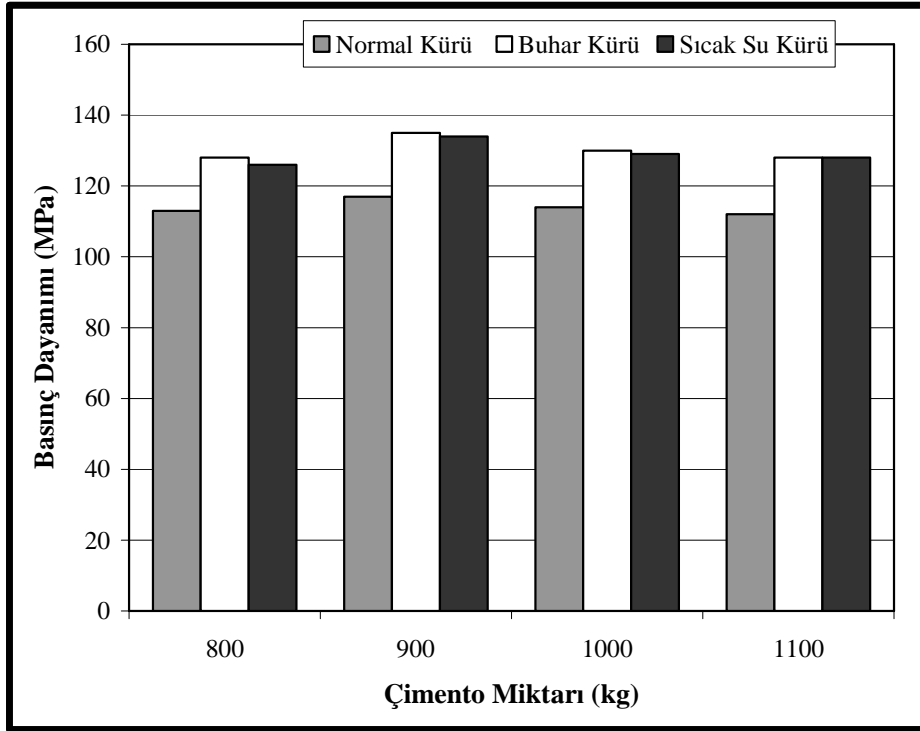
Daha önce yapılmış olan çalışmalarda çimento ile silis dumanı arasındaki oran, 0,20 ile 0,30 arasındadır. Bu oranların, çimentonun hidratasyon sonucu oluşan kirecin tüketilmesi ve çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurmak için yeterli olduğu öngörülmüştür [5, 10, 98-101]. Bu nedenle SD oranı 0,23 olarak belirlenerek, KP miktarı %30'dan %35-40-45-50 oranlarına arttırılarak Tablo 4.2'deki II., III., IV. ve V. Grup karışımlar oluşturularak, kuvars pudrasının basınç dayanıma olan etkisi incelenmiştir. I. Grupta, çimento, SD ve KP'den oluşan pastanın tüm karışım içerisindeki miktarının artması dayanımı arttırdığı için arttırılan KP'sı, kuvars kumu ile ikameli olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda çimento miktarı 800 kg'dan yaklaşık 100 kg artış ile 1100 kg'a kadar çıkarılmış ve karışım grupları oluşturulmuştur. Ancak, karışımların oluşturulmasında istenilen işlenebilirliğin elde edilebilmesi için su ve kimyasal katkı düzenlemesi yapılmıştır.

Tablo 4.2. Karışımlara ait malzeme miktarları ve farklı kür tiplerine göre 28 günlük basınç dayanımları

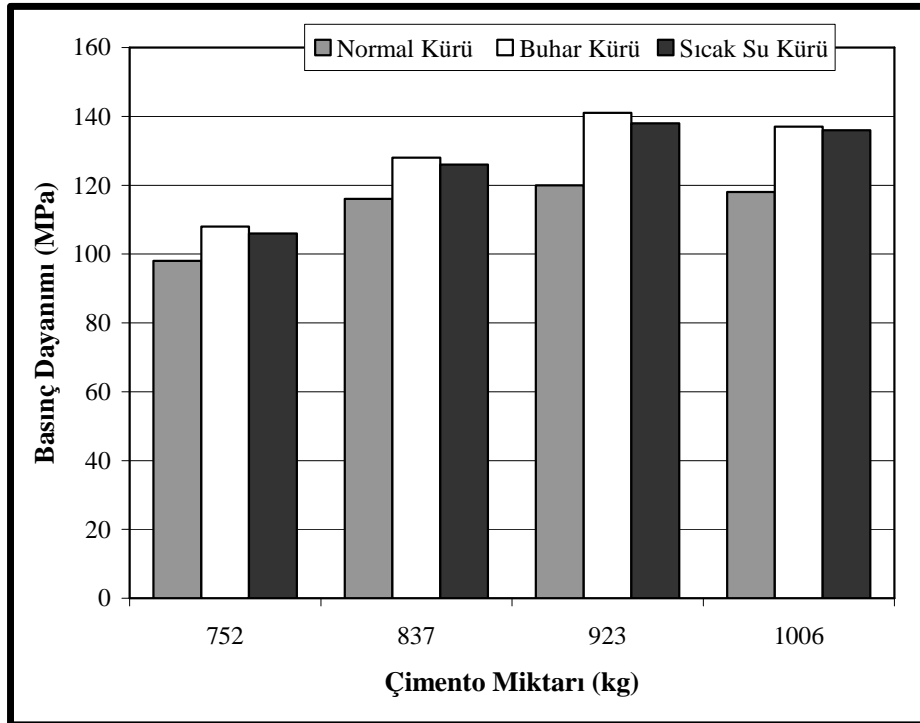
		Malzeme										Basınç Dayanımı (MPa)		
Grup No	Karışım No	Ç (kg)	SD (kg)	KP (kg)	1. K K (kg)	2. KK (kg)	Su (lt)	K. Katkı (lt)	Hava (%)	Toplam (kg)	Su/Bağlayıcı	Su Kürü	Buhar Kürü	Sıcak Su Kürü
II	5	800 (1)	184 (0,23)	280 (0,35)	382 (0,48)	382 (0,48)	216 (0,27)	24 (0,03)	4	2268	0,22	113	128	126
	6	900 (1)	207 (0,23)	315 (0,35)	294 (0,33)	294 (0,33)	234 (0,26)	27 (0,03)	3	2271	0,21	117	135	134
	7	1000 (1)	230 (0,23)	350 (0,35)	194 (0,19)	194 (0,19)	250 (0,25)	30 (0,03)	3	2248	0,20	114	130	129
	8	1100 (1)	253 (0,23)	385 (0,35)	97 (0,09)	97 (0,09)	264 (0,24)	33 (0,03)	3	2229	0,20	112	128	128
III	9	752 (1)	173 (0,23)	293 (0,40)	427 (0,57)	427 (0,57)	203 (0,27)	19 (0,03)	4	2294	0,22	98	108	106
	10	837 (1)	192 (0,23)	326 (0,40)	353 (0,42)	353 (0,42)	218 (0,26)	21 (0,03)	3	2300	0,21	116	128	126
	11	923 (1)	212 (0,23)	360 (0,40)	266 (0,29)	266 (0,33)	231 (0,25)	23 (0,03)	3	2281	0,20	120	141	138
	12	1006 (1)	231 (0,23)	392 (0,40)	186 (0,19)	186 (0,19)	252 (0,25)	25 (0,03)	2	2278	0,20	118	137	136

Tablo 4.2. (Devam)

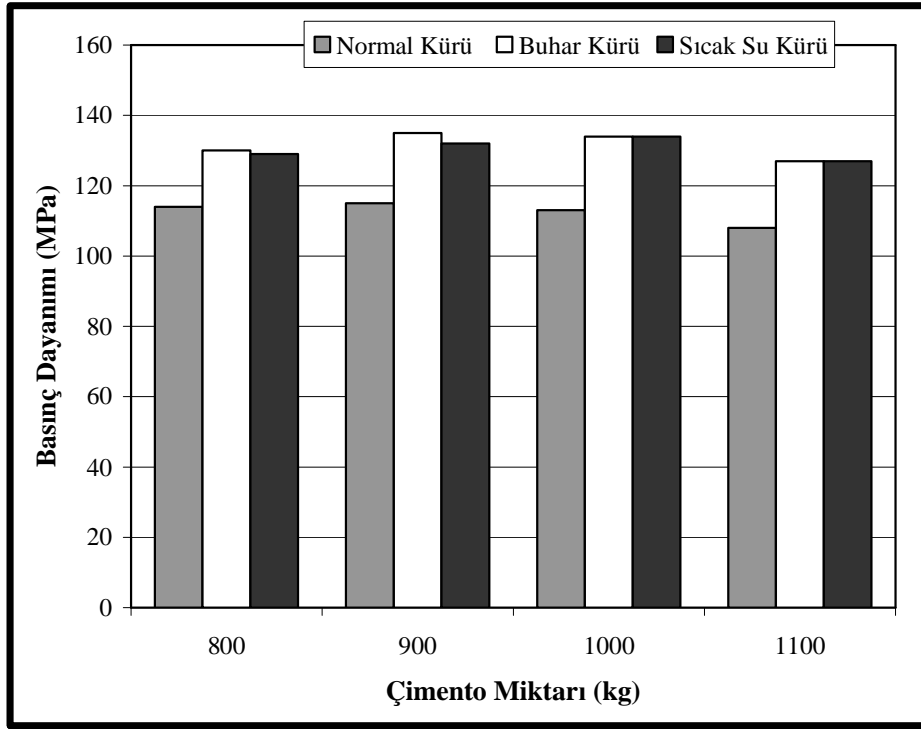
		Malzeme										Basınç Dayanımı (MPa)		
Grup No	Karışım No	Ç (kg)	SD (kg)	KP (kg)	1. K K (kg)	2. KK (kg)	Su (lt)	K. Katkı (lt)	Hava (%)	Toplam (kg)	Su/Bağlayıcı	Su Kürü	Buhar Kürü	Sıcak Su Kürü
IV	13	800 (1)	184 (0,23)	360 (0,45)	355 (0,44)	355 (0,44)	216 (0,27)	24 (0,03)	3	2294	0,22	114	130	129
	14	900 (1)	207 (0,23)	405 (0,45)	248 (0,28)	248 (0,28)	234 (0,26)	27 (0,03)	3	2269	0,21	115	135	132
	15	1000 (1)	230 (0,23)	450 (0,45)	156 (0,16)	156 (0,16)	250 (0,25)	30 (0,03)	2	2272	0,20	113	134	134
	16	1100 (1)	253 (0,23)	495 (0,45)	56 (0,05)	56 (0,05)	264 (0,24)	33 (0,03)	2	2257	0,20	108	127	127
V	17	800 (1)	184 (0,23)	400 (0,50)	336 (0,42)	336 (0,42)	216 (0,27)	24 (0,03)	3	2296	0,22	110	121	118
	18	900 (1)	207 (0,23)	450 (0,50)	219 (0,24)	219 0,243	239 0,27	27 (0,03)	3	2261	0,22	115	127	126
	19	1000 (1)	230 (0,23)	500 (0,50)	132 (0,13)	132 0,132	250 0,25	30 (0,03)	2	2274	0,20	110	120	120
	20	1100 (1)	253 (0,23)	550 (0,50)	15 (0,01)	15 (0,01)	264 (0,24)	33 (0,03)	3	2230	0,20	107	120	118



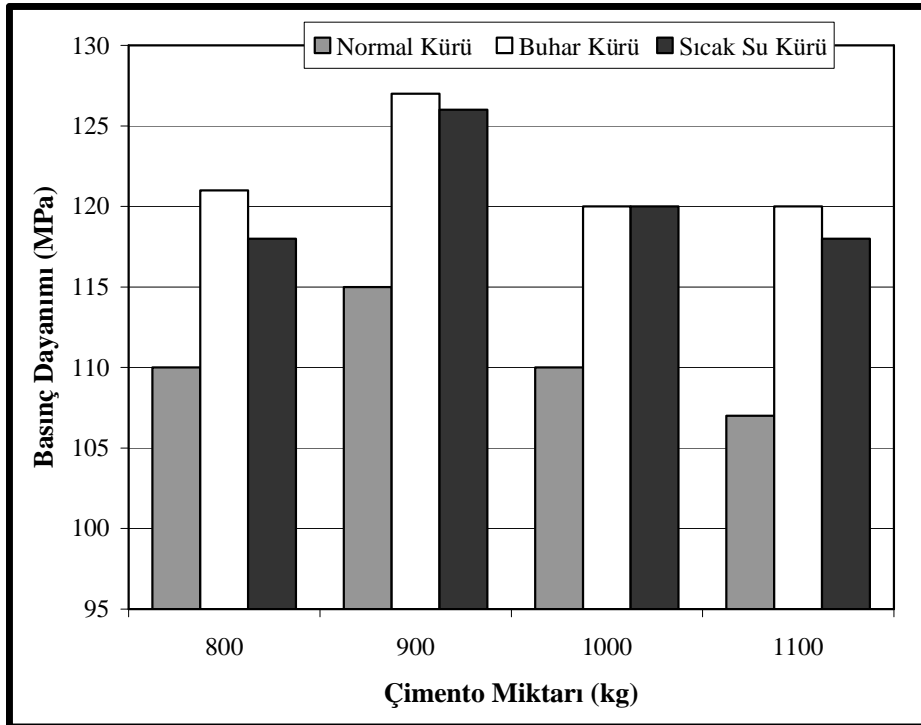
Şekil 4.2. II. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği



Şekil 4.3. III. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği



Şekil 4.4. IV. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği

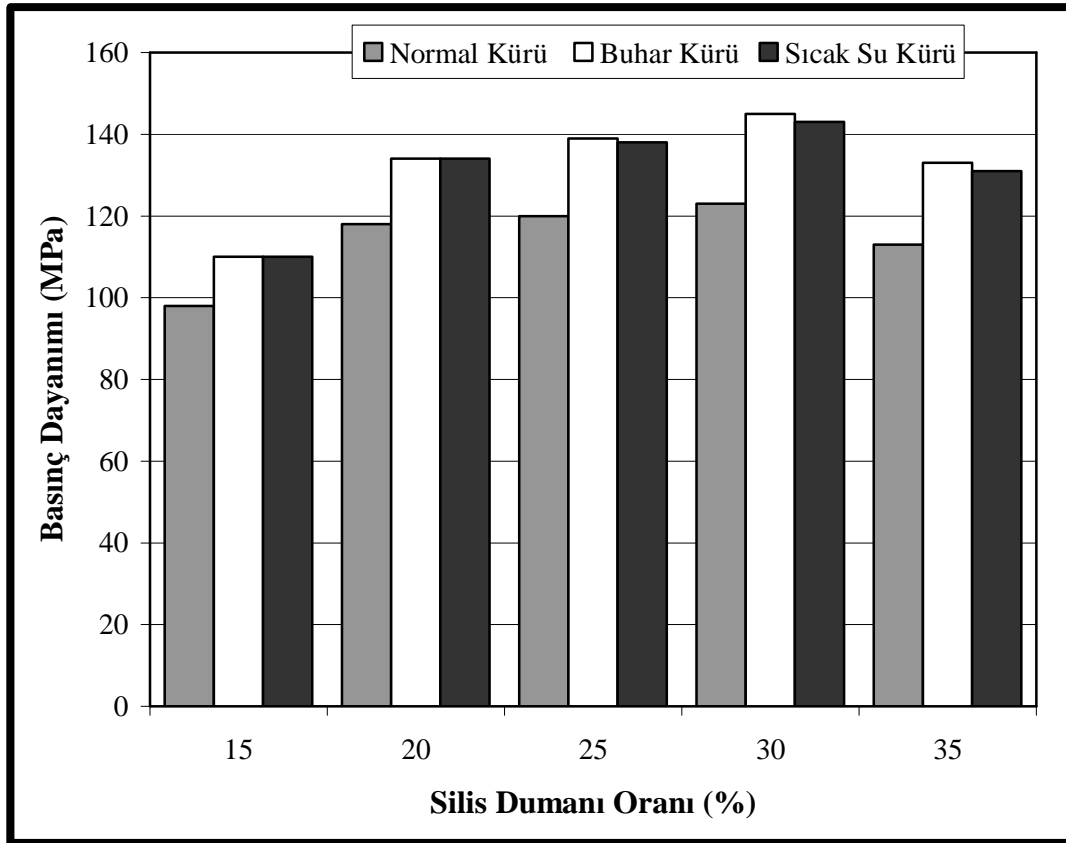


Şekil 4.5. V. Grup karışımın çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği

Kür tiplerinden en düşük dayanımı normal su kürü vermiştir. Diğer sıcak kürler birbirine yakın sonuç vermiş ve buhar kürü uygulanmış numunelerin, normal küre göre II. Grup karışımında ortalama %15, III. Grup karışımında ortalama %18, IV. Grup karışımında ortalama %17 ve V. Grup karışımında ortalama %10 daha fazla basınç dayanımı sahip olduğu görülmüştür. Grafikler incelenerek bütün kür tiplerinde en yüksek basınç dayanımı %40 KP içeren numunelerde 923 kg ile 1006 kg çimento miktarında elde edilmiştir. Aynı zamanda yapılan karışım denemelerinde 900 kg ile 1000 kg arasındaki dayanımın bütün karışım gruplarında yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle çimento miktarının ortalama 900 kg, kuvars pudrasının ise çimento miktarının %40 oranında içeren karışımların en iyi dayanımı verdiği kabul edilmiş ve elde edilen bu sonuçlar ışığında VI. Grup karışım hazırlanmıştır (Tablo 4.3). Bu grupta çimento miktarı 900 kg'da ve kuvars pudrasının da çimento miktarının %40 oranında sabit tutularak, silis dumanı her iki kuvars kumu ile %15'ten başlayarak %20-25-30-35 oranlarında ikameli olarak kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar ile silis dumanı miktarının basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır (Şekil 4.6).

Tablo 4.3. Karışımlara ait malzeme miktarları ve farklı kür tiplerine göre 28 günlük basınç dayanımları

		Malzeme										Basınç Dayanımı (MPa)		
Grup No	Karışım No	Ç (kg)	SD (kg)	KP (kg)	1. K K (kg)	2. KK (kg)	Su (lt)	K. Katkı (lt)	Hava (%)	Toplam (kg)	Su/Bağlayıcı	Su Kürü	Buhar Kürü	Sıcak Su Kürü
VI	21	900 (1)	135 (0,15)	360 (0,40)	340 (0,38)	340 (0,38)	225 (0,25)	27 (0,02)	2	2327	0,22	98	110	110
	22	900 (1)	180 (0,20)	360 (0,40)	300 (0,33)	300 (0,33)	234 (0,26)	27 (0,03)	2	2301	0,22	118	134	134
	23	900 (1)	225 (0,25)	360 (0,40)	274 (0,30)	274 (0,30)	234 (0,26)	27 (0,03)	2	2294	0,21	120	139	138
	24	900 (1)	270 (0,30)	360 (0,40)	258 (0,29)	258 (0,29)	225 (0,25)	27 (0,03)	2	2298	0,19	123	145	143
	25	900 (1)	315 (0,35)	360 (0,40)	220 (0,24)	220 (0,24)	234 (0,26)	27 (0,04)	2	2276	0,19	113	133	131



Şekil 4.6. VI. Grup karışımın silis dumanı miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği

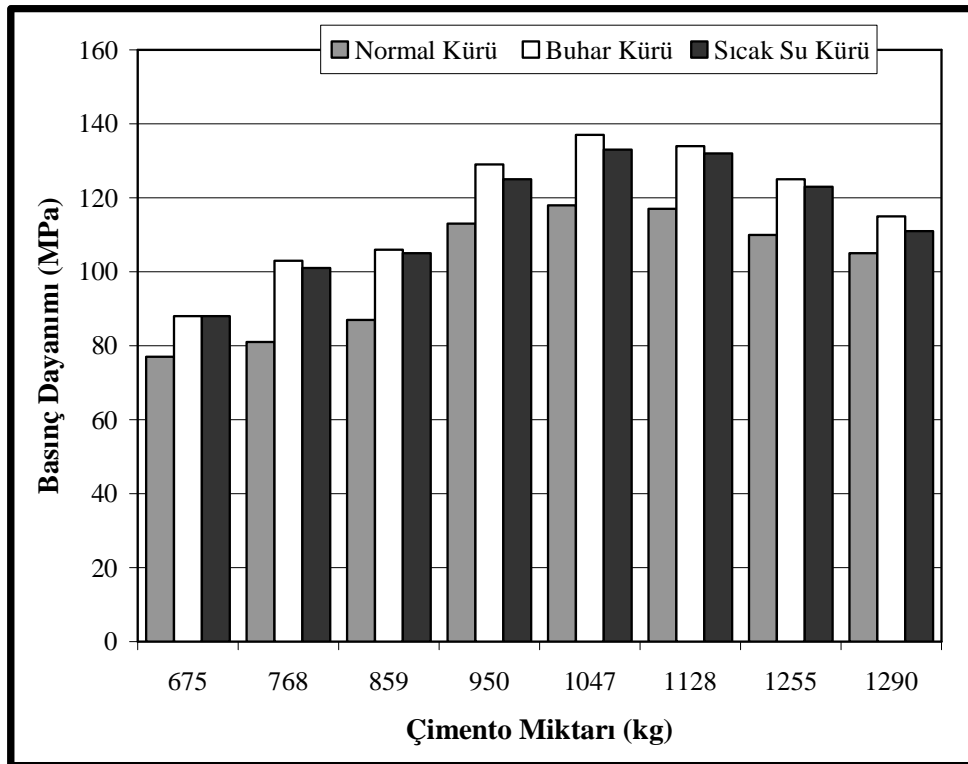
Silis dumanı miktarı, %15'ten %20'ye çıkması ile birlikte basınç dayanımı, su kürü uygulanmış numunelerde %20, buhar kürü uygulanmış ve sıcak su kürü uygulanmış numunelerde %22 artmıştır. Su kürüne oranla, buhar ve sıcak su küründeki artış sıcaklığın puzolanik aktiviteyi arttırmasından dolayı daha fazladır. Silis dumanı miktarı, %20'den %25'e çıkması ile basınç dayanımı; su kürü uygulanmış numunelerde %1,7, buhar kürü ve sıcak su kürü uygulanmış numunelerde %3,7 arttığı tespit edilmiştir. Silis dumanı oranının, %25'den %30'a artması, basınç dayanımını; su kürü uygulanmış numunelerde %2,5, buhar kürü ve sıcak su kürü uygulanmış numunelerde %4,3 arttırdığı görülmüştür. Silis dumanı oranının, %30'dan %35'e yükselmesi ile basınç dayanımı, su kürü uygulanmış numunelerde %8, buhar kürü ve sıcak su kürü uygulanmış numunelerde %9 azalma göstermiştir. SD içeriğinin %30 fazla kullanılması puzolanik aktivite ve boşlukları doldurmak için gerekenden fazla olduğu görülmüştür. SD oranının artması karışımın su ihtiyacını arttıracacağı düşünülse de kuvars kumunun azalması ile bu durum hemen hemen dengelenmiş katkı miktarı %0,5 arttırılarak gerekli işlenebilirlik sağlanmıştır.

Karışımı oluşturan taneli malzemelerin birim hacim ağırlıklarının yüksek bir yapı oluşturacak şekilde oranlanması için farklı karışım teorileri kullanılmıştır. Bunlardan en kolay ve yaygın olanı bilgisayar hazır paket programdır. Program, taneli malzemeleri en yüksek doluluğu (komposite) oluşturacak şekilde karışım oranlarını belirlemekte ve aynı zamanda da oluşan karışımın kompositesini vermektedir. Programın doğruluğunu test etmek için, program tarafından karışım oranları belirlenmiş taneli malzemeler, laboratuvar ortamında belirlenen oranlar kullanılarak hazırlanmış ve daha sonra karışımların kompositesi ölçülmüştür. Programın verdiği komposite değeri ile bulunan gerçek kompositenin birbirine çok yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra uygunluğu doğrulanan program kullanılarak Tablo 4.4'deki VII. Grup karışımlar hazırlanmıştır. Program, karışımları miktar yerine yüzdesel oran olarak verdiği için ve ayrıca su ve katkı oranını dikkate almayıp sadece taneli malzemeleri dikkate alarak karışım yaptığı için programın hazırlanmış olduğu karışımlar üzerinde bir takım düzenlemeler yapılmıştır. İlk olarak taneli malzemelerin ağırlıkları, birim hacim ağırlıklarına bölünerek hacimleri bulunmuştur. Daha sonra çimento miktarından yola çıkarak, su ve akışkanlaştırıcı katkı miktarı literatür ışığında düzenlenmiştir. Karışımı oluşturan tüm malzemelerin hacimleri toplanarak, toplam hacim değeri 1000 dm^3 'ten eksik veya fazla olan miktar bulunmuştur. Toplam hacmin 1000 dm^3 olması için artan veya eksik kalan hacim miktarı malzemelerin çimentoya göre olan hacimsel oranları dikkate alınarak tamamlanmıştır. Hazırlanan karışımlar, laboratuvarda hazırlanarak su ve katkı düzeltilmesi yapılmış ve VII. Grubun 21. karışımı hazırlanmıştır. Daha sonraki karışımlar için çimento, silis dumanı ve kuvars pudrası arasındaki oranlar sabit tutularak çimento miktarı her bir karışım için yaklaşık 100 kg arttırılmış ve her iki kuvars kumu azaltılarak karışım miktarları oluşturulmuştur. Karışımlara ait malzeme miktarları ve üç farklı kür tipi olan, normal, $90 \text{ }^\circ\text{C}$ buhar ve $90 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcak su kürlerine göre 28 günlük basınç dayanımı değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Karışımlara ait malzeme miktarları ve farklı kür tiplerine göre 28 günlük basınç dayanımları

		Malzeme										Basınç Dayanımı (MPa)		
Grup No	Karışım No	Ç (kg)	SD (kg)	KP (kg)	1. KK (kg)	2. KK (kg)	Su (lt)	K. Katkı (lt)	Hava (%)	Toplam (kg)	Su/Bağlayıcı	Su Kürü	Buhar Kürü	Sıcak Su Kürü
VII	26	675 (1)	168 (0,25)	175 (0,26)	336 (0,50)	805 (1,19)	189 (0,28)	17 (0,03)	2	2365	0,22	77	88	88
	27	768 (1)	192 (0,25)	200 (0,26)	239 (0,31)	715 (0,93)	207 (0,27)	19 (0,03)	2	2340	0,22	81	103	101
	28	859 (1)	215 (0,25)	224 (0,26)	195 (0,23)	576 (0,67)	224 (0,26)	21 (0,03)	2	2314	0,21	87	106	105
	29	950 (1)	237 (0,25)	247 (0,26)	144 (0,15)	459 (0,48)	237 (0,25)	24 (0,03)	2	2298	0,2	113	129	125
	30	1047 (1)	262 (0,25)	272 (0,26)	111 (0,11)	310 (0,30)	251 (0,24)	26 (0,03)	2	2279	0,19	118	137	133
	31	1128 (1)	282 (0,25)	293 (0,26)	77 (0,07)	174 (0,15)	260 (0,23)	28 (0,03)	3	2242	0,18	117	134	132
	32	1255 (1)	314 (0,25)	326 (0,26)	5 (0,01)	19 (0,02)	276 (0,22)	30 (0,03)	3	2225	0,18	110	125	123
	33	1290 (1)	323 (0,25)	336 (0,26)	-	-	256 (0,20)	29 (0,02)	4	2232	0,16	105	115	111

VI. Grup karışımların oluşturulması sırasında, su ve katkı miktarı, çimento miktarına bağlı olduğu için çimento miktarının artması ile artmıştır. Su ile katkı miktarının artması kıvamı etkilediği için oranlarda bir takım düzeltmelere gidilerek nihai karışım oranları belirlenmiştir. Su, karışıma giren çimentonun hidrasyonunu sağlamasının yanı sıra diğer malzemelerinde yüzeyini ıslatacak ve işlenebilirliğe katkı sağlayacaktır. Çimento miktarının düşük olduğu karışımda doğal olarak diğer taneli malzemenin miktarı artacaktır bu malzemelerin yüzeylerinin ıslatılması için çimentonun hidrasyonu için gerekli olan sudan çok daha fazla suya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda su/bağlayıcı oranı arttırılmıştır. Çimento miktarının yüksek olduğu karışımlarda ise çimento dışındaki taneli malzeme miktarı azalacağı gibi miktarı çimentoya bağlı olarak düşünülen su da ters olarak artacaktır. Bu durumda da su/bağlayıcı oranı azaltılmıştır. VI. Grubun 28. karışımındaki çimento dozajına göre karışıma kuvars kumu katılamamıştır. Bu karışımın oluşturulmasındaki sebep ise 100 μm altında taneli karışıma sahip betonun dayanımını belirleyebilmektir. VII. Gruba ait karışımların basınç dayanımı Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. VII. Grup karışımının çimento miktarına ve kür tipine göre basınç dayanımı grafiği

VII. Gruptaki karışımların dayanımı incelendiğinde çimento miktarının 1047 kg olduğu seviyeye (30. karışım) kadar basınç dayanımı artmış daha sonra azalmıştır. Çimento miktarının 1047 kg'dan sonra artması karışımın hava miktarının artmasına neden olmuş bu da dayanımı olumsuz etkilemiştir. Karışımların tamamında silis dumanın bulunması, sıcak kür etkisi ile dayanımlarda artış sağlamıştır. Buhar kürü uygulanan numunelerin dayanımı, normal küre göre ortalama %15 daha fazla olmuştur. Sıcak buhar kürü ile sıcak su kürü değerleri arasında ortalama %2 fark vardır. Buhar kürünün, aynı sıcaklıktaki su kürüne göre daha fazla dayanım artışı olması, su buharının numunelere daha iyi nüfuz etmesi ile açıklanabilir. Bilgisayar paket programı sayesinde hazırlanan karışımlar literatürde daha önce denenmiş karışımların basınç dayanımına yakın sonuçlar vermiştir. Bu da programın bir başarısı olarak görülebilir.

Karışım oranlarının belirlenmesine yönelik olarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, VI. Grupta yer alan 24 nolu karışım daha sonra yapılacak olan diğer deneylerde kullanılmak üzere seçilmiştir.

4.2. Lif Oranının Belirlenmesi

4.2.1. Lif oranının basınç numunelerine etkisi

Lif içeriğinin belirlenmesi için, seçilen karışıma hacimce, %2-4-6-8-10 oranlarında olmak üzere 5 farklı mikro lif, karışımı oluşturan malzemeler ile ikameli olarak katılmıştır. Betonun oluşturan tüm malzemeler, kullanılacak lif hacmi oranına göre azaltılarak lif ikamesi yapılmıştır. Tablo 4.5'te lifli karışımları oluşturan malzeme miktarları verilmiştir.

Tablo 4.5. Lifli karışımların 1 m³'deki malzeme miktarları (kg)

Malzeme	Lif Oranı (%)					
	Şahit	2	4	6	8	10
Ç	900	882	864	846	828	810
SD	270	265	259	254	248	243
KP	360	353	346	338	331	324
1.KK	258	253	248	243	237	232
2.KK	258	253	248	243	237	232
Su	225	221	216	212	207	203
K. Katkı	27	27	26	25	25	24
Hava %	2	1,8	1,8	1,9	2	2,1
Çelik Lif	0	144	287	431	575	718
Toplam	2298	2396	2493	2591	2689	2786

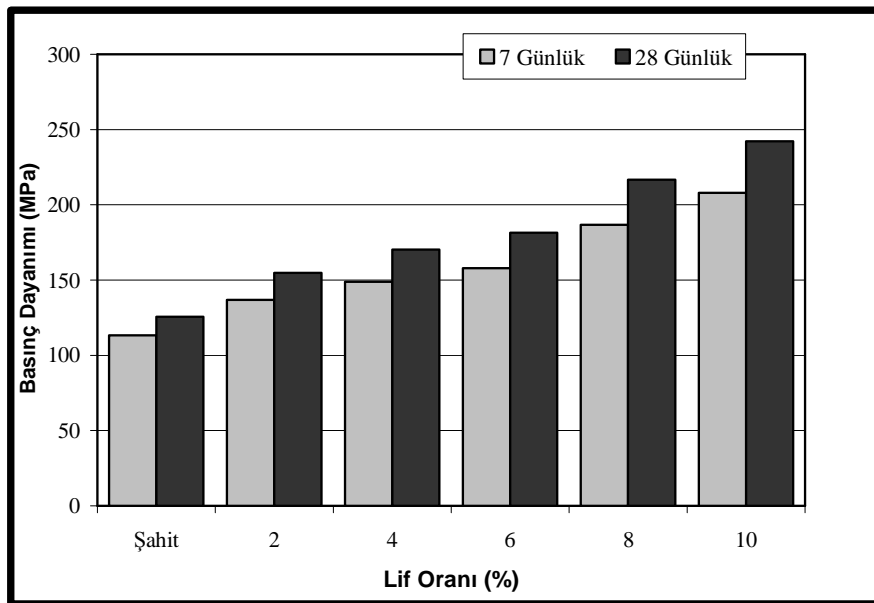
Lif miktarının artması, karıştırma ve yerleştirme işlemini oldukça zorlaştırmıştır. Karışımdaki lif miktarı %6 geçtikten sonra karıştırma ve yerleştirmede ciddi zorluklar yaşanmış, özellikle %10 lif içeren numunelerin üretimi oldukça zor olmuştur.

4.2.1.1. Lif oranının basınç dayanımına etkisi

Karışımlarda kullanılacak lif içeriğinin belirlenmesi için hazırlanan numunelere normal kür uygulanmış ve basınç dayanım sonuçları Tablo 4.6'da verilmiştir. Her bir karışım için 3 adet deney numunesi üretilmiş ve bu 3 numuneyi en iyi şekilde temsil eden grafikler ve ortalama değerler, tablo ve şekillerde verilmiştir. Diğer numunelere ait grafikler Ek C'de verilmiştir. Lif içeriğine göre numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanım grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.6. Lif içeriğine göre numune basınç dayanımları

Lif Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	
	7 günlük	28 günlük
Şahit	113	126
2	137	155
4	149	170
6	158	182
8	187	217
10	208	242



Şekil 4.8. Lif içeriğine göre numune basınç dayanımları

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde lif miktarının artması ile basınç dayanımlarının artış gösterdiği tespit edilmiştir. Kullanılan lifin boyutsal olarak çok küçük olması düşük lif oranlarında bile lif sayısının fazla olmasına neden olmaktadır. Bu da liflerin beton içerisine çok iyi dağılmaları ve betonun her bölgesinde aynı oranda dağılmasına neden olmaktadır. Bu hem betonun toplam homojenliğine hem de basınç dayanımı için olumlu etki yapmaktadır. Betonun her yerine dağılmış mikro lifin hem bir agrega gibi davranması hem de lif ile beton arasında oluşan aderanstan dolayı basınç altında numunede oluşan içsel çekme gerilmelerine karşı koyarak betonun dayanımını arttırdığı görülmüştür.

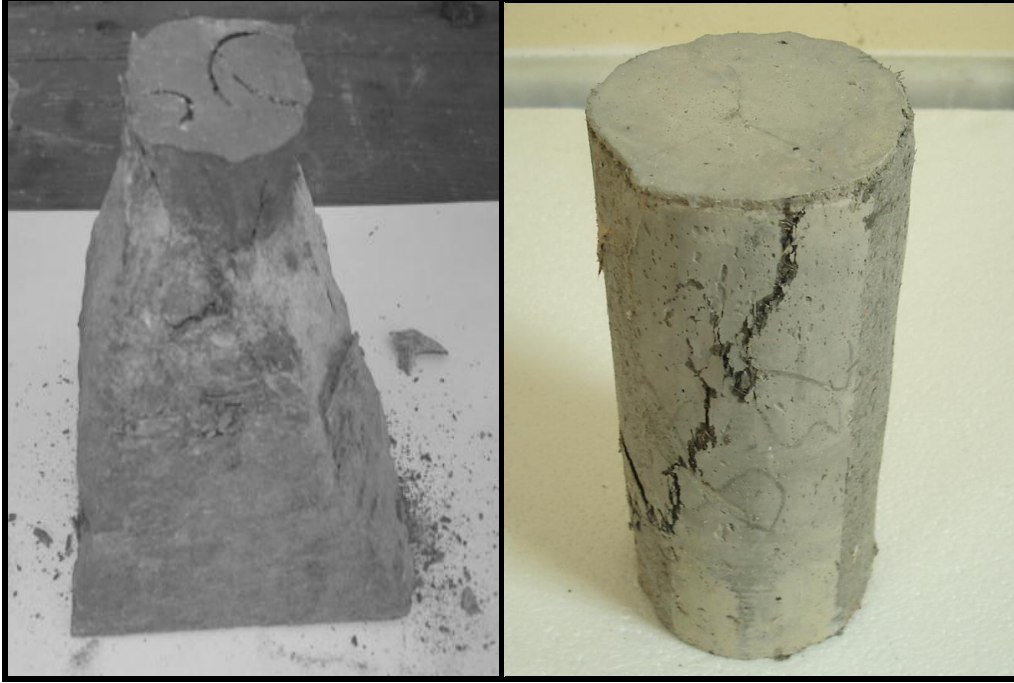
Lif içeriği %2 olan RPB'nin, Şahit numuneye göre 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımının sırasıyla %21 ve %23 daha fazla olduğu görülmüştür. Basınç dayanımındaki bu artış, diğer lifli RPB'ler arasındaki artışa göre en yüksek oranda olmuştur. %4 lif içeren RPB'nin basınç dayanımı, Şahit RPB'ye göre 7 günlük numunede %32 ve 28 günlük numunede %35 arttığı görülmüştür. %6 lif içeren RPB'nin, Şahit RPB'ye göre 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımı sırasıyla %40 ve %45 arttığı tespit edilmiştir. %4 ile %6 lif içeren numuneler arasındaki artış oranının, diğer lifli RPB'ler arasındaki artışa göre en düşük düzeyde kaldığı görülmüştür. %8 lif içeren RPB'nin basınç dayanımı, Şahit RPB göre 7 günlük numunede %66 ve 28 günlük numunede %72 arttığı görülmüştür. %10 lif içeren RPB'nin basınç dayanımı, Şahit RPB göre 7 günlük RPB'de %84, 28 günlük RPB'de %92 arttığı belirlenmiştir.

Basınç dayanımındaki artış, lif miktarının %4'üne kadar daha belirgin olurken %4 ve %6'lık lif miktarlarında dayanımındaki artış miktarı düştüğü ve %8'lik lif miktarından sonra yeniden bir yükselme eğiliminde olduğu görülmüştür.

4.2.1.2. Lif oranının elastisite modülü ve poisson oranına etkisi

Elastisite modülü ve poisson oranlarının belirlenmesi için 100 mm çapında, 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler üretilmiştir. Numunelerin her biri Bölüm 3.2.2.3'de bahsedilen düzenek sayesinde kırılıncaya kadar yüklenmiş ve gerilme-deformasyon grafikleri çizilmiştir. Lifsiz RPB'nin kırılma şekli parçalara ayrılarak gevrek bir

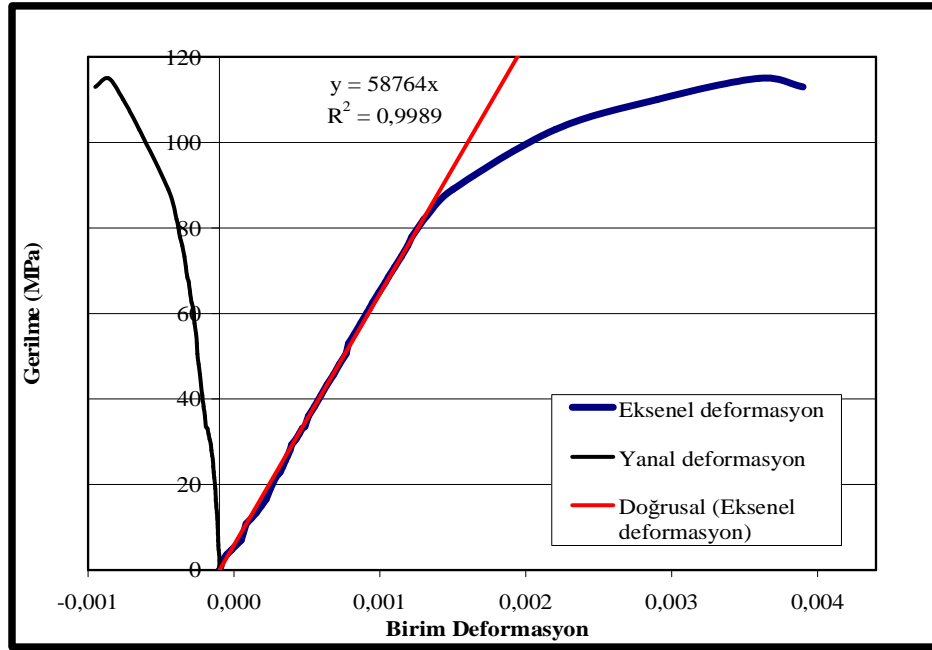
kırılma şeklinde olmuştur (Şekil 4.9). Bu RPB'nin kırılma biçimi, normal betonlar için verilen kırılma biçimlerine benzer olduğu görülmüştür [74].



Şekil 4.9. Şahit ve %2 lif içeren numuneye ait kırılma şekli

Deneyde kullanılan kalıpların yüzey kalitesi ve geometrisi numunenin basınç dayanımını ve kırılma şeklini etkilemektedir. Aynı zamanda sertleşmiş betonun homojenliği ve basınç testinin yapıldığı cihaz da basınç dayanımını ve kırılma şeklini etkilemektedir. Kırılma şeklinin standartta belirtildiği şekilde çıkması, yapılan deneyin doğruluğunun sağlaması olarak da görülebilir. Şahit numuneye ait gerilme-deformasyon grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.

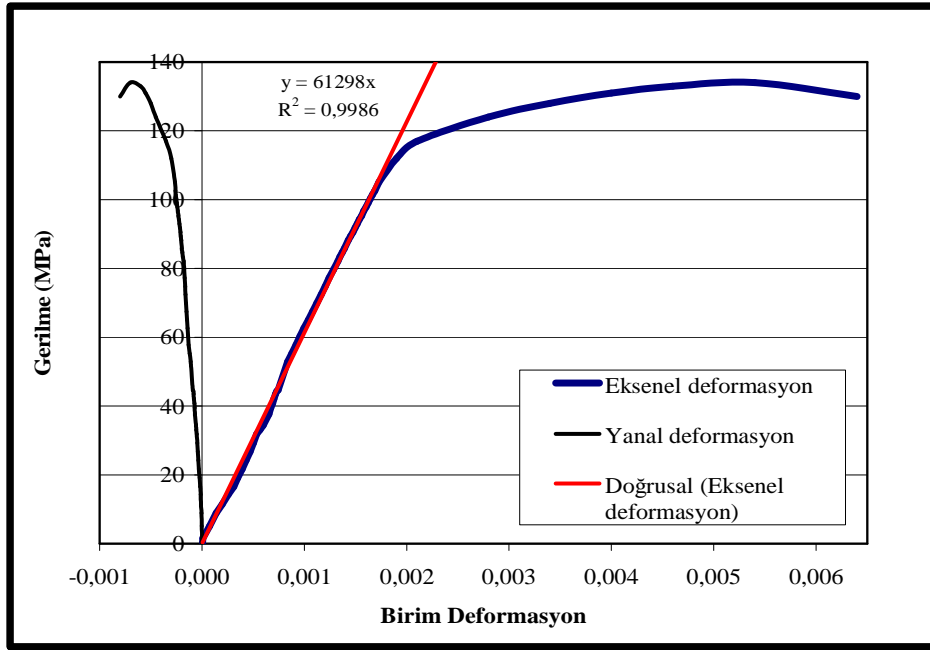
Grafiğin sağ tarafı aksenal (düşey) deformasyonu, sol tarafı ise yanal, yani çapta oluşan deformasyonu göstermektedir. RPB'nin gerilme-deformasyon grafiği, normal betona göre oldukça doğrusaldır. Eğrinin doğrusal kısmı basınç dayanımının yaklaşık %80'nine kadar ulaşmaktadır. Eğrinin doğrusallıktan ayrıldıktan sonra kırılmanın hemen gerçekleşmediği ve yaklaşık olarak doğrusal olarak yapılan deformasyon kadar deformasyon yaparak maksimum basınç dayanımına ulaştığı ve daha sonrada bir miktar yük taşıyarak kırılma gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4.10. Şahit numunenin gerilme-deformasyon grafiği

Şahit numunenin, elastisite modülü sağ tarafta bulunan eğrinin doğrusal olan kısmı dikkate alınarak 58764 MPa bulunmuştur. Her iki eğrinin doğrusal olan kısmı dikkate alınarak yanal deformasyonun, eksenel deformasyona oranlanması ile poisson oranı 0,21 olarak hesaplanmıştır. Lifsiz RPB'nin elastisite modülü normal betonun elastisite modülü göre oldukça yüksektir. Normal betonun elastisite modülü 20000-30000 MPa arasında değişmektedir [94]. Betonda basınç dayanımı arttıkça elastisite modülü de artmaktadır [94]. Bu durumun lifsiz RPB içinde geçerli olduğu görülmektedir.

Lifli RPB'nin kırılma biçimleri, çatlamadan itibaren devam ederek açılan derin yarıkların ortaya çıkması sonucu ile gerçekleşmiştir (Şekil 4.9). Liflerin betonu bir arada tutması sayesinde numunede parçalanma olmamıştır. %2 lif içeren numuneye ait gerilme-deformasyon grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir.



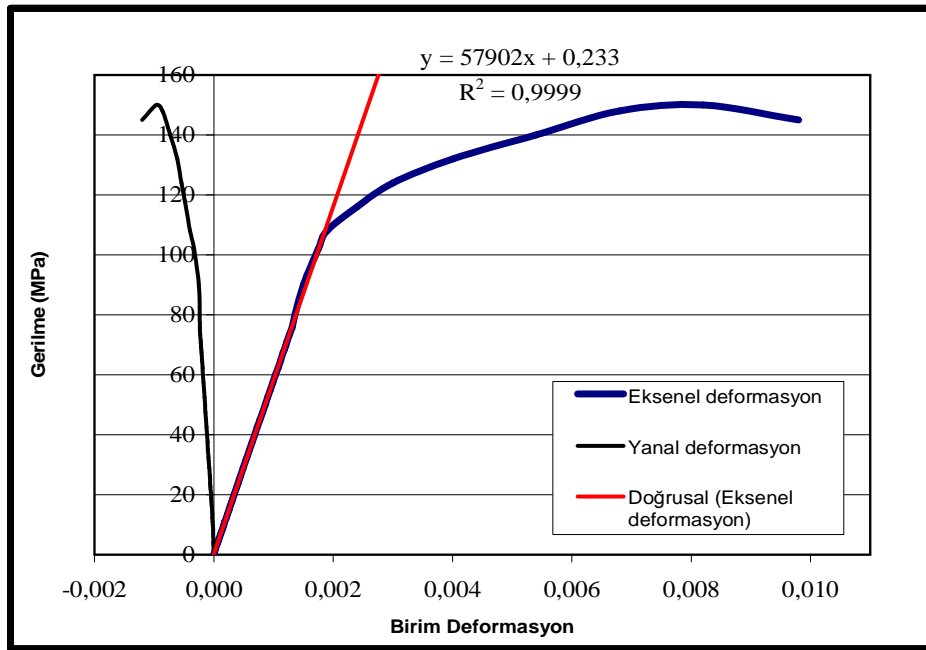
Şekil 4.11. %2 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği

Eğrinin doğrusal kısmı basınç dayanımının yaklaşık %90'nına kadar ulaşmaktadır. Şahit numunede olduğu gibi eğrinin doğrusallıktan ayrıldıktan sonrada deformasyon yaparak maksimum basınç dayanımına ulaşmıştır. Maksimum basınç dayanımından sonra yük taşımaya devam ederek kırılmanın gerçekleştiği görülmektedir. Kırılmanın bu şekilde gerçekleşmesi, betonun basınç altında yuttuğu enerji miktarının artmasına neden olmuştur.

Lif içeriği %2 olan RPB'nin, elastisite modülü sağ tarafta bulunan eğrinin doğrusal olan kısmı dikkate alınarak 61298 MPa ve poisson oranı 0,21 olarak bulunmuştur. Şahit RPB ile %2 lif içeren RPB'lerin basınç dayanımında oluşan artış (%23) elastisite modülüne yansımaları çok daha düşük düzeyde kalmıştır. Bu iki numune arasındaki elastisite modülü artışı %4,3 olarak hesaplanmıştır. Elastisite modülündeki artış oranının düşük olması, liflerin sadece basınç dayanımını arttırmadığı aynı zamanda deformasyondaki artıştan dolayı sünekliliği de arttırmamasından kaynaklanmaktadır. Sünekliliğin artması, elastisite modülünü bir miktar düşüreceği için elastisite modülündeki artış oranı düşük olmuştur. Bu değer Şahit numune ile aynıdır. %2 lif içeren RPB'nin, Şahit RPB'ye göre eksenel

deformasyonunda oluşan değişiklik yanal deformasyona da aynı oranda olduğu için poisson oranında bir değişim olmamıştır.

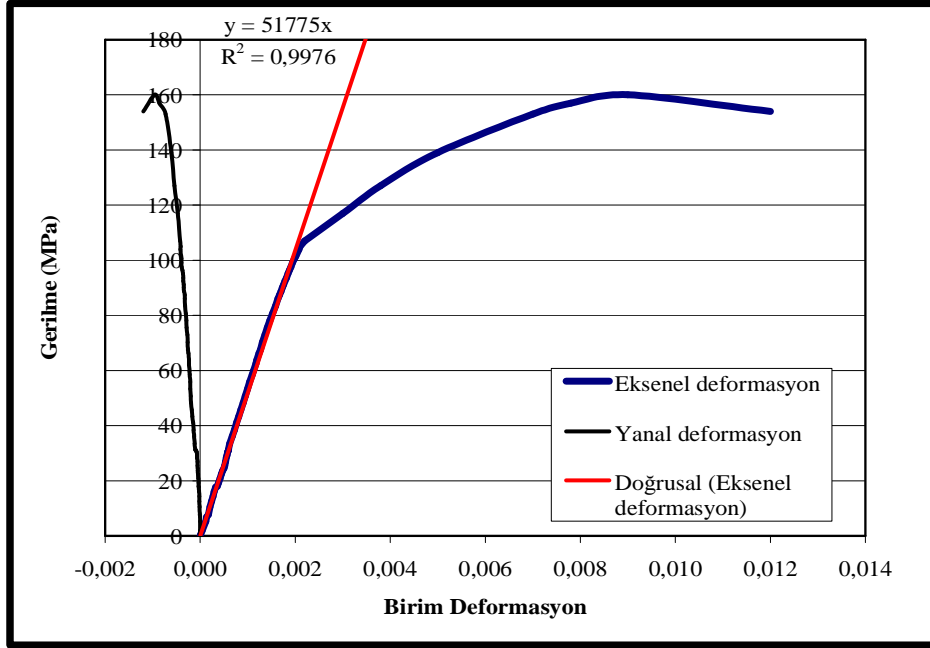
Lif içeriği %4 olan RPB'ye ait gerilme-deformasyon grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir. Eğrinin doğrusal kısmı basınç dayanımının yaklaşık %87'sine kadar ulaşmaktadır. Eğrinin doğrusallıktan ayrıldıktan sonra ki durumu bir önceki numune ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.12. %4 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği

Lif içeriği %4 olan RPB'nin, elastisite modülü sağ tarafta bulunan eğrinin doğrusal olan kısmı dikkate alınarak 57902 MPa ve poisson oranı 0,21 olarak bulunmuştur. Lif içeriği %4 olan RPB'nin elastisite modülü, %2 olana göre %6 daha az olmuştur. Lif içeriği %4 olan numune ile Şahit numune karşılaştırıldığında ise elastisite modülü değeri yaklaşık aynı çıkmıştır. Lif içeriği %2'den %4'e çıkarıldığında basınç dayanımındaki artış %10 olurken, elastisite modülünü bu artışın etkisi ters oranda yansımıştır. Bu durum, liflerin sünekliliğe katkısının, basınç dayanımından daha fazla olması ile açıklanabilir.

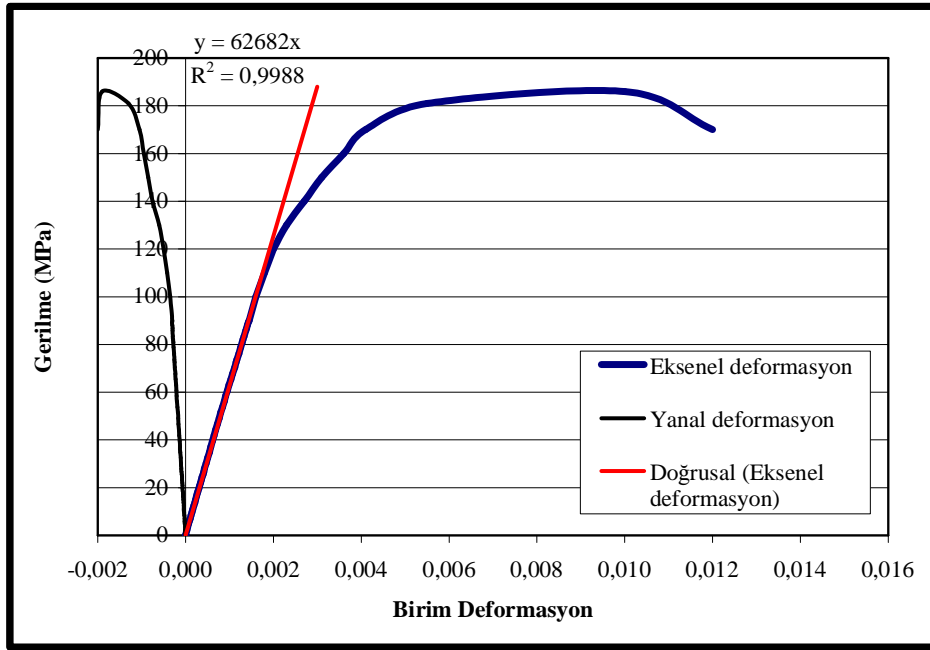
Lif içeriği %6 olan RPB'ye ait gerilme-deformasyon grafiği Şekil 4.13'de verilmiştir. Eğrinin doğrusal kısmı basınç dayanımının yaklaşık %65'ine kadar ulaşmaktadır. Eğrinin doğrusallıktan ayrıldıktan sonra ki deformasyonu lif miktarına bağlı olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 4.13. %6 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği

Lif içeriği %6 olan RPB'nin, elastisite modülü 51775 MPa ve poisson oranı 0,21 olarak bulunmuştur. Lif içeriği %6 olan RPB'nin elastisite modülü, %4 olana göre %11,83 daha az olmuştur. Lif içeriği %6 olan RPB ile Şahit RPB karşılaştırıldığında ise elastisite modülü değeri %13 azalmıştır. Lif içeriği %4'den %6'ya çıkarıldığında basınç dayanımındaki artış %7 olmuştur. Liflerin basınç dayanımına katkısının, sünekliliğe katkısından çok daha azdır. Bu da elastisite modülünün düşmesine sebep olmuştur.

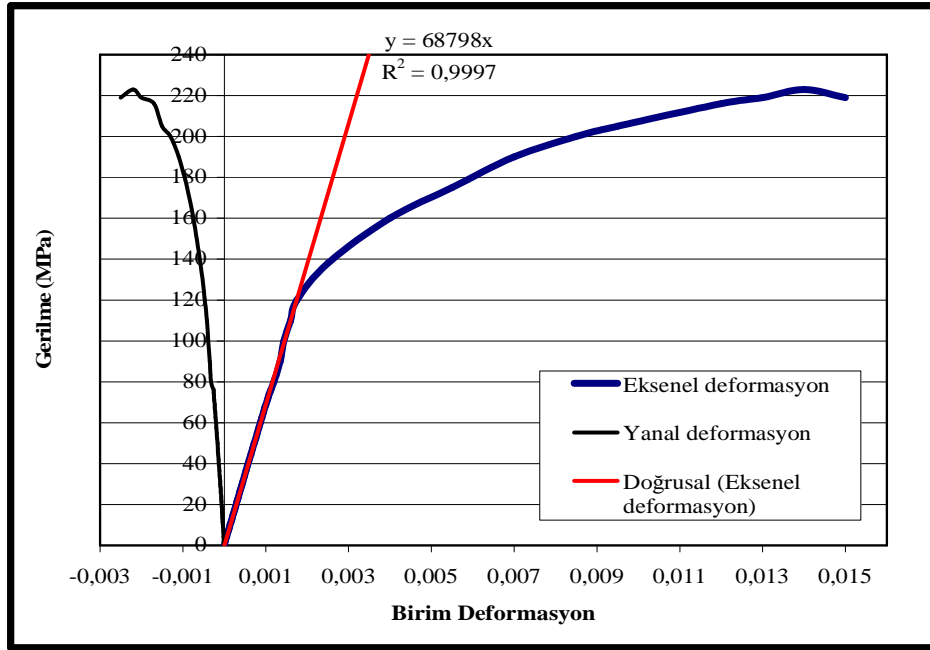
Lif içeriği %8 olan RPB'ye ait gerilme-deformasyon grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir. Eğrinin doğrusal kısmı basınç dayanımının yaklaşık %66'sına kadar ulaşmaktadır.



Şekil 4.14. %8 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği

Lif içeriği %8 olan RPB'nin elastisite modülü 62682 MPa ve poisson oranı 0,21 olarak bulunmuştur. Lif içeriği %6'dan %8'e çıkarıldığında elastisite modülündeki artış %21 olmuştur. Lif içeriği %8 olan RPB ile Şahit RPB karşılaştırıldığında ise elastisite modülü değeri %6,7 artmıştır. Lif içeriği %6'ya göre %8 olan numunelerin basınç dayanımı %19 daha fazladır. Basınç dayanımdaki artışın fazla olması elastisite modülünün de yüksek oranda artmasına sebep olmuştur.

Lif içeriği %10 olan RPB'ye ait gerilme-deformasyon grafiği Şekil 4.15'de verilmiştir. Eğrinin doğrusal kısmı basınç dayanımının yaklaşık %55'ne kadar ulaşmaktadır. Eğrinin doğrusallıktan ayrılmasından sonraki kırılma anına kadarki deformasyonu, doğrusal olarak yaptığı deformasyondan çok daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle betonun basınç altında yuttuğu enerjinin miktarı, %10 lif içeren numunede diğer numunelere göre çok da fazla olduğu ortaya çıkmıştır.



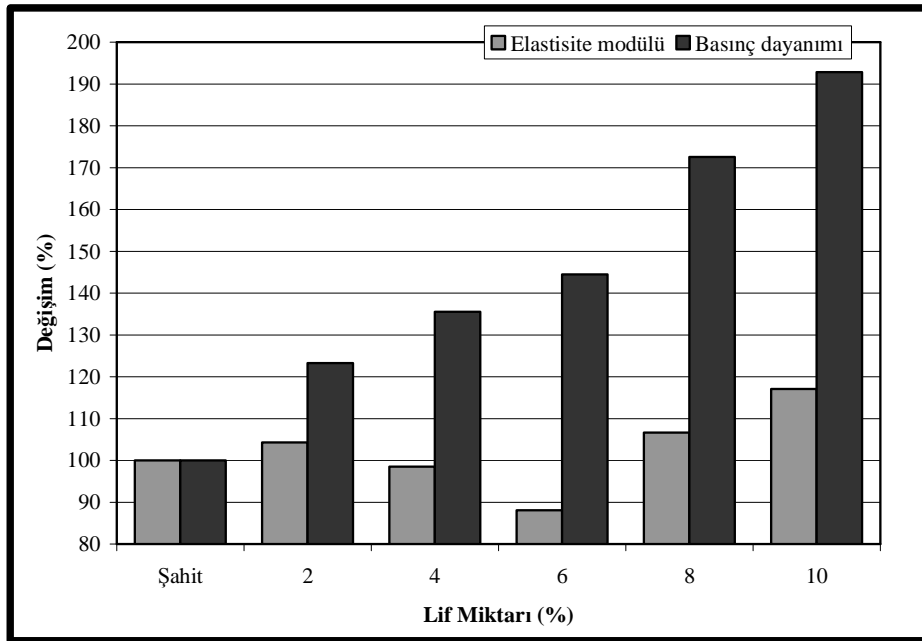
Şekil 4.15. %10 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafiği

Lif içeriği %10 olan RPB'nin, elastisite modülü 68798 MPa ve poisson oranı diğer numuneler gibi 0,21 olarak bulunmuştur. Lif içeriği %8'den %10'a çıktığında elastisite modülündeki artış %9,7 olmuştur. Lif içeriği %10 olan RPB'nin elastisite modülü Şahit RPB'ye göre %9,8 artmıştır. Basınç dayanımında ise lif içeriği %10 olan RPB, %8 lif içerikli RPB'ye göre %12 daha fazladır. Basınç dayanımı artışı bir miktar elastisite modülünü de arttırdığı görülmüştür.

Lif içeriğine göre elastisite modülü değerleri toplu olarak Tablo 4.7'de verilmiştir. Lif içeriğinin basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerine etkisi ile basınç dayanımdaki artışın elastisite modülünü nasıl etkilediğinin daha iyi anlaşılması için lif miktarına göre değişim %'si Şekil 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.7. Lif içeriğine göre elastisite modülü değerleri

Lif Miktarı (%)	Elastisite Modülü (MPa)
Şahit	58764
2	61298
4	57902
6	51775
8	62682
10	68798



Şekil 4.16. Lif içeriğinin elastisite modülü ve basınç dayanımına etkisi

Bu grafik incelendiğinde basınç dayanımlarında, bir önceki lif hacmine göre yaklaşık %10'nun üzerinde bir artış gerçekleştiğinde, elastisite modüllerinde ancak artış olmakta, aksi halde bu değer altındaki artışlar elastisite modülünü azaltmaktadır.

Normal betonlarda basınç dayanımı arttıkça buna bağlı olarak elastisite modülü de artmaktadır. RPB'de lif miktarının artması, basınç dayanımının yanı sıra sünekliliğin de artmasına neden olmaktadır. Bu durum lif boyunun (6 mm) çok kısa olması, liflerin beton içerisinde agrega gibi davranması ile açıklanabilir. Bu deney sonuçları

da bu sonucu destekleyici niteliktedir. Basınç dayanımındaki artış oranı fazla olduğu durumlarda elastisite modülünün arttığı, artış oranının azaldığı durumda da elastisite modülü azaldığı görülmüştür.

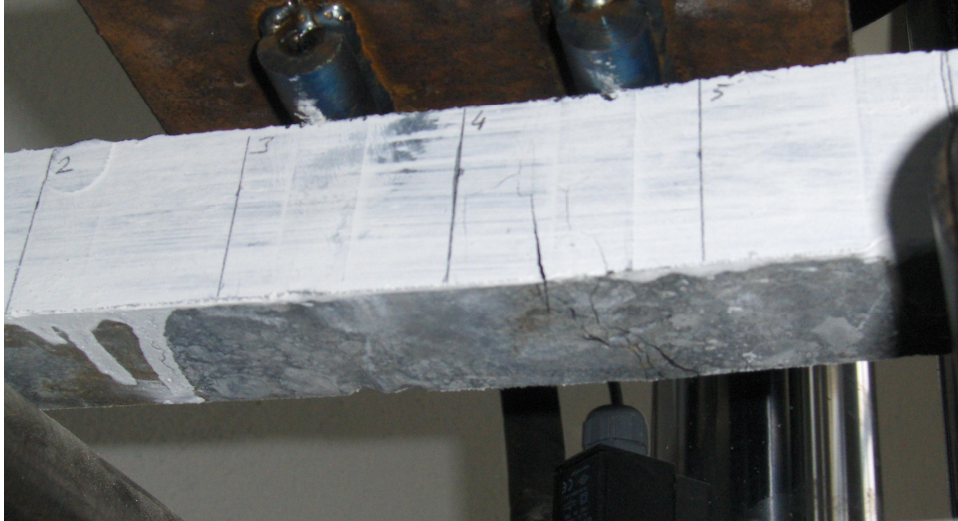
Lif içeriğine bağlı olarak poisson oranlarında anlamlı bir değişim olmamıştır. Poisson oranı değeri (0,21), normal betonların değeri ile yaklaşık olarak aynı çıkmıştır.

Deney sonuçlarının sadece %4 lif miktarına kadarki kısım literatürde mevcut olduğu için bu kısım karşılaştırılmıştır. Literatürde RPB'nin elastisite modülü yaklaşık olarak 50-60 GPa arasında değişmektedir [5, 18, 19, 27]. Bu değer deney sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

4.2.2. Lif oranının eğilme numunelerine etkisi

Daha önce belirlenmiş olan 24 numaralı karışımda hacimce, %2-4-6-8-10 oranlarında olmak üzere 5 farklı oranda mikro lif ikameli olarak kullanılmıştır. Numunelere, mikro boyutta katılan çelik lifin, ilk çatlak ve eğilme dayanımı, kırılma tokluğu ve kırılma enerjisine etkileri araştırılmıştır. Her bir karışım için 3 adet deney numunesi üretilmiş ve bu 3 numuneyi en iyi şekilde temsil eden grafikler ve ortalama değerler, tablo ve şekillerde verilmiştir. Diğer numunelere ait grafikler Ek C'de verilmiştir.

Kiriş numuneleri, 50x50x300 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Eğilme deneyi, numuneler kırılıncaya kadar devam ettirilmiş ve yük-sehim eğrileri çizilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Eğilme deneyi sonucu kırılmış numune

Liflerin betondaki etkisini daha iyi anlaşılabilmesi için TSE standardında elastik şekil değiştirme indeksleri kullanılmaktadır. Bu indeksler Bölüm 3.2.2.4'te verilen örnek yük-sehim eğrisi grafiğinde (bkz. Şekil 3.20) gösterilen alanlar yardımıyla hesaplanmıştır. Elastik şekil değiştirme indekslerinin sonuçlarının değerlendirilmesi için TS 10515'de verilen değerler Tablo 4.8'de gösterilmiştir [80].

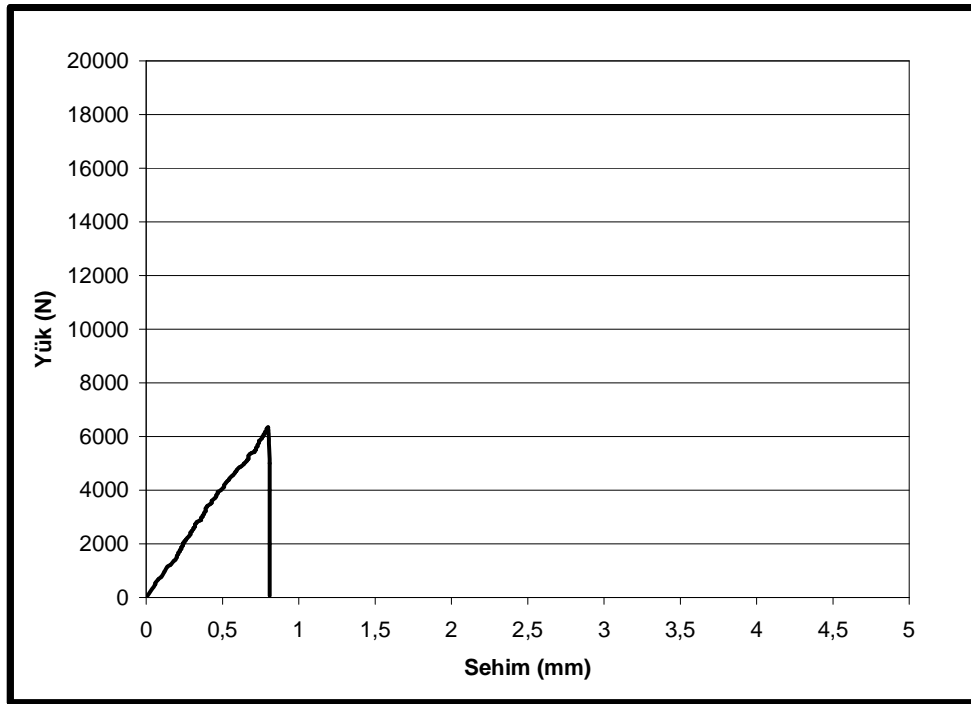
Tablo 4.8. Elastik şekil değiştirme indeks değerleri [80].

Baz Alan	İndeks	Eğilme Kriteri	Düz Beton	Elastik-Plastik Malzeme	Telli Beton İçin Aralık
OACD	I ₅	3	1	5	1-6
OAEF	I ₁₀	5,5	1	10	1-12
OAGH	I ₂₀	10,5	1	20	1-25

Deney sonuçları bu değerler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen yük-sehim eğrileri kullanılan lif oranı artışına göre verilmiştir. İlk olarak lifsiz olarak üretilen Şahit numunenin kırılma şekli ve yük sehim eğrileri Şekil 4.18, 19'da verilmiştir.



Şekil 4.18. Eğilme deneyi sonucu kırılmış Şahit (lifsiz) numune

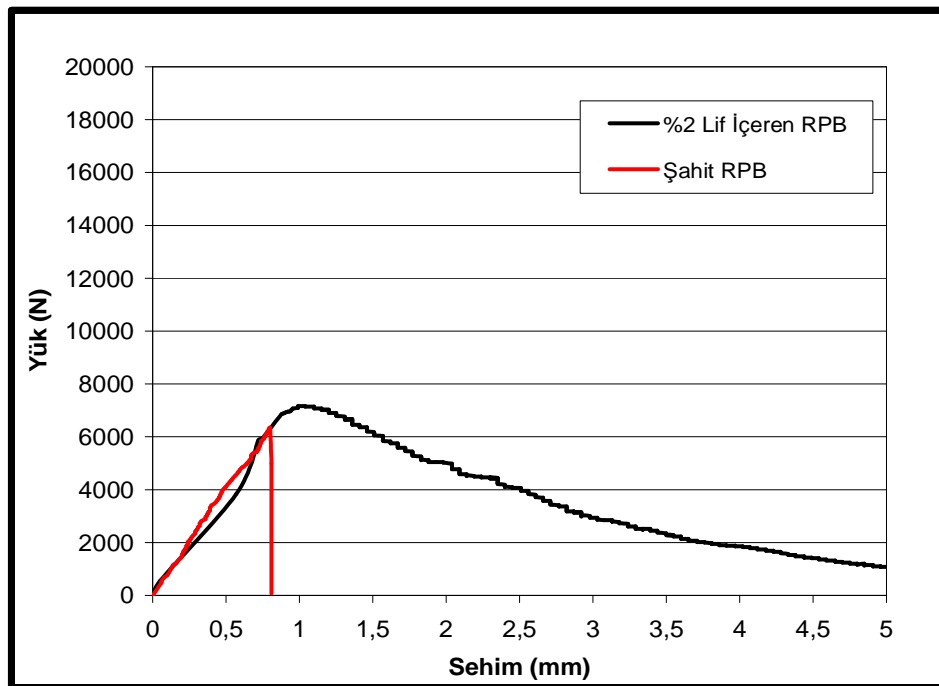


Şekil 4.19. Şahit lifsiz numunenin yük sehim eğrisi

Lifsiz olarak üretilen Şahit numunenin maksimum kırılma yükü 6340 N, maksimum deformasyonu 0,81 mm'dir. Lifsiz numunelerde, normal betonlarda olduğu gibi, çatlak oluşumu ile kırılma ani olmaktadır. Bu da, kırılma tokluğu değerini dikkate alarak eğilme dayanımı hesaplayan Japon standardına göre dayanım değerinin çok düşük çıkmasına sebep olmaktadır.

Şahit numunenin ilk çatlak dayanımı ve eğilme dayanımı 12,68 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 0,54 MPa olarak hesaplanmıştır. Normal betonların eğilme dayanımı, basınç dayanımının yaklaşık 1/10'nu kadardır. Bu durum, RPB içinde benzerlik göstermektedir. Kırılma tokluğu 1,36 Nm ve kırılma enerjisi 552,57 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Çatlak oluşumu ile kırılmanın aynı anda olması nedeniyle ilk çatlak dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri birbirine eşittir. Numunenin çatlaktan sonraki dayanımını değerlendirmede kullanılan indeksler, çatlaktan sonra numunenin aynı anda kırılmasından dolayı bir (1) değerini almıştır. Buna bağlı olarak da kalıcı dayanım faktörleri de sıfır değerini almıştır.

Lif içeren numunelerin kırılma şekli, lifsiz numune gibi parçalara ayrılma şeklinde olmamıştır (bkz Ek C, Şekil C.1). Bütün numunelerde çatlak başlangıcı ve kırılma kiriş orta bölgesine yakın olmuştur. Şahit ve lif içeren numunelerin eğilme deneyi sonucu kırılma şekilleri ekte verilmiştir. Lif içeriği %2 olan numuneye ait yük-sehim grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20. % 2 lif içeren numunenin yük sehim eğrisi

Lif içeriği %2 olan RPB'nin ilk çatlak yükü 6870 N, çatlağın oluştuğu sehim 0,88 mm'dir. Maksimum yük 7160 N ve maksimum sehim miktarı 8,35 mm'dir. Lifsiz

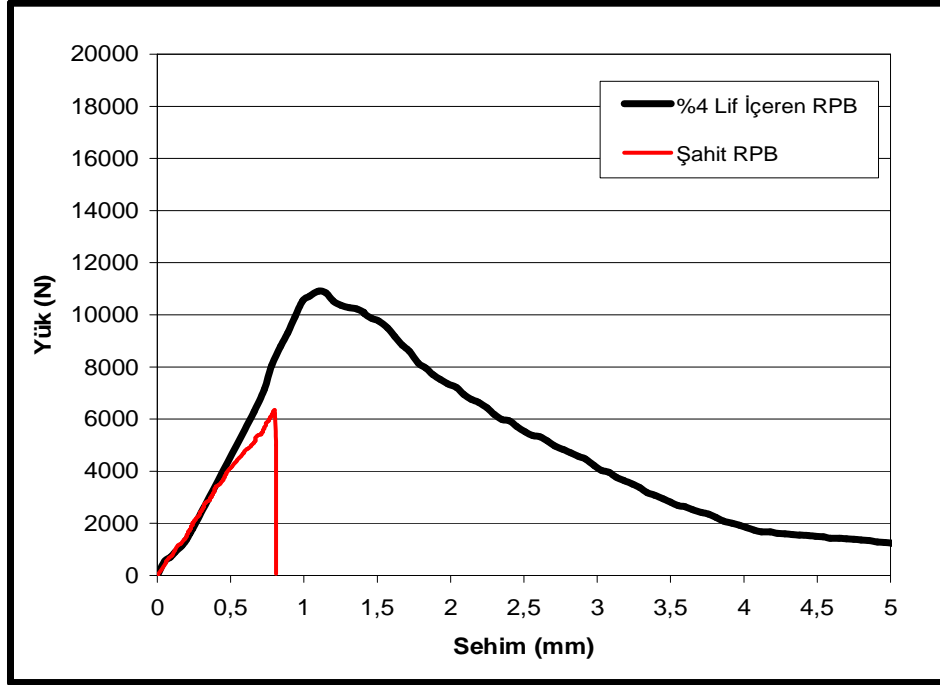
numuneye göre maksimum yük değerinde yaklaşık %13'lük bir artış olurken kırılma ani olmamış ve çatlak sehim değeri lifsiz numuneye göre %90 artış göstermiştir.

Numunenin ilk çatlak dayanımı 13,74 MPa, eğilme dayanımı 14,32 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 6,48 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 16,19 Nm ve kırılma enerjisi 6367,76 joule/m² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Şahit numune ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımı %8, eğilme dayanımı %13 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise 12 kat arttırmıştır. Eşdeğer eğilme dayanımının, Şahit numuneye göre çok fazla artmasının nedeni, dayanım hesaplamasında Japon standardının kırılma tokluğu değerini de dikkate almasıdır. Lifli numunede, yük sehim eğrisinin tepe yükünü aşmasından sonra da yük taşımaya devam etmekte ve çatlak ağzı açılarak kırılma gerçekleşmektedir. Lifsiz numunede ise çatlağın başladığı yük ile kırılma yükü aynıdır. Bu nedenle eğri altında kalan alan, lifli numuneye göre oldukça küçük değer almaktadır.

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla $I_5=5,60$, $I_{10}=8,56$ ve $I_{20}=10,20$ değerlerini almışlardır. Bu değerler, Tablo 4.8'e göre değerlendirildiğinde %2 lif içeren numune lifli betonlar sınıfına girmektedir. Standartta, indeks değerlerinin 5, 10 ve 20 olması durumunda elastik plastik malzeme olarak değerlendirme yapıldığı göz önüne alınırsa bu numunenin I_5 ve I_{10} değerleri 5 ve 10 değerine yakındır. Bu da beton gibi gevrek bir malzemenin lifler sayesinde daha elastik davranış gösterebileceğinin bir göstergesidir.

Lif içeriği %4 olan numuneye ait yük sehim grafiği Şekil 4.21'de verilmiştir. Lif miktarının %4'e çıkması ile birlikte, ilk çatlak yükü 10530 N, çatlağın oluştuğu sehim 0,99 mm olmuştur. Maksimum yük ise 10910 N, son sehim 5,38 mm olmuştur. Lifsiz ve %2 lif içeren numuneye göre ilk çatlağın oluştuğu yük ve maksimum yük belirgin şekilde artış göstermiştir. Lif içeriği %4 olan RPB'nin, ilk çatlak dayanımı 21,06 MPa, eğilme dayanımı 21,92 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 9,72 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 24,31 Nm ve kırılma enerjisi 9555,36 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Şahit numune ile kıyaslandığında ilk çatlak dayanımı %66, eğilme dayanımı %73 ve eşdeğer eğilme

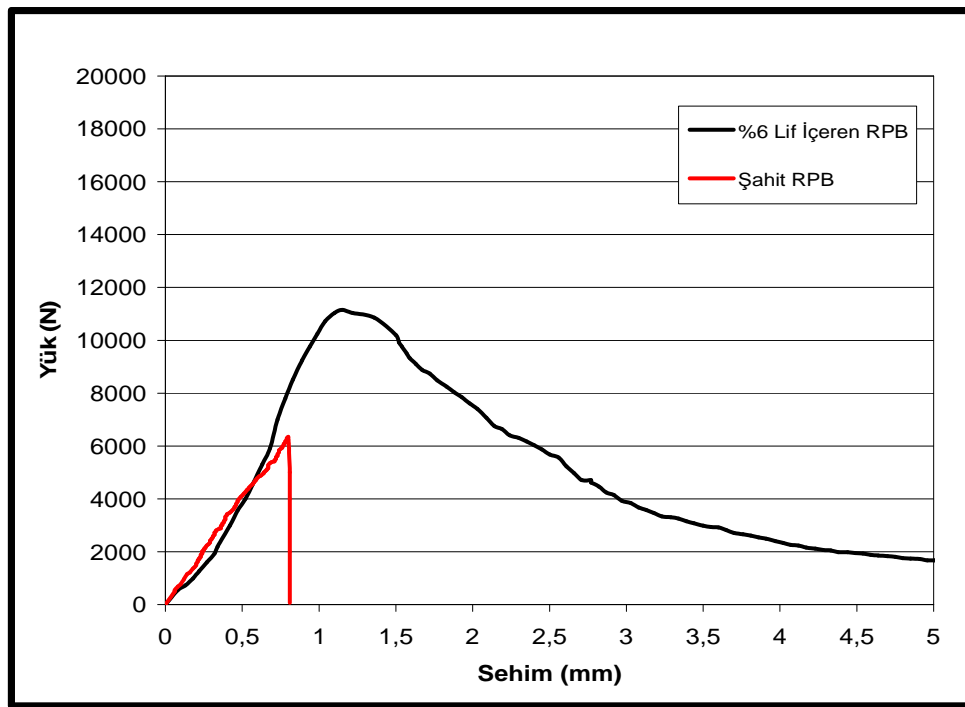
dayanımı ise yaklaşık 18 kat artmıştır. Kırılma tokluğu ve enerjisi değerleri, Şahit numuneye göre ise yaklaşık 17 kat arttığı görülmüştür.



Şekil 4.21. %4 lif içeren numunenin yük sehim eğrisi

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı incelemek için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla $I_5= 4,20$, $I_{10}= 5,25$ ve $I_{20}= 5,25$ değerlerini almışlardır. Bu değerler, %2 lif içeren numuneye göre daha düşüktür. %2 lif içeren numunede ilk çatlağın oluştuğu sehim 0,72 mm olurken, %4 lif içeren numunede ilk çatlağın oluştuğu sehim 0,99 mm olmuştur. İndis değerleri, çatlağın oluştuğu yere kadar olan yük-sehim eğrisinin altındaki alan, çatlak sehim değerinin sırasıyla 3, 5,5 ve 10,5 katları ile çarpılarak bulunan sehim değerlerine kadar olan yük-sehim eğrisinin altında kalan alana oranları ile hesaplanmaktadır. Bu nedenle ilk çatlağın oluştuğu sehim değeri bu indeksler için önemlidir. %4 lif içeren numunede ilk çatlağın oluştuğu sehim miktarının bir önceki lif miktarına göre fazla olması indeks değerlerinin bu lif içeriğine göre daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Bu değerler standarda göre değerlendirildiğinde lifli beton sınıfına girmektedir.

Lif içeriği %6 olan numuneye ait yük sehım grafiği Şekil 4.22’de verilmiştir. Lif içeriği %6 olan numunenin, ilk çatlak yükü 10720 N, çatlağın oluştuğu sehım 1,04 mm’dir. Maksimum yük ise 11190 N, son sehım 6,63 mm olmuştur. Buna göre maksimum yük, Şahit numuneye göre %76 artmıştır. Numunenin ilk çatlak dayanımı 21,44 MPa, eğilme dayanımı 22,38 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 9,87 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 22,61 Nm ve kırılma enerjisi 9661,79 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Şahit numune ile kıyaslandığında ilk çatlak dayanımı yaklaşık %69, eğilme dayanımı yaklaşık %76 ve eşdeğer eğilme dayanımı yaklaşık 18 kat artmıştır. Kırılma tokluğu ve enerjisi değerleri, %4 lif içeren numune ile karşılaştırıldığında kayda değer bir artış (%1) olmadığı tespit edilmiştir.

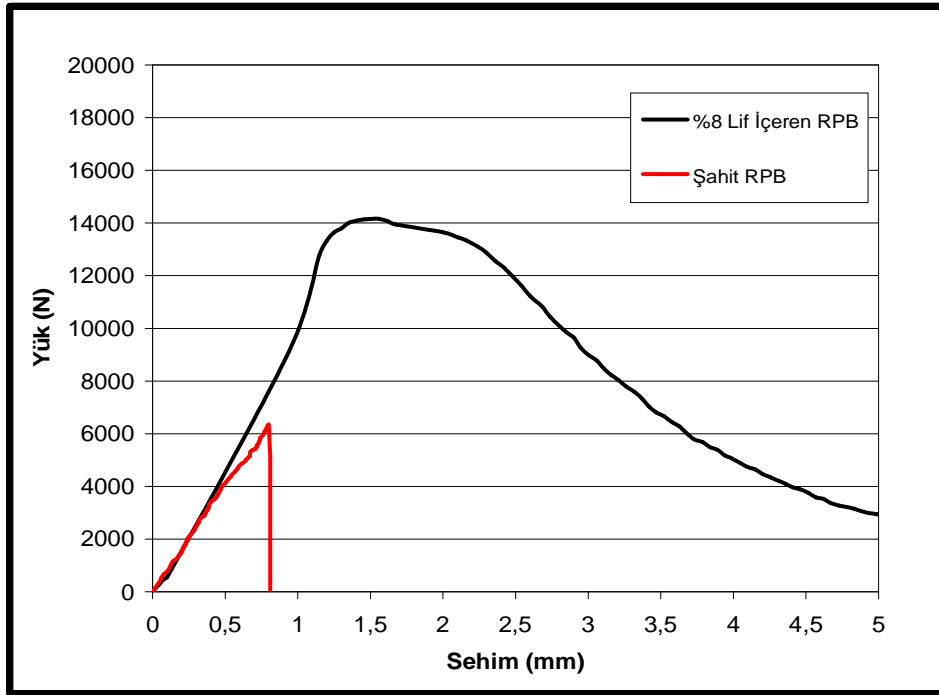


Şekil 4.22. %6 lif içeren numunenin yük sehım eğrisi

İndeks sonuçları sırasıyla $I_5= 4,37$, $I_{10}= 5,61$ ve $I_{20}= 5,85$ değerlerini almışlardır. Bu değerler, %4 lif içeren numune ile hemen hemen aynıdır. %4 lif içeren numunede ilk çatlağın oluştuğu sehım (0,99 mm) ile %6 lif içeren numunede ilk çatlağın oluştuğu sehımlerin (1,04 mm) birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu iki

numunenin aynı zamanda yük-sehim eğrilerinin de birbirine benzer oldukları görülmüştür.

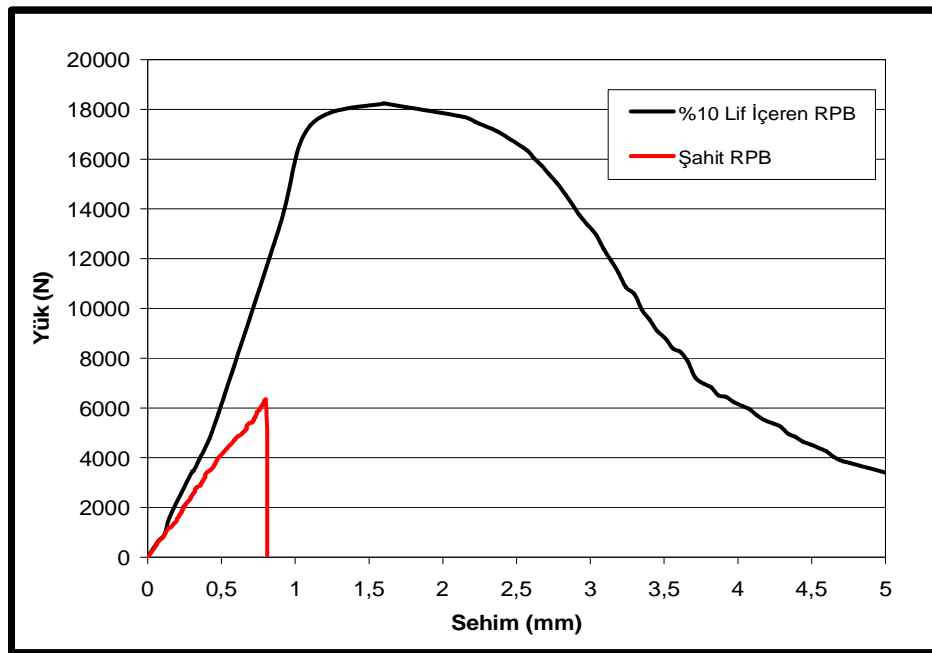
Lif içeriği %8 olan numuneye ait yük sehim grafiği Şekil 4.23'de verilmiştir. Lif içeriği %8 olan numunenin, ilk çatlak yükü 13650 N, çatlakın oluştuğu sehim 1,25 mm'dir. Maksimum yük ise 14190 N, son sehim 5,09 mm olmuştur. Buna göre maksimum yük, Şahit numuneye göre %115 artmıştır. Numunenin ilk çatlak dayanımı 27,30 MPa, eğilme dayanımı 28,38 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 12,98 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 32,46 Nm ve kırılma enerjisi 12751,59 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Şahit numune ile kıyaslandığında ise ilk çatlak dayanımı %115, eğilme dayanımı %124 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise yaklaşık 24 kat artmıştır. Kırılma tokluğu ve enerjisi değerleri, Şahit numuneye göre ise yaklaşık 24 kat artmıştır.



Şekil 4.23. %8 lif içeren numunenin yük sehim eğrisi

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla $I_5=4,23$, $I_{10}=4,63$ ve $I_{20}=4,63$ değerlerini almışlardır. Bu değerler, %4 ve %6 lif içeren numune ile yaklaşık aynıdır.

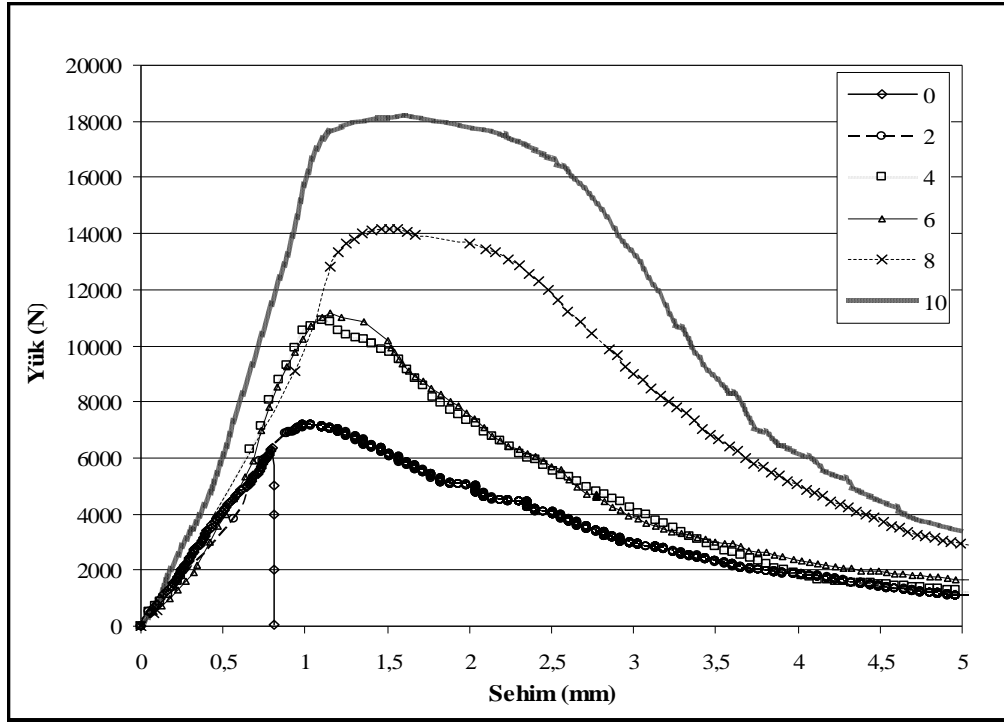
Lif içeriği %10 olan numuneye ait yük sehım grafiği Şekil 4.26'da verilmiştir. Lif içeriği %10 olan numunenin, ilk çatlak yükü 17350 N, çatlakın oluştuğu sehım 1,10 mm'dir. Maksimum yük ise 18290 N, son sehım 5 mm olmuştur. Buna göre maksimum yük, Şahit numuneye göre %188 artmıştır. Numunenin ilk çatlak dayanımı 34,70 MPa, eğilme dayanımı 36,58 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 14,56 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 36,41 Nm ve kırılma enerjisi 14301,07 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Şahit numune ile kıyaslandığında ilk çatlak dayanımı yaklaşık %174, eğilme dayanımı yaklaşık %188 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise yaklaşık 27 kat artmıştır. Kırılma tokluğu ve enerjisi değerleri, %8 lif içeren numune ile karşılaştırıldığında %12, Şahit numuneye göre ise yaklaşık 27 kat artmıştır.



Şekil 4.24. %10 lif içeren numunenin yük sehım eğrisi

Numunenin çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks sonuçları sırasıyla $I_5=4,24$, $I_{10}=4,53$ ve $I_{20}=4,53$ değerlerini almışlardır. Bu değerler, %4, 6, 8 lif içeren numune ile yaklaşık aynıdır.

Lif miktarına bağılı olarak yük sehim grafikleri toplu halde Şekil 4.25’de verilmiştir. Ayrıca lif miktarına göre Şahit numune referans alınarak eğilme dayanımı değişim oranları Şekil 4.26’da verilmiştir.



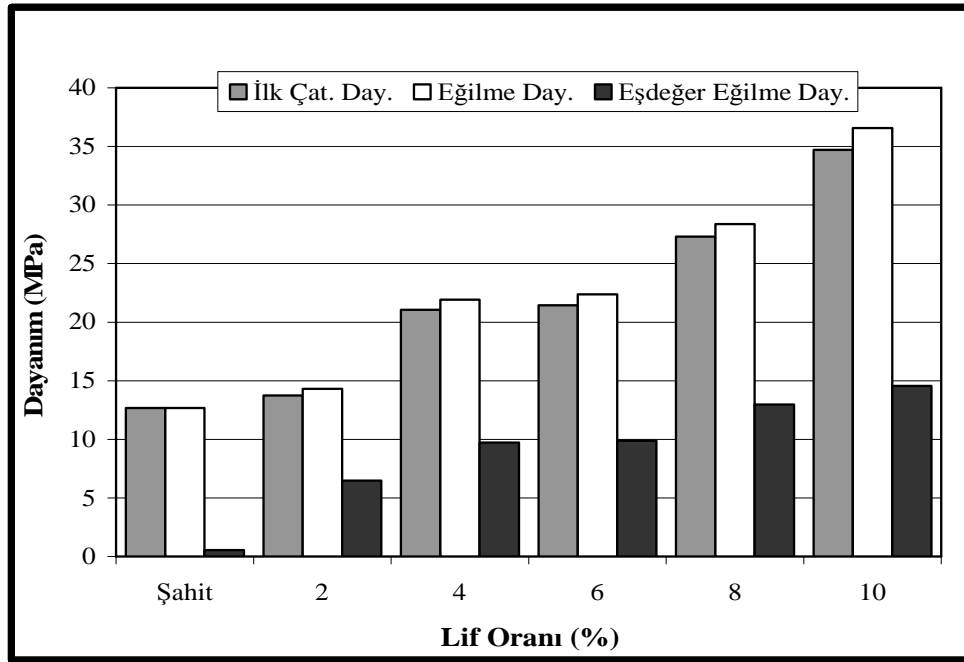
Şekil 4.25. Lifli ve lifsiz numunenin yük sehim eğrisi

Yük-sehim grafikleri kullanılarak, metot bölümünde verilen 3.8-15 bağıntıları ile hesaplanan, tokluk indeksleri, çatlak dayanımları, eğilme dayanımları, kırılma tokluğu, kırılma enerjisi ve eşdeğer eğilme dayanımı değerleri Tablo 4.9’da verilmiştir.

Kırılma enerjisi ile kırılma tokluğu değerleri arasında doğru orantı olduğu için lif oranına göre değişim oranları aynı kalmaktadır. Bu nedenle ayrıca lif oranına göre kırılma tokluğu değişimi grafiği verilmemiş sadece kırılma enerjisi değişimi grafiği verilmiştir (Şekil 4.27).

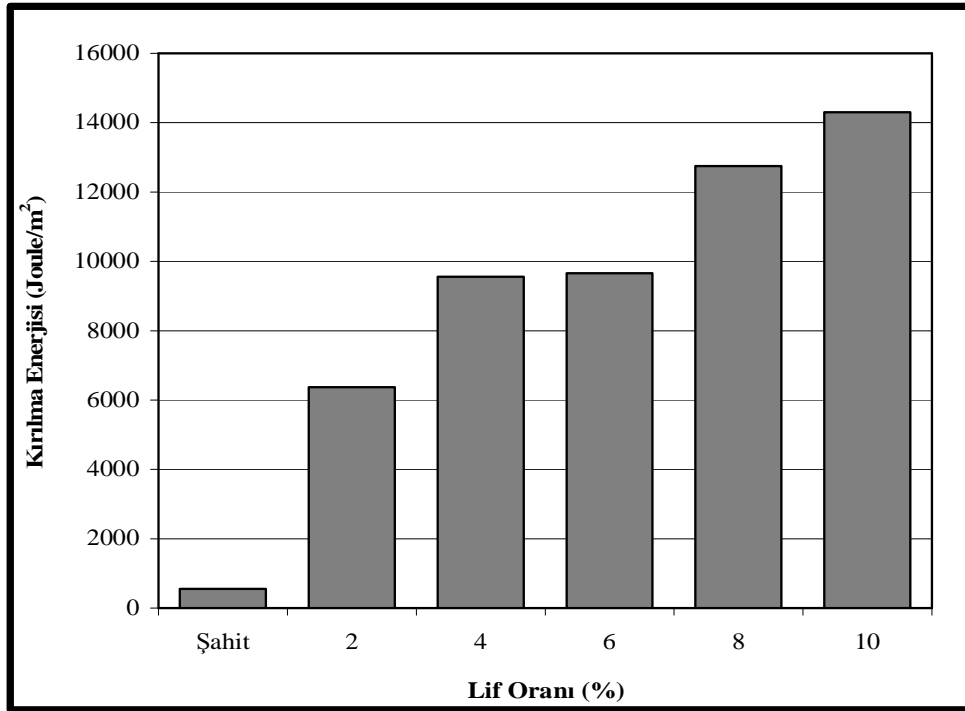
Tablo 4.9. Numunelerin eğilme dayanımı sonuçları

Lif Miktarı (%)	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	İlk Çatlak Day. (MPa)	Eğilme Day. (MPa)	Kırılma Tokluğu (Nm)	Kırılma Enerjisi (Joule/m ²)	Eşdeğer Eğ. Day. (MPa)
Şahit	1	1	1	12,68	12,68	1,36	5523	0,54
2	5,60	8,56	10,20	13,74	14,32	16,19	6368	6,48
4	4,20	5,25	5,25	21,06	21,92	24,31	9555	9,72
6	4,37	5,61	5,85	21,44	22,38	22,61	9662	9,87
8	4,23	4,63	4,63	27,30	28,38	32,46	12752	12,98
10	4,24	4,53	4,53	34,70	36,58	36,41	14301	14,56



Şekil 4.26. Lif oranına göre eğilme dayanımı

Grafikler incelendiğinde Şahit RPB eğilme dayanımı (12,68 MPa) ile lif miktarı %2 olan RPB'nin eğilme dayanımı (14,32 MPa) arasındaki dayanım artışı oranı %13 olurken, %2 ile %4 arasındaki artış oranı %53'e yükselmiştir. Eğilme dayanımlarındaki artış oranı %4 ile %6 lif oranında %2 ile minimum olmuş ve %6 ile %8 lif oranında artış oranı %27 ile tekrar artmıştır. Son olarak da %8 ile %10 lif oranında da artış oranının %29 olduğu görülmüştür.

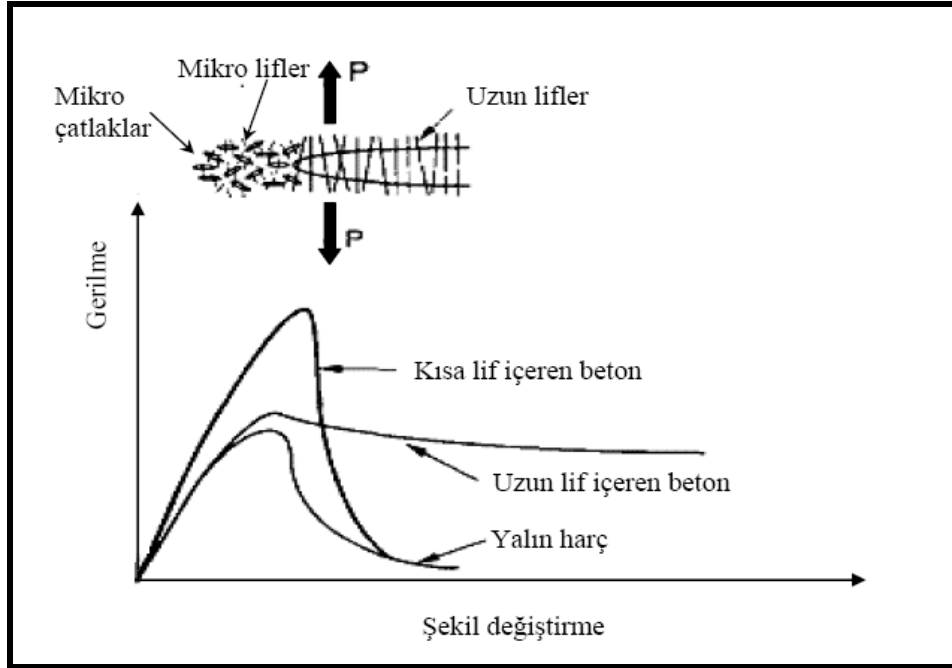


Şekil 4.27. Lif miktarına göre kırılma enerjileri

RPB'ye lifin katılması ile gevreklikten sünekliliğe doğru bir geçişin olduğu görülmektedir. Bu durum lif oranının %4'e çıkması ile daha da belirleşirken %4 ile %6 arasında hem eğilme dayanımı hem de kırılma tokluğu değerlerinde belirgin bir fark görülmemiştir.

Kısa kesilmiş lifler aynı ağırlıktaki uzun liflerden sayıca çok daha fazla olması betona daha iyi dağılmalarına ve iki lif arasındaki mesafenin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum ilk çatlak oluşumu için olumlu bir etki yapmaktadır. Kiriş alt bölgesinde çentik etkisi yapacak durum azalmakta ve çatlak ilerlemesi sürekli lifli bir yapıda daha zor olmaktadır. Deney sonuçlarına göre de, kalıba yerleştirmedeki olumsuzluğa rağmen lif miktarının artması dayanım ve tokluğu arttırmıştır.

Daha önce yapılmış olan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.28) [28, 29, 102]. Yapılan çalışmada, normal betonlarda mikro boyuttaki lifler çimento hamurunu ve harç fazını, uzun çelik lifler ise betonu güçlendirdiği sonucuna varmışlardır.



Şekil 4.28. Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi [103].

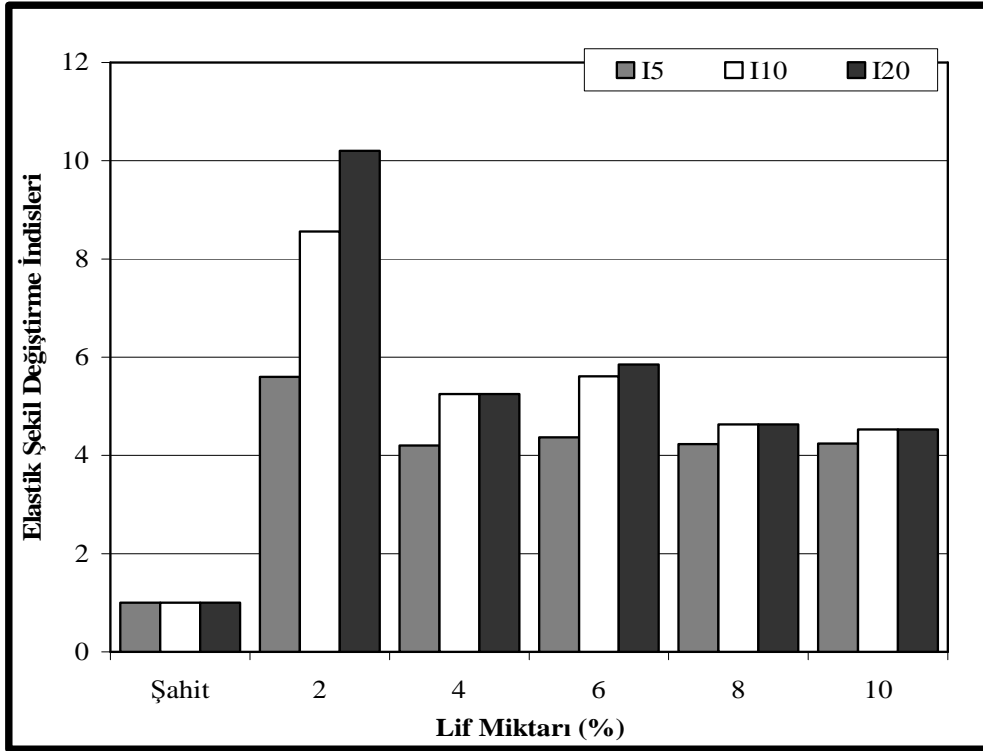
RPB'nin tane yapısı normal betona göre kıyaslandığında, normal betonun çimento pastasına yakındır. Yani mikro boyuttaki lifler normal betonda çimento pastasını güçlendirirken RPB'nin tamamını güçlendirmektedir. Ancak, lif boylarının kısa olması, sehim miktarını azaltmaktadır. Aynı şekilde kısa liflerin uçlarının kancasız olması da bu etkiye katkı sağlamıştır.

Kırılma tokluğu değeri kullanılarak Japon standardına göre hesaplanan eşdeğer eğilme dayanım değerleri, TS ve ASTM standardına göre hesaplanan eğilme dayanımından oldukça düşüktür.

Kırılma enerjisi grafiği, eğilme dayanımı grafiği ile benzerlik göstermektedir. Eğilme grafikleri incelendiğinde de maksimum yükü fazla olan grafiklerin bu yükten sonrada yük taşıma kapasitelerinde ani düşüş olmamakta ve eğrinin oluşturduğu alan büyük olmaktadır. Fakat ilk çatlak oluşumuna kadar sünek davranmış RPB'lerin kırılma indeksleri düşük olmaktadır.

Elastik şekil değiştirme indeksleri (tokluk indeksleri), lif katkılı betonların kırılma anına kadar değerlendirilmesi için önemlidir. Eğilme numunelerinin sadece

dayanımları ve kırılma toklukları ile değil aynı zamanda da tokluk indeksleri ile de değerlendirilmeleri gerekmektedir. Lif türüne ve miktarına göre elastik şekil değiştirme indeksleri Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. Lif miktarına göre elastik şekil değiştirme indeksleri

İndeks değerleri ile süneklilik arasında doğru orantı vardır. Çatlaktan sonraki sehim miktarı arttıkça indekslerde buna bağlı olarak artacağı bilinmektedir. Dolayısı ile ilk çatlak oluştuğu sehim değeri çok önemlidir. Daha öncede bahsedildiği gibi kısa kesilmiş lifli betonların ilk çatlak oluşumu oldukça zor olmakta bu da bu alanın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca tepe noktasının aşılması ile birlikte lif boyunun ve lifin beton içerisinden sıyrılmasının önemi artmaktadır. Bu nedenle kısa kesilmiş lifler bu bölgede dezavantajlı duruma düşmektedir. Lif içeriği %2 olan numunenin, diğer lifli numuneler arasında çatlak başladığı sehim (0,88 mm) en düşüktür. Bu nedenle bu numunenin indeks değerleri diğerlerinden yüksek olmuştur.

4.2.3. Lif oranının birim dayanım maliyetine etkisi

Şahit RPB ve lifli RPB karışımlarının günümüz ve ülkemiz koşulları dikkate alınarak birim maliyet analizleri yapılmıştır (Tablo 4.10). RPB'yi oluşturan malzemeler normal betonu oluşturan malzemelere göre çok farklıdır. RPB'yi oluşturan malzemelerden silis dumanı, kimyasal katkı ve çelik lifin birim fiyatları oldukça yüksektir ve bundan dolayı da RPB'nin birim fiyatı normal betona göre çok daha yüksektir.

Tablo 4.10. Şahit ve lifli karışımların birim fiyatları

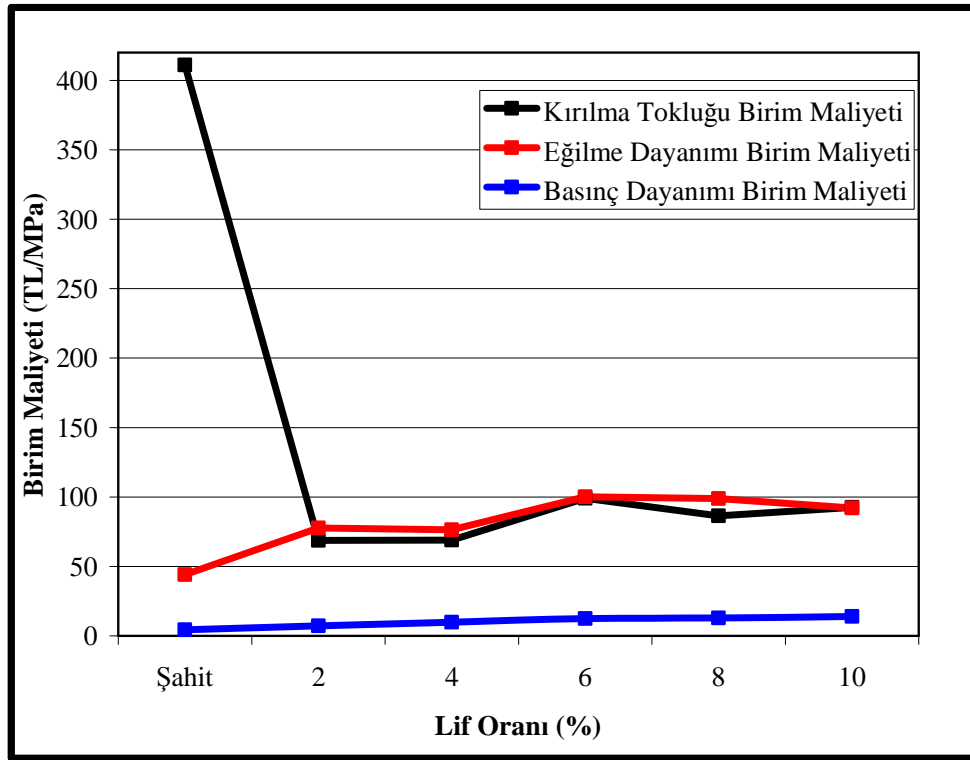
Lif İçeriği (%)	Çimento (kg)	Silis dumanı (kg)	K. Pudrası (kg)	1.KK (kg)	2.KK (kg)	Su (kg)	K. Katkı (kg)	Çelik Lif (kg)	Birim Fiyat (TL/m ³)
	Birim Fiyat (TL/kg)								
	0,14	0,25	0,40	0,20	0,20	0,02	4	4	
0	900	270	360	282,94	282,94	225	27	0	559,06
2	866,01	259,80	346,40	272,25	272,25	216,50	25,98	143,62	1112,4
4	847,71	254,31	339,08	266,50	266,50	211,93	25,43	287,24	1675,5
6	830,63	249,19	332,25	261,13	261,13	207,66	24,92	430,86	2239,4
8	812,94	243,88	325,17	255,57	255,57	203,23	24,39	574,48	2802,9
10	795,25	238,57	318,10	250,01	250,01	198,81	23,86	718,10	3366,4

Tablo 4.10'da görüldüğü gibi karışıma %2 lif eklenmesi ile birlikte RPB'nin 1 m³ fiyatı 2 katına çıkmış ve lif miktarına bağlı olarak birim maliyet doğru orantılı artmıştır.

Aynı zamanda hesaplanan birim fiyat değerleri kullanılarak lif miktarının, birim dayanım üzerindeki etkisi incelenmiş ve sonuçlar Tablo 4.11'de verilmiştir. Tablo 4.11'de verilen değerler, lif miktarına göre bulunan RPB'nin 1 m³ maliyetinin, basınç ve eğilme dayanımları ile kırılma enerjisi sonucuna, bölünmesi ile elde edilmiştir. Bu değerlerler kullanılarak lif miktarının birim maliyet üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4.30'daki grafik çizilmiştir.

Tablo 4.11. Lif miktarına göre birim dayanım maliyeti

Lif Miktarı (%)	Birim Basınç Day. Maliyeti (TL/MPa)	Birim Eğilme Day. Maliyeti (TL/MPa)	Birim Kırılma Tokluğu (TL/Nm)
Şahit	4,45	44,09	411,07
2	7,18	77,68	68,71
4	9,84	76,44	74,73
6	12,34	100,06	99,05
8	13,56	98,76	86,35
10	14,62	92,03	92,46



Şekil 4.30. Lif oranının birim maliyet üzerindeki etkisi

Lif içeriği %2 olan RPB'nin kırılma tokluğu maliyetinin Şahit RPB'ye göre 6 kat düştüğü görülmüştür. Lif içeriği %4 olan RPB'nin kırılma tokluğu maliyetinin %2 lif içeren RPB'ye göre %9 oranında arttığı görülmüştür. Lif içeriği %6 olan RPB'nin kırılma tokluğu maliyetinin %4 lif içeren RPB'ye oranla %33 arttığı tespit edilmiştir. %8 lif içeren RPB'nin kırılma tokluğu maliyeti %6 lif içeren RPB'ye göre %13

azaldığı, daha sonra lif oranının %10 çıkmasıyla aynı maliyetin %8 lif içeren RPB'ye göre %7 arttığı görülmüştür.

Birim maliyet sonuçlarına göre eğilme dayanımında belirgin değişiklikler olmuştur. Eğilme dayanımının birim maliyetine göre, %2 lif içeren RPB'nin, Şahit RPB'ye göre %76 oranında arttığı tespit edilmiştir. %4 lif içeren RPB'nin Şahit RPB'ye göre %73 oranında arttığı, %2 lif içeren RPB'ye göre ise %3 azaldığı görülmüştür. %6 lif içeren RPB ile Şahit RPB karşılaştırıldığında, %6 lif içeren RPB'nin %227 oranında arttığı, %4 lif içeren RPB'ye göre ise %31 arttığı görülmüştür. %6 lif içeren numuneden sonra eğilme dayanımı birim maliyetleri düşüş göstermiştir. Lifli numuneler arasında en düşük birim maliyet %4 lif içeren numuneye ait olduğu görülmüştür.

Basınç dayanımının birim maliyeti lif miktarına göre orantılı olarak arttığı görülmüştür. Lif içeriği %2 olan RPB'nin basınç dayanımı birim maliyeti, Şahit RPB'ye göre %61 artmaktadır. Lif içeriği %4 olan RPB ile %2 lif içeren RPB karşılaştırıldığında lif içeriği %4 olan RPB'nin basınç dayanımı maliyeti %37 arttığı görülmüştür. Lif içeriği %6 olan RPB'nin basınç dayanımı birim maliyeti %4 lif içeren RPB'ye göre %25 oranında arttığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımı maliyeti %8 lif içeren RPB'nin %6 lif içeren RPB'ye göre %5 arttığı ve lif oranının %10 çıkması ile basınç dayanımı maliyetinin %8 lif içeren RPB'ye göre %7 arttığı görülmüştür.

4.2.4. Optimum lif oranının belirlenmesi

Bölüm 3.2.2.5'de anlatılan yönteme göre matematiksel bir model kurulmuştur. Bu modelde 6 farklı lif oranı değişken olarak kabul edilmiş ve bu değişkenlerden etkilenen, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, maliyet, karıştırmada ve yerleştirmede yaşanan zorluklar, elastisite modülü ve birim hacim ağırlık olmak üzere RPB'ye ait 7 farklı sonuç ele alınmıştır. Tablo 4.12'de tüm sonuçlar göz önüne alınarak 1 ile 9 arasında önem dereceleri belirlenmiş ve bunların normalizasyon işlemi sonuçları Tablo 4.13'de verilmiştir. Tablo 4.14'de ise lif oranına göre bulunan sonuçların 0 ile 1 değerleri arasında olması için normalizasyon işlemi uygulanmış ve

sonuçları verilmiştir. Normalizasyon işlemi yapılmış 7x7'lik matrisin her bir satır ortalamaları bulunarak 1x7'lik matris elde edilir ve matrisin bu değerleri o satıra ait olan sonucun karar vermedeki ağırlık değeri olmaktadır.

Tablo 4.12. Lif oranına göre elde edilen sonuçların önem dereceleri

	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Kırılma Tokluğu	Maliyet	Zorluk	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırl.
Basınç Dayanımı	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	9,00	8,00
Eğilme Dayanımı	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	9,00	8,00
Kırılma Tokluğu	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	3,50	2,00
Maliyet	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	9,00	3,50
Zorluk	2,00	2,00	2,00	1,25	1,00	9,00	8,00
Elastisite Modülü	0,11	0,11	0,29	0,11	0,11	1,00	1,50
Birim Hac. Ağırl.	0,25	0,25	0,50	0,29	0,13	0,67	1,00

Tablo 4.13. Lif oranına göre elde edilen sonuçların önem derecelerinin normalizasyon sonuçları

	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Kırılma Tokluğu	Maliyet	Zorluk	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırl.
Basınç Dayanımı	0,16	0,16	0,15	0,18	0,14	0,22	0,25
Eğilme Dayanımı	0,16	0,16	0,15	0,18	0,14	0,22	0,25
Kırılma Tokluğu	0,16	0,16	0,15	0,18	0,14	0,09	0,06
Maliyet	0,16	0,16	0,15	0,18	0,23	0,22	0,11
Zorluk	0,31	0,31	0,29	0,22	0,28	0,22	0,25
Elastisite Modülü	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,05
Birim Hac. Ağırl.	0,04	0,04	0,07	0,05	0,04	0,02	0,03

Tablo 4.14. Lif oranına göre elde edilen sonuçların 0-1 değerleri arasında normalize edilmesi

	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Kırılma Tokluğu	Maliyet	Zorluk	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağr.
E_k	125,63	12,68	1,36	3366,40	7,50	68798,00	2786,40
E_b	242,28	36,58	36,41	559,06	0,00	51775,00	2298,00
0	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,59	1,00
2	0,25	0,07	0,42	0,80	0,87	0,44	0,80
4	0,38	0,39	0,65	0,60	0,80	0,64	0,60
6	0,48	0,41	0,61	0,40	0,60	1,00	0,40
8	0,78	0,66	0,89	0,20	0,33	0,36	0,20
10	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Lif oranlarına bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarının normalizasyon yapılarak oluşturulan 6x7 matrisi ile her bir sonucun ağırlık matrisi çarpılır ve elde edilen matrisin satırları toplanarak en büyük değere ait lif oranı optimum lif oranı olarak belirlenir (Tablo 4.15). Tablo 4.15'deki verimlilik değerlerinden en büyük değer %4 lif oranına ait olduğu görülmektedir.

Tablo 4.15. Lif oranlarının verimlilik değerleri

Lif Oranı	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Kırılma Tokluğu	Maliyet	Zorluk	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağr.	Verimlilik Değerleri
0	0,00	0,00	0,00	0,17	0,27	0,02	0,04	0,50
2	0,04	0,01	0,06	0,14	0,23	0,01	0,03	0,53
4	0,07	0,07	0,09	0,10	0,22	0,02	0,02	0,59
6	0,09	0,07	0,08	0,07	0,16	0,03	0,02	0,51
8	0,14	0,12	0,12	0,03	0,09	0,01	0,01	0,52
10	0,18	0,18	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49

Basınç ve eğilme dayanımı ile kırılma tokluğu dayanımının önem derecesi artırılarak 1 ile 9 arasında önem dereceleri belirlenerek Tablo 4.16'da verilmiştir. Bu önem derecelerine göre bulunan verimlilik değerleri Tablo 4.17 verilerek optimum lif oranının %4 olduğu görülmüştür.

Tablo 4.16. Lif oranına göre elde edilen sonuçların basınç ve eğilme dayanımı ile kırılma tokluğu ağırlıklı önem dereceleri

	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Kırılma Tokluğu	Maliyet	Zorluk	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırl.
Basınç Dayanımı	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	6,00
Eğilme Dayanımı	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	6,00
Kırılma Tokluğu	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	6,00
Maliyet	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	9,00	9,00
Zorluk	1,00	1,00	1,00	0,50	1,00	9,00	8,00
Elastisite Modülü	0,14	0,14	0,14	0,11	0,11	1,00	2,00
Birim Hac. Ağırl.	0,17	0,17	0,11	0,11	0,13	0,50	1,00

Tablo 4.17. Lif oranlarının, basınç ve eğilme dayanımı ile kırılma tokluğu ağırlıklı verimlilik değerleri

Lif Oranı	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Kırılma Tokluğu	Maliyet	Zorluk	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırl.	Verimlilik Değerleri
0	0,00	0,00	0,00	0,22	0,18	0,02	0,02	0,44
2	0,05	0,01	0,08	0,18	0,16	0,01	0,02	0,50
4	0,07	0,07	0,12	0,13	0,14	0,02	0,01	0,57
6	0,09	0,07	0,11	0,09	0,11	0,03	0,01	0,51
8	0,14	0,12	0,16	0,04	0,06	0,01	0,00	0,54
10	0,18	0,18	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54

Maliyet ile karıştırma ve yerleştirme zorluklarının önem derecelerinin dayanım karşısında bir miktar artırılarak 1 ile 9 arasında önem dereceleri belirlenmiş ve Tablo 4.18'de verilmiştir. Bu önem derecelerine göre bulunan verimlilik değerleri Tablo 4.19 gösterilerek optimum lif oranının %4 olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, basınç ve eğilme dayanımı ile ilgili parametreler, maliyet analiz sonuçları, karıştırma ve yerleştirme işlemi ile ilgili deney sırasında yaşanan zorluklar dikkate alınarak yapılan çözümlenmeler sonucunda, daha sonra yapılması planlanan deneylerde kullanılacak lif oranı %4 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.18. Lif oranına göre elde edilen sonuçların maliyet ve karıştırma ve yerleştirme zorluklarının ağırlıklı önem dereceleri

	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Kırılma Tokluğu	Maliyet	Zorluk	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırlığı
Basınç Dayanımı	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	9,00	9,00
Eğilme Dayanımı	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	9,00	9,00
Kırılma Tokluğu	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	9,00	9,00
Maliyet	3,00	3,00	3,00	1,00	1,00	9,00	9,00
Zorluk	3,00	3,00	3,00	1,00	1,00	9,00	9,00
Elastisite Modülü	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,00	0,33
Birim Hac. Ağırlığı	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	3,00	1,00

Tablo 4.19. Lif oranlarının, maliyet ve karıştırma ve yerleştirme zorluklarının ağırlıklı önem derecelerine göre verimlilik değerleri

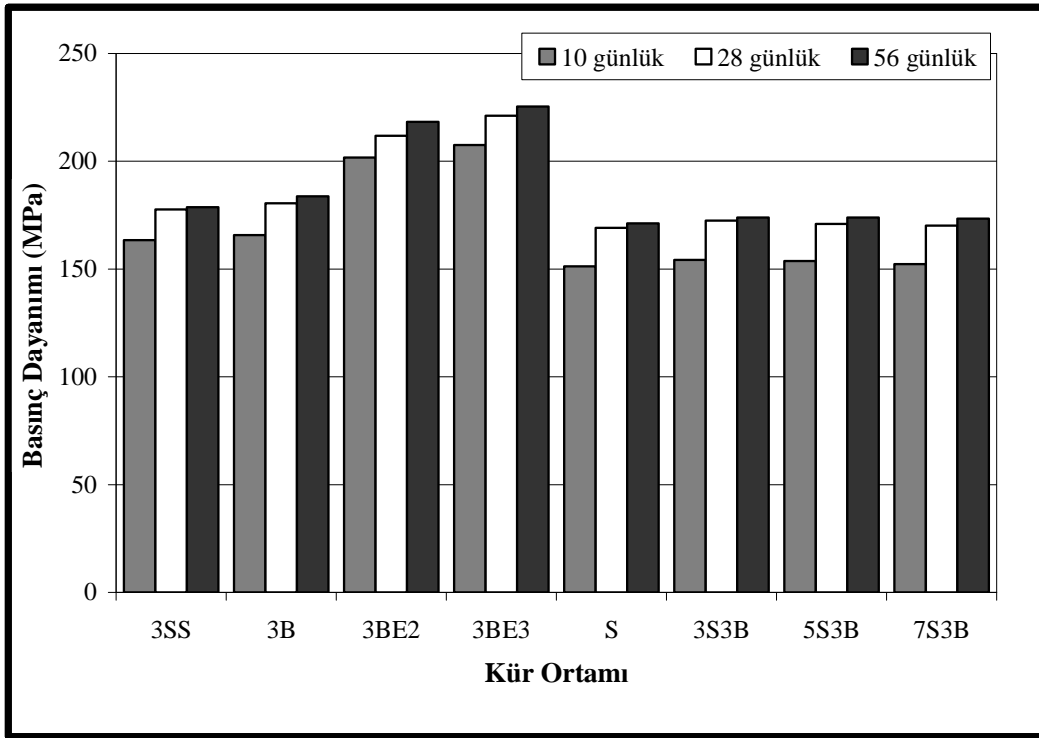
Lif Oranı	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Kırılma Tokluğu	Maliyet	Zorluk	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırlığı	Verimlilik Değerleri
0	0,00	0,00	0,00	0,28	0,28	0,01	0,03	0,60
2	0,03	0,01	0,06	0,23	0,24	0,01	0,02	0,60
4	0,05	0,05	0,09	0,17	0,23	0,01	0,02	0,61
6	0,06	0,05	0,08	0,11	0,17	0,02	0,01	0,51
8	0,10	0,09	0,12	0,06	0,09	0,01	0,01	0,47
10	0,13	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39

4.3. Kür Tipinin Belirlenmesi

Bölüm 4.2’de belirlenen lif içeriği (%4) kullanılarak uygun kür tipinin seçilmesi için numuneler üretilmiştir. Numunelere Bölüm 3.2.2.6’da verilen kür programı uygulanmış, farklı yaşlardaki dayanım gelişmeleri incelenmiş ve sonuçlar Tablo 4.20’de verilmiştir. Her bir karışım için 3 adet deney numunesi üretilmiş ve bu 3 numuneyi en iyi şekilde temsil eden grafikler ve ortalama değerler, tablo ve şekillerde verilmiştir. Bulunan basınç dayanımları Şekil 4.31’de grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.20. Kür tipine göre RPB’nin basınç dayanımları

Numune Kodu	Kür Tipi	Basınç Dayanımı (MPa)		
		10 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)	56 Günlük Dayanım (MPa)
3SS	3 gün 90°C sıcak suda 25 gün suda	163,45	177,67	178,65
3B	3 gün 90°C buhar küründe 25 gün suda	165,7	180,56	183,76
3BE2	3 gün 90°C buhar küründe ardından 12 saat 200°C etüvde 23 gün suda	201,67	211,78	218,34
3BE3	3 gün 90°C buhar küründe ardından 12 saat 300°C etüvde 21 gün suda	207,53	221,16	225,36
S	28 gün 20°C suda	151,3	169,17	171,23
3S3B	3 gün 20°C suda, 3 gün 90°C sıcak suda 22 gün suda	154,26	172,45	173,86
5S3B	5 gün 20°C suda, 3 gün 90°C sıcak suda 20 gün suda	153,78	170,96	173,89
7S3B	7 gün 20°C suda, 3 gün 90°C sıcak suda 18 gün suda	152,34	170,16	173,45



Şekil 4.31. Kür tipi-basınç dayanımı grafiği

Kür tipine göre en düşük dayanımı 20°C normal su küründeki numuneler vermiştir. Su kürüne göre, 3 gün 90°C sıcak su ve buhar kürü sırasıyla 10 günlük dayanımda %8 ve %10, 28 günlük dayanımda her iki kürde de yaklaşık %6, 56 günlük dayanımda da %4 ve %7 dayanım artışı olmuştur. İlk günlük dayanım artışının fazla olması, kür etkisi ile hidrasyonun gelişiminin hızlanması sonucundadır. Su kürüne göre, 3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 200°C ve 300°C etüv kürü 10 günlük dayanımda sırasıyla %33 ve %37, 28 günlük dayanımda %25 ve %31, 56 günlük dayanımda da %28 ve %32 dayanım artışı olmuştur. İlk günlük dayanım artışının fazla olması, kür işleminin hem buhar kürü hem de etüv sıcaklığı ile kısa sürede tamamlanması ile açıklanabilir. Numunelerin buhar kürü ile bünyesine gerekli suyu alarak hidrasyonun ve puzolanik aktivitenin bir kısmını tamamlamış ve etüv kürü ile yeniden hidrasyon ve puzolanik aktivitesi canlanarak büyük oranda gelişimini tamamlamıştır.

Kür tipi olarak en yüksek dayanımı, 3 gün 90°C buhar küründe, ardından 12 saat 300°C etüv kürü uygulanan numuneler vermiş ve bunu, 3 gün 90°C buhar kürünün

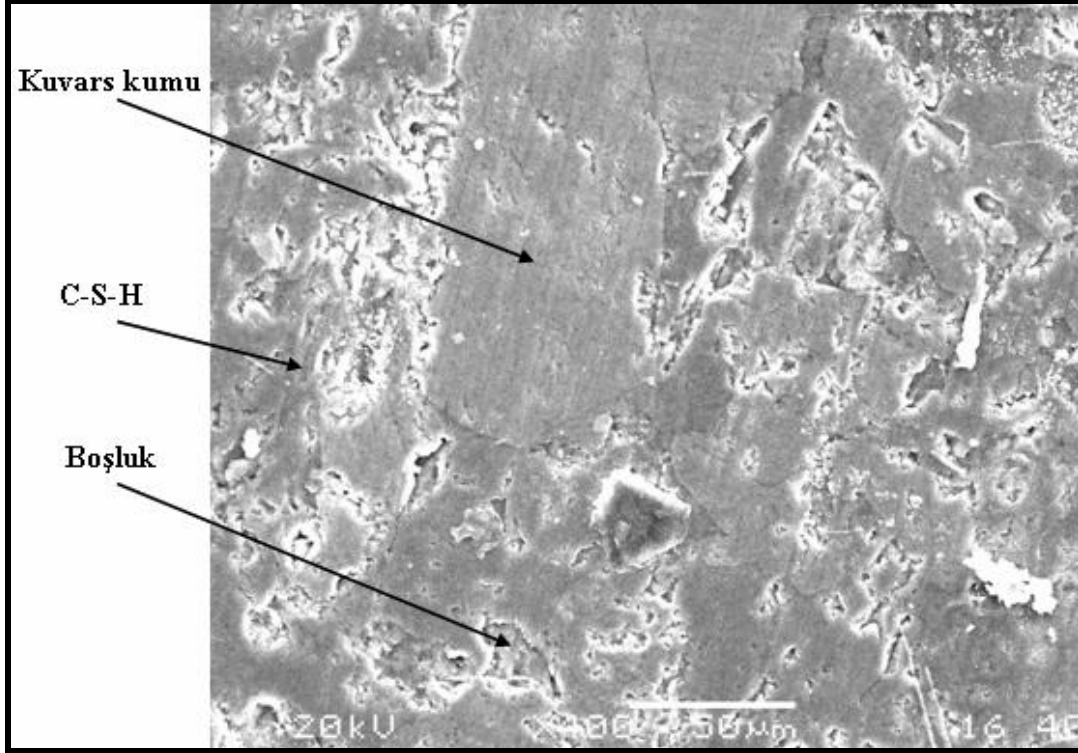
ardından 12 saat 200°C etüv kürü uygulanan numuneler takip etmiştir. 3 gün 90°C buhar ve sıcak su kürü arasında ortalama %3'lük fark ortaya çıkmıştır. Bu fark buharın numunelere daha iyi nüfuz etmesiyle açıklanabilir. Sıcak buhar kürünün beton numunelerine 3, 5 ve 7 gün sonra uygulanması dayanımda buhar kürünün uygulanma süresine bağlı olarak düşüş göstermiştir. Özellikle 7. günün sonunda 3 gün 90°C kürün uygulanmasının belirgin bir artış sağlamadığı kısmen de olsa artışın sadece 3. günün sonunda 3 gün 90°C buhar uygulanan numunelerde olduğu tespit edilmiştir.

Talebinejad ve arkadaşları [51] yaptığı çalışmada, kür koşulları 20°C normal su kürü ile 7 gün su kürü ardından sırasıyla 2 ve 3 gün süreyle 90°C sıcak kür uygulamışlardır. Ayrıca 7 gün 20°C daha sonra 2 gün 90°C suda ve son olarak ta 2 gün 200°C'lik kuru hava kürü uygulamışlar ve en iyi kür olarak da bu kür tipinin sonuç verdiğini bildirmişlerdir. Uygulanan bu dört farklı kür tipini, su kürü ile karşılaştırıldığında, 7 gün su kürü ardından sırasıyla 2 gün ve 3 gün süreyle 90°C sıcak kür uygulanan numunelerin basınç dayanımlarının sırasıyla %53 ve %64 arttığını, 7 gün 20°C daha sonra 2 gün 90°C suda ve 2 gün 200°C'lik kuru hava kürü uygulanan numunenin basınç dayanımının ise %114 arttığını bildirmişlerdir. Bu çalışmada çimento içeriğini 1900 kg/m³ ve silis dumanı içeriğini de çimento içeriğinin %25'i olarak kullanmışlardır.

Talebinejad ve arkadaşları [51] yaptığı çalışmanın sonuçları ile bu tez çalışmasının sonuçlarının birbirinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bu fark, yüksek dozda çimento (1900 kg/m³) kullanımına bağlı olabilir. Yüksek dozdaki çimento içeriği ve buna bağlı olarak da silis dumanı içeriğinin yüksek miktarda olmasına neden olmaktadır. Düşük su/çimento (0,115) oranında hidrate olmamış çimento miktarının yüksek olması nedeniyle hidrate olmamış çimentonun daha sonra sıcak kür etkisiyle canlandırılan hidratasyon sayesinde hidrate olması ve yine yüksek miktardaki silis dumanı ile puzolanik etki oluşturması dayanımdaki bu artış miktarına neden olabilir.

Sıcak kürün etkisinin daha iyi açıklanabilmesi için numunelerin SEM görüntüleri ve bu görüntü üzerindeki yapıların anlaşılabilmesi için bazı görüntülerde EDS teknolojisinden yararlanılmıştır.

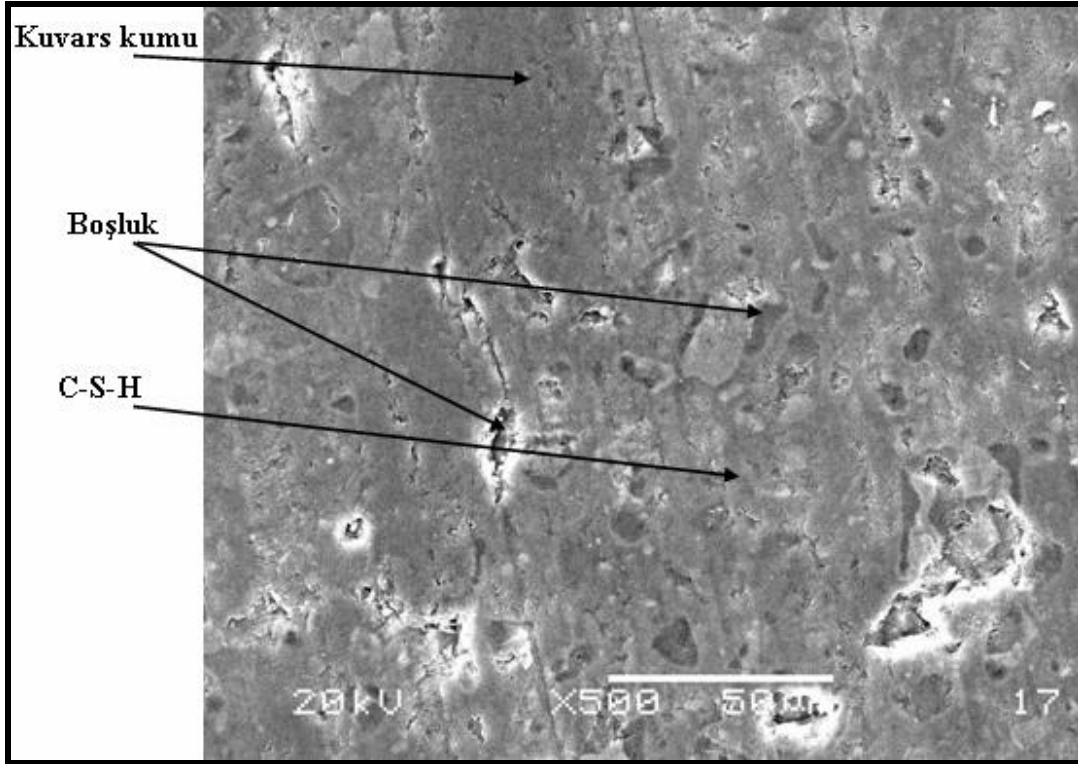
Normal su kürü, 3, 5 ve 7 gün sonra 90°C buhar kürü uygulanan numunelerin içyapı görüntüleri arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Bu üç küre örnek olarak normal su kürünün içyapı görüntüsü Şekil 4.32’de verilmiştir.



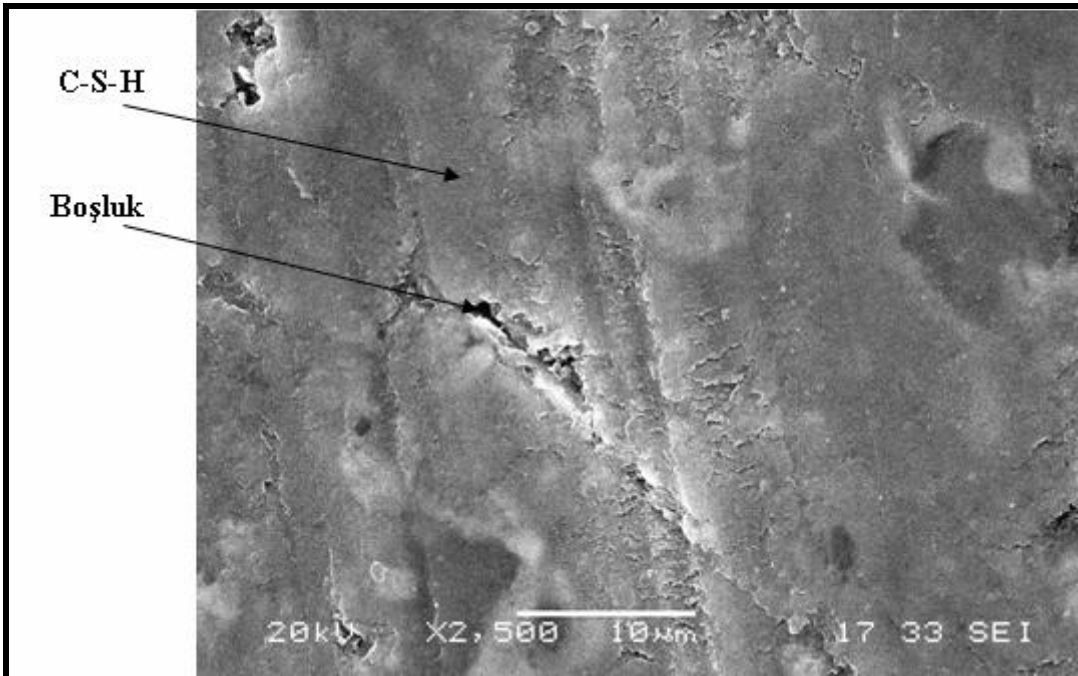
Şekil 4.32. Normal su kürünün içyapı görüntüsü

Hidratasyon ısısının devam etmesi veya artması, sıcak kür işlemi ile mümkün olabilmektedir. Numunelerde bulunan yüksek dozdaki silis dumanı, çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan bileşenler ile puzolanik aktivite oluşturmaktadır. Puzolanik aktivite artışı orantılı olarak basınç dayanımını da etkilemektedir. Şekil 4.33’de 90°C sıcak su ve buhar kürüne ait içyapı görüntüsü verilmiştir. İçyapının normal su kürünün içyapısı ile karşılaştırıldığında pastanın daha az boşluklu olduğu görülmektedir.

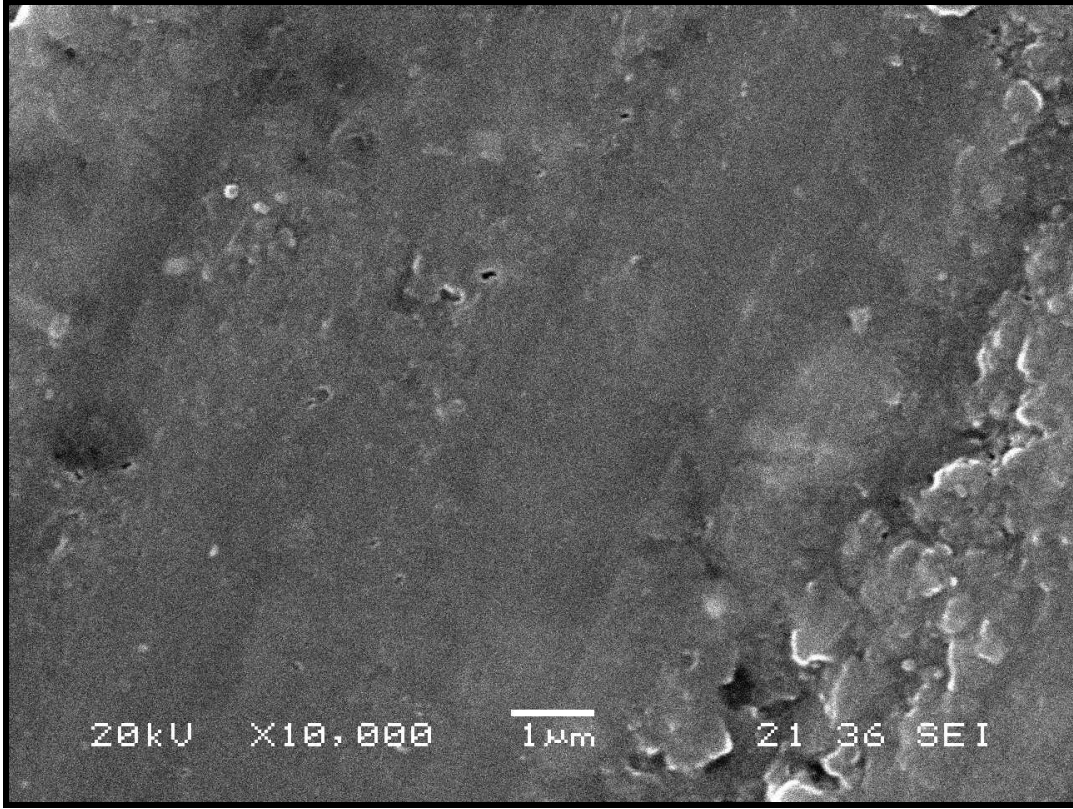
90°C sıcak buhar kürü uygulanan numuneye 12 saat 200°C ve 300°C etüv kürü uygulanması ile içyapı görüntülerinde belirgin bir değişim gözlenmiştir (Şekil 4.34, 35). Çimento ve silis dumanından oluşan pasta, çok küçük boşlukların dışında tamamıyla kuvars pudrası ve kumunu sarmaktadır.



Şekil 4.33. 90°C sıcak su ve buhar kürüne ait içyapı görüntüsü



Şekil 4.34. 3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 200°C kürü ait içyapı görüntüsü



Şekil 4.35. 3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 300°C kürü ait içyapı görüntüsü

90°C sıcak buhar kürü ardından 12 saat 200°C etüv kürü (3B2E) uygulanan numune ile 90°C sıcak buhar kürü ardından 12 saat 300°C etüv kürü (3B3E) uygulanan numune karşılaştırıldığında 3B3E kürünün 10 günlük basınç dayanımının %3, 28 günlük basınç dayanımının %4 ve 56 günlük basınç dayanımının %3 daha fazla olduğu görülmüştür. Kür türünün sonuçları incelererek daha sonraki deneylerde en yüksek basınç dayanımını veren 90°C sıcak buhar kürü ardından 12 saat 300°C etüv kürünün (3B3E) kullanılmasına karar verilmiştir.

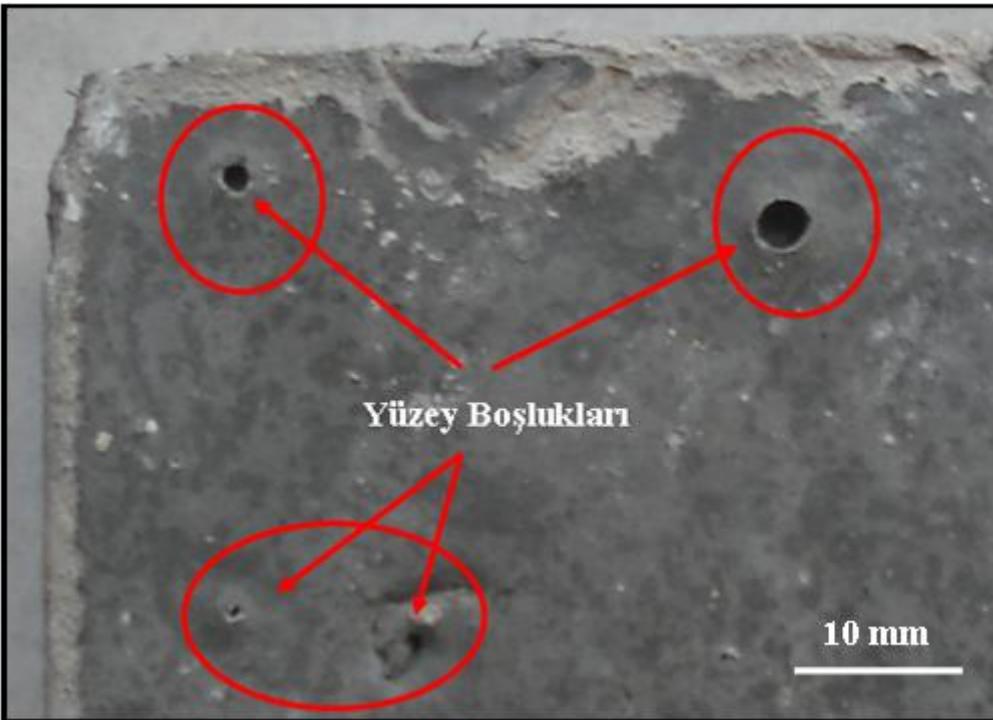
4. 4. Katılma Süresince Uygulanan Sıkıştırma Basıncının Etkileri

4.4.1. Sıkıştırma basıncının basınç numunelerine etkisi

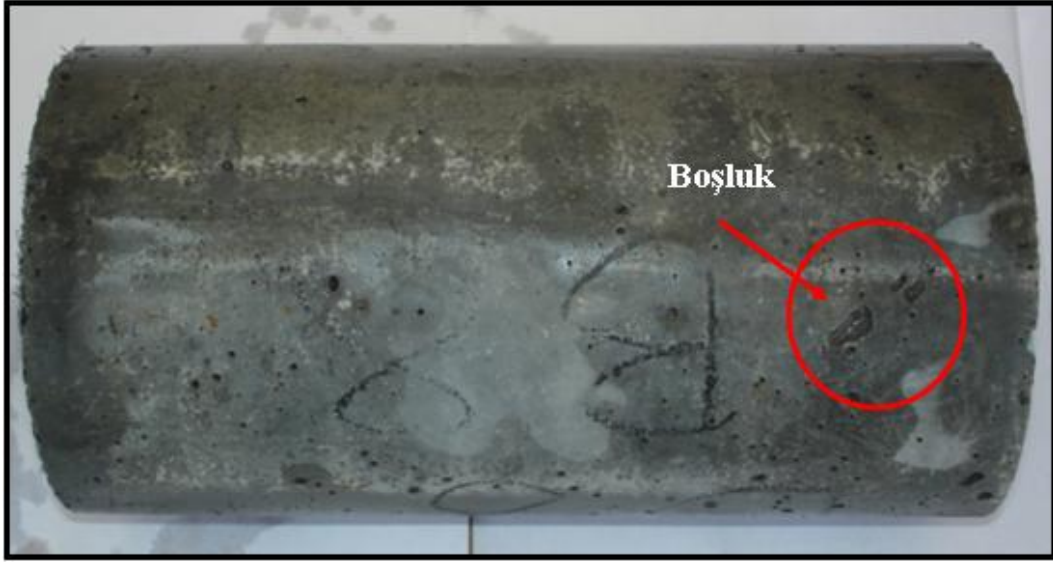
Günümüzde betonun yerleştirilmesi için en çok kullanılan metotlar, vibrasyon ve şişlemedir. Bu metotlar normal ve yüksek performanslı betonlar için yeterli olabilmektedir. RPB'nin kalıplara iyi bir şekilde yerleştirilmesinde, ilk olarak şişleme ve vibrasyon metotları denenmiştir. Fakat kullanılan kimyasal katkı dozajının fazla olması, işlenebilirliğe olumlu etkisinin yanı sıra, beton içerisine hava kabarcıkları sürüklenmesi gibi olumsuz etkilere de neden olduğu yapılan gözlemler sonucu anlaşılmıştır. Kimyasal katkı üzerinde, üretici firmanın yaptığı bir takım modifikasyonlar ile hava miktarı biraz azaltılmış fakat istenilen düzeye getirilememiştir (Şekil 4.36a,b,c). Ayrıca RPB'ye vibrasyon uygulanması sırasında katkının sürüklediği hava miktarında artış olduğu, betonun hava kabarcıkları sayesinde şişerek kalıptan taşıdığı veya yüzeye çıkarak baloncuklar oluşturduğu yapılan çalışmalar sırasında gözlemlenmiştir. Deney numunelerinden alınan örnekler mikroskop altında incelenmiş ve lif ile beton arasındaki ara yüzeyde boşlukların olduğu ve boşlukların ara yüzeyde zayıf noktalara neden olduğu görülmüştür (Şekil 4.37). Bu da betonun lifler ile arasındaki aderansını olumsuz yönde etkilemekte ve sonuç olarak dayanımı da düşürmektedir. Bu nedenle RPB'de vibrasyon ve şişleme işleminin olumsuzlukları nedeni ile bu yöntemlere alternatif bir yerleştirme yöntemi arayışına girilmiştir.



(a)

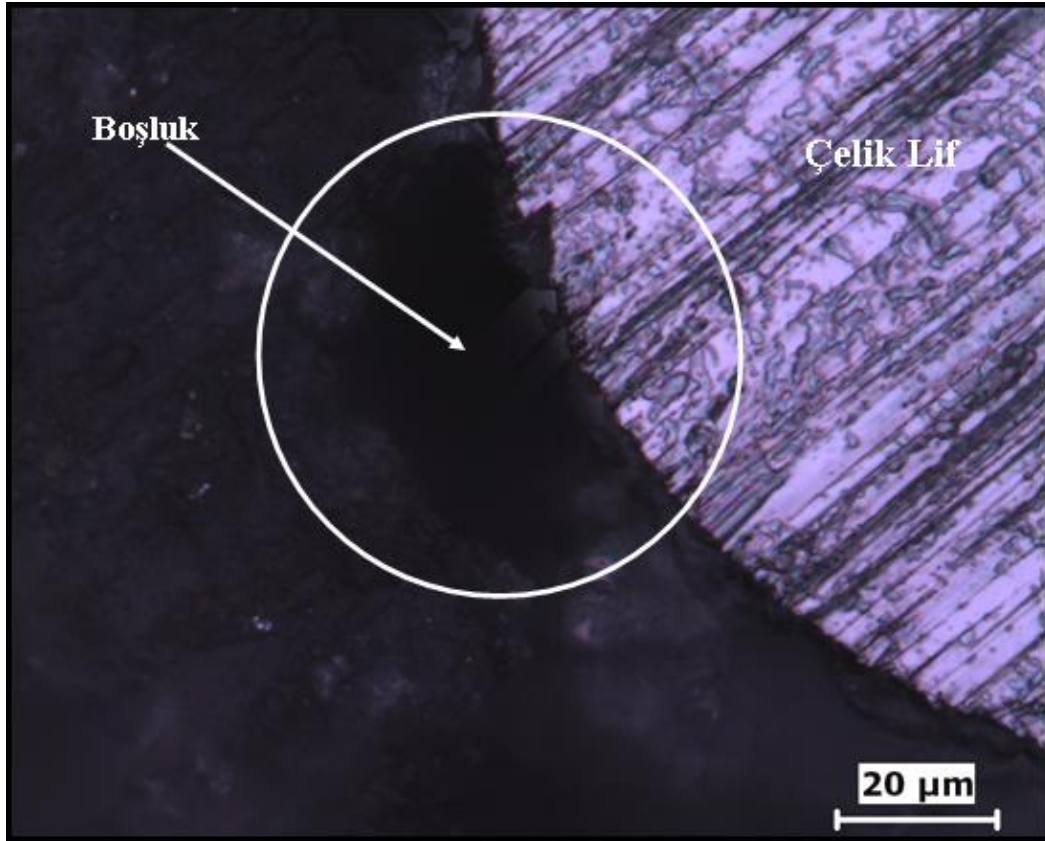


(b)



(c)

Şekil 4.36.a Vibrasyon ile kalıba yerleştirilen küp numunenin kalıp yüzeyi
 b Küp numune üst yüzeyi
 c Silindir numune



Şekil 4.37 Vibrasyon kullanılarak kalıba yerleştirilen RPB'nin çelik lif-pasta ara yüzeyi

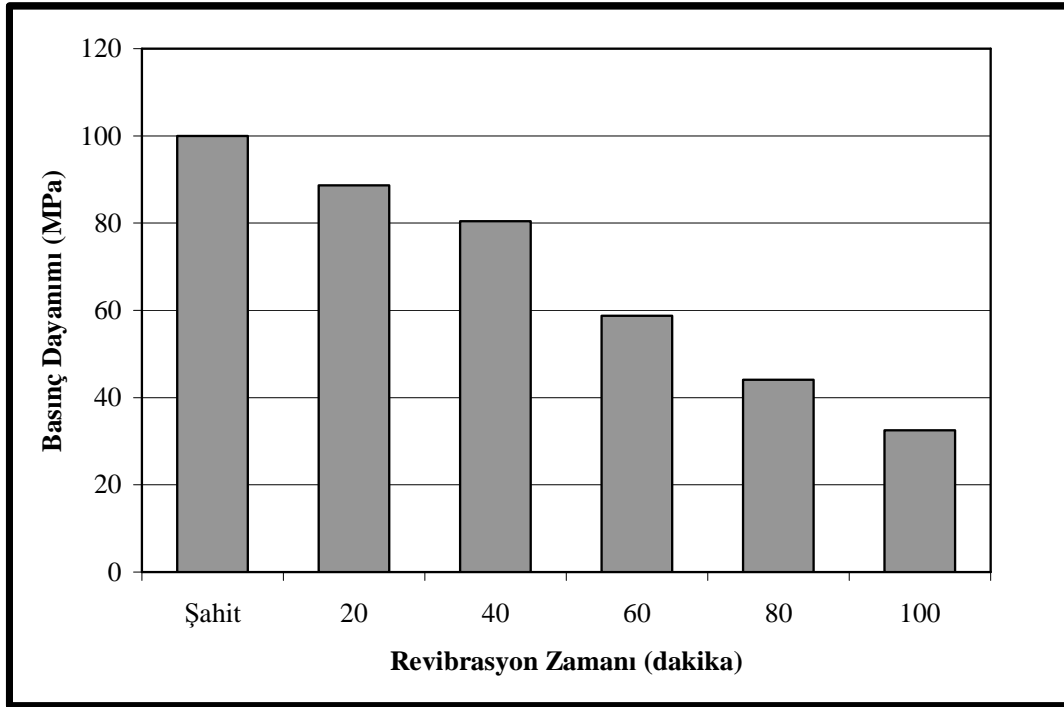
4.4.1.1. RPB'ye revibrasyon uygulaması

Betonun kalıba yerleştirilmesinde uygulanan diğer bir yöntemde, normal beton dayanımında yaklaşık %20'ye kadar artış sağlayan tekrarlı vibrasyon (revibrasyon) uygulamasıdır. Literatürde RPB'ye revibrasyon uygulanması ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle RPB'de revibrasyonun etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Yapılan revibrasyon deneyinde, 10 cm'lik küp numunelere sırasıyla 20, 40, 60, 80, 100 dakika sonra ikinci bir vibrasyon işlemi uygulanmıştır. Her bir karışım için 3 adet deney numunesi üretilmiş ve bu 3 numuneyi en iyi şekilde temsil eden grafikler ve ortalama değerler, tablo ve şekillerde verilmiştir. Bu numunelere ait 28 günlük basınç dayanım sonuçları Tablo 4.21'de verilmiştir.

Tablo 4.21. Revibrasyon uygulanmış RPB'nin basınç dayanımları

Revibrasyon Süresi (dak.)	Basınç Dayanımı (MPa)
Şahit	169
20	150
40	136
60	99
80	75
100	55

Tablo 4.21 incelendiğinde revibrasyon uygulamasının basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Revibrasyon süresinin artması, dayanımdaki azalma oranını da arttırdığı tespit edilmiştir. Şahit ile 20 dakika sonra vibrasyon uygulanmış numune arasında basınç dayanımında %11,4 azalma olduğu görülmüştür. Şekil 4.38'de Şahit numune referans alınarak basınç dayanımındaki değişim yüzdesel olarak verilmiştir.



Şekil 4.38. Revibrasyon-basınç dayanımı grafiği

40 dakika sonra revibrasyon uygulanmış numunenin Şahit numuneye göre basınç dayanımında %19,6 azalma olduğu tespit edilmiştir. Revibrasyon süresinin 60 dakikanın üzerine çıkması durumunda dayanımdaki düşüş miktarı belirgin bir şekilde artmıştır. Şahit ile 60 dakika sonra revibrasyon uygulanmış numune arasında %41,2 basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Şahit ile 80 dakika sonra revibrasyon uygulanmış numune arasında %56 basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Şahit ile 100 dakika sonra revibrasyon uygulanmış numune arasında %67,5 basınç dayanımı azaldığı tespit edilmiştir. Revibrasyon süresinin 60 dakika ve sonrasında dayanım düşüş miktarını belirgin olarak arttırması çimentonun priz başlama süresi ile ilişkili olduğu söylenebilir. Ayrıca deneylerde kullanılan çimentonun yüksek dayanımlı çimento tipinde (CEM I 52,5 R) olması, dolayısıyla hidrasyon ısısının yüksek olmasını beraberinde getirmekte ve priz süresini kısaltmaktadır. Uygulanan ikinci vibrasyon, dozajın normal betona göre çok daha fazla olması nedeniyle uzayan revibrasyon sürelerinde hidrasyon sonucu çimento pastasının kristalleşerek kuvvetli bağlar oluşturmasının engellendiği düşünülmektedir. Sonuç olarak revibrasyon uygulamasının basınç dayanımı olumsuz yönde etkilediği için RPB'nin kalıba yerleştirilmesinde kullanılmayacağı sonucuna varılmıştır.

Taze betonun kalıba yerleştirilmesinde kullanılan diğer bir yöntem de sıkıştırma basıncı uygulamasıdır. Dayanımın artırılması için düşük su/çimento oranı kullanılması işlenebilirliği olumsuz olarak etkilemektedir. İşlenebilirliğin düşük olması betonun yerleştirilmesinde zorluklar çıkarmakta bu da dayanımı düşürmektedir. Bu olumsuz etkiyi, işlenebilirliğin akışkanlaştırıcı katkıları yardımıyla istenilen düzeye getirilmesi sonucu düzeltilebilmesine rağmen, bu seferde kalıp alma süresi uzamakta bu da maliyet ve zaman açısından olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenle koyu kıvamda bulunan beton kalıba boşluksuz olarak sıkıştırma etkisi ile yerleştirilmektedir. Yani temel amaç, düşük işlenebilirlikteki betonu boşluksuz olarak yerleştirebilmektir. Bu yöntemin RPB içinde dayanımı artırıcı bir yerleştirme yöntemi olacağı düşüncesiyle RPB'ye sıkıştırma basıncı uygulanmasına karar verilmiştir.

4.4.1.2. Sıkıştırma basıncının birim hacim ağırlığa etkisi

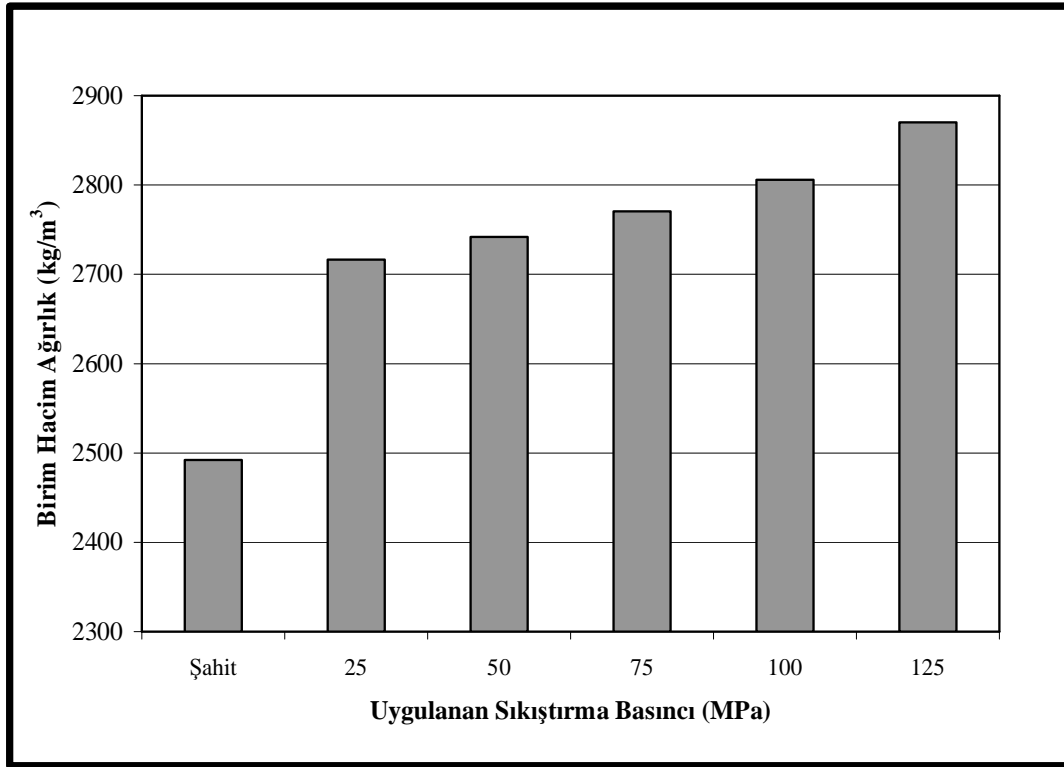
Bölüm 3.3.1.1'de detaylı olarak anlatılan kalıp sistemi ile hazırlanan karışımlara 25, 50, 75, 100, 125 MPa'lık basınçlar uygulanarak numuneler üretilmiştir. Kalıplara doldurulan taze haldeki RPB, pres altında 0,13 MPa/sn'lik bir yükleme hızı ile istenilen sıkıştırma basıncına kadar yüklenmiş ve bu yük altında deformasyonu sabitleninceye kadar beklenerek pistonu tutan aparat sıkıştırılarak presin yükü boşaltılmıştır. Kalıbın içerisinde uygulanan basınç altında 24 saat bekletilen numuneler daha sonra örselenmeden çıkarılmış, sıkıştırma işleminin etkinliğini görmek için numunelerin birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Bulunan bu birim hacim ağırlık değerleri Tablo 4.22 ve Şekil 4.39'da verilmiştir.

Sıkıştırma basıncı uygulanan numunede hava ve su çıkışının olması ve tanelerin birbirine yaklaşması birim hacim ağırlık değerlerinde artışa neden olmuştur. Artış miktarı uygulanan sıkıştırma basıncına göre değişiklik göstermiştir. Karışımlara ait birim hacim ağırlık grafikleri incelendiğinde, 25 MPa'lık bir sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin Şahit RPB'ye göre birim hacim ağırlığının %9 arttığı görülmektedir. Deney sırasında çıkan sıvı (su+süperakışkanlaştırıcı) bir kaptan toplanarak çıkan sıvı miktarı belirlenmiştir. Sıkıştırma basıncı 25 MPa olan RPB'de çıkan sıvı miktarının yapılan hesaplamalar sonucunda, karışıma giren sıvı miktarının

yaklaşık %20'si kadar olduğu görülmüştür. Hesaplama sonucunda çıkan sıvı miktarı RPB'nin birim hacim ağırlığını %3,1 arttırmaktadır. Fakat deney sonucu ölçülen RPB'nin birim hacim ağırlık değerinin yaklaşık %6 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlık değerinde %6'lık bu farkın tanelerin birbirine yaklaşması yani sıkışması sonucu olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.22. Sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'lerin birim hacim ağırlık değerleri

Sıkıştırma basıncı (MPa)	Birim hacim ağırlık (kg/m ³)
Şahit	2492
25	2717
50	2742
75	2771
100	2806
125	2870



Şekil 4.39. Sıkıştırma basıncının birim hacim ağırlığa etkisi

Sıkıştırma basıncı 50 MPa olan RPB, 25 MPa olan RPB'ye göre %1, Şahit RPB'ye göre ise %10 birim hacim ağırlık değerinin arttığı görülmüştür. Sıkıştırma basıncı 50 MPa olan RPB'de çıkan sıvı miktarının yapılan hesaplamalar sonucunda, karışıma giren sıvı miktarının yaklaşık %30'u kadar olduğu görülmüştür. Hesaplama sonucunda çıkan sıvı miktarı RPB'nin birim hacim ağırlığını Şahit RPB'ye göre %6,8 arttırmaktadır. Fakat deney sonucu ölçülen RPB'nin birim hacim ağırlık değerinin sıkışma sonucu %3,2 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Daha önce yapılmış bir çalışmada 50 MPa'lık bir sıkıştırma basıncında deney boyunca giren sıvının %20-25'nin geri çıktığını ve relatif sıkışık yoğunluğun %2 den daha fazla arttığını ifade edilmiştir [5]. Bu çalışma ile karşılaştırıldığında bulunan sonuçlar birbiriyle benzerlik göstermektedir.

Sıkıştırma basıncı 75 MPa olan RPB, 50 MPa olan RPB'ye göre %1 ve Şahit RPB'ye göre ise birim hacim değerini %11 arttırdığı tespit edilmiştir. Sıkıştırma basıncı 75 MPa olan RPB'de çıkan sıvı miktarının bir önceki sıkıştırma basıncı ile yaklaşık aynı olduğu ve karışıma giren sıvının yaklaşık %33'ünü oluşturduğu hesaplanmıştır. Bu sıkıştırma basıncından sonra çıkan sıvı miktarındaki artış oranının da azalma görülmüştür. Sıkıştırma basıncı 100 MPa olan RPB'nin birim hacim değeri, 75 MPa olan RPB'ye göre %1,3 ve Şahit RPB'ye göre ise %12,3 arttığı tespit edilmiştir. Sıkıştırma basıncının 125 MPa çıkması durumunda birim hacim ağırlık şahit RPB'ye göre %15 arttığı tespit edilmiştir. 125 MPa sıkıştırma basıncında çıkan sıvı miktarı önceki sıkıştırma basıncından farklı olarak artış göstermiş ve karışıma giren sıvı miktarının yaklaşık %35'inin geri çıktığı görülmüştür. Sonuç olarak 25 MPa'lık bir sıkıştırma basıncı, numunenin içerisindeki büyük hava boşluklarını ve serbest haldeki suyun çıkması için yeterli geldiği görülmüştür.

4.4.1.3. Sıkıştırma basıncının basınç dayanımına etkisi

Sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'ler, bir önceki bölümde belirlenen 3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 300°C etüv kürü uygulanarak, 7 ve 28 günlük basınç dayanımına kadar normal su küründe bekletildikten sonra basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Basınç dayanım testinde, yükleme hızı 0,25 MPa/sn olarak ayarlanmış

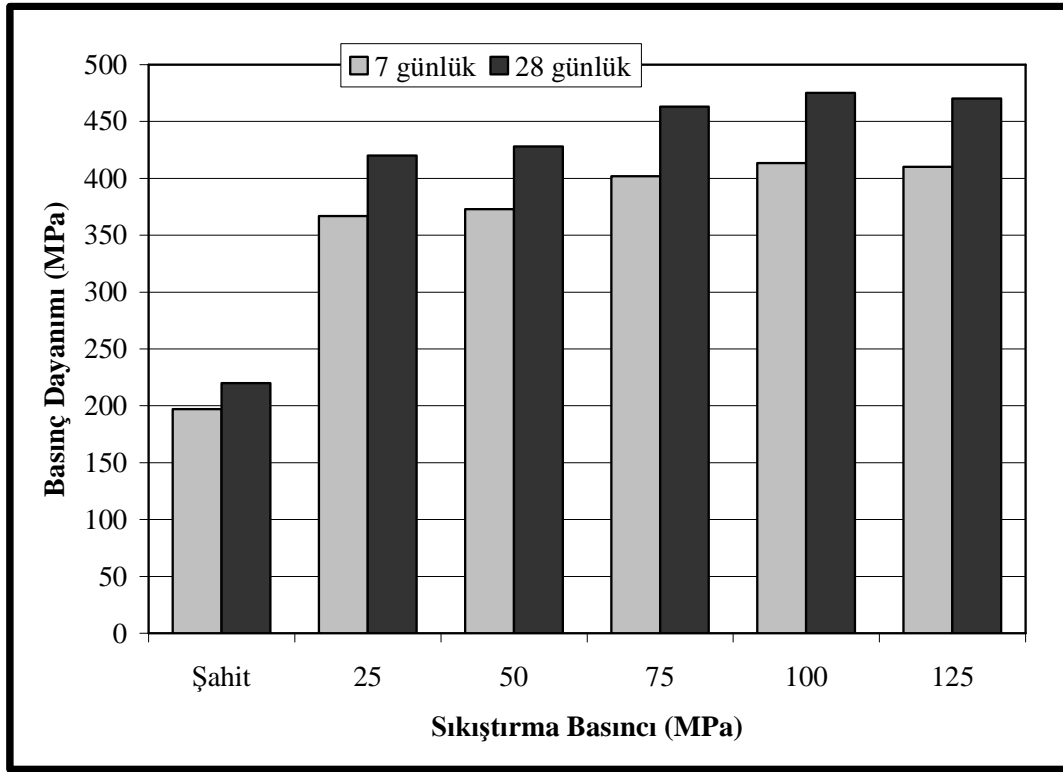
ve numuneler kırılıncaya kadar bu hızda yüklenmiştir. Şekil 4.40'da görüldüğü gibi numuneler içerisinde bulunan lifler sayesinde parçalanmamıştır. Sıkıştırma basıncı uygulanan numunelerin, 7 ve 28 günlük basınç dayanım sonuçları Tablo 4.23'de ve Şekil 4.41'de verilmiştir. Diğer numunelere ait grafikler Ek C'de verilmiştir.



Şekil 4.40. Basınç deneyi sonucu oluşan kırılma şekilleri

Tablo 4.23. Sıkıştırma basıncının basınç dayanımına etkisi

Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	
	7 Günlük	28 Günlük
Şahit	197	220
25	367	420
50	373	428
75	402	463
100	414	475
125	410	470

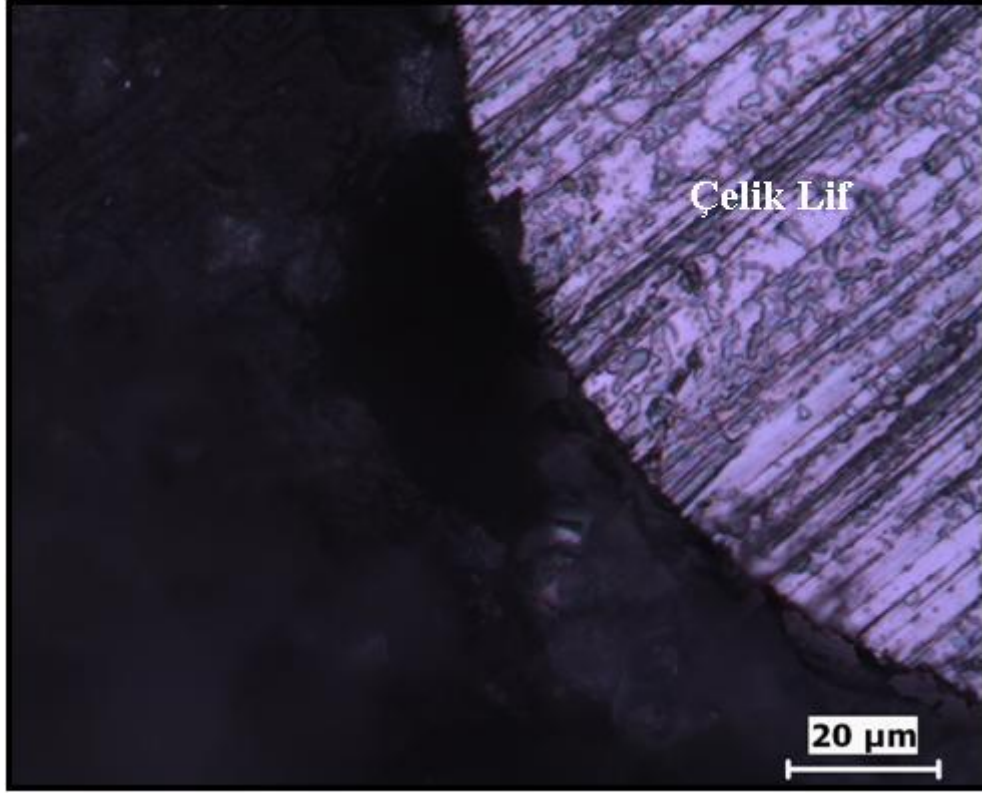


Şekil 4.41. Sıkıştırma basıncı-basınç dayanımı grafiği

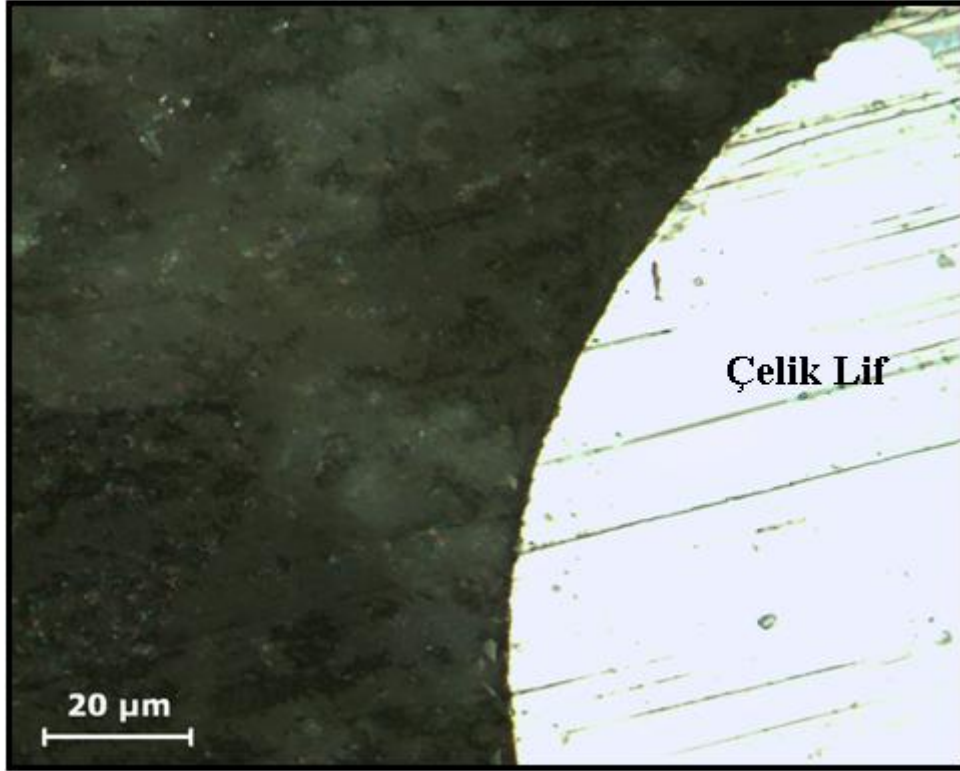
Karışıma ait basınç dayanımı grafiği incelendiğinde, 25 MPa'lık bir sıkıştırma basıncı uygulanan numunenin, Şahit numuneye göre basınç dayanımında %91 oranında artış olmuştur. Bu artış, 50 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış numunede %95 olmuştur. Basınç dayanımı, sıkıştırma basıncı 75 MPa'a çıkarıldığında bu artış %111 yükselmiştir. 100 ve 125 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış numunelerde Şahite göre bu artış oranları sırasıyla %116 ve %114 oluşmuştur. Buradan görüleceği üzere sıkıştırma basıncındaki en yüksek basınç dayanımı artışı 100 MPa'lık sıkıştırma basıncı uygulanan numunede gerçekleşmiş ve dayanım daha yüksek sıkıştırma basıncında düşmüştür. Bu sonuçlara göre sıkıştırma basıncı uygulaması sıkıştırmadaki basınç düzeylerine bağlı olarak değişmekle birlikte, şahit numunenin basınç dayanımının yaklaşık 2 katına çıktığı görülmüştür.

Sıkıştırma basıncı uygulanan numunelerde, hava ve su çıkışının olması ve tanelerin birbirine yaklaşması RPB'nin boşluk yapısında olumlu etki yaparak basınç dayanımını değerlerinde artışa neden olmuştur. Ayrıca içyapı numunelerinin incelenmesi sonucunda hem boşluk yapısının düzeldiği hem de RPB içerisinde

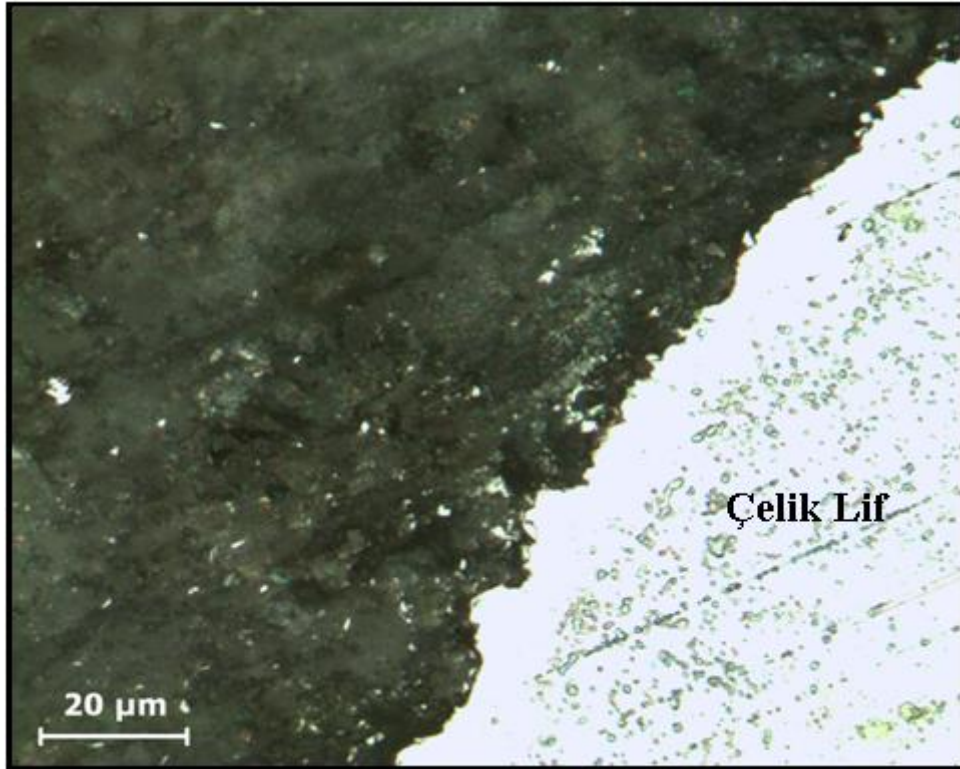
bulunan elik lifin beton ile arasındaki ara yzeyinde kusursuz denebilecek bir yapı oluştuğu grlmştir. Sıkıştırma basıncı uygulanan numunelere ait içyapı görüntüleri Şekil 4.42-47’de verilmiştir.



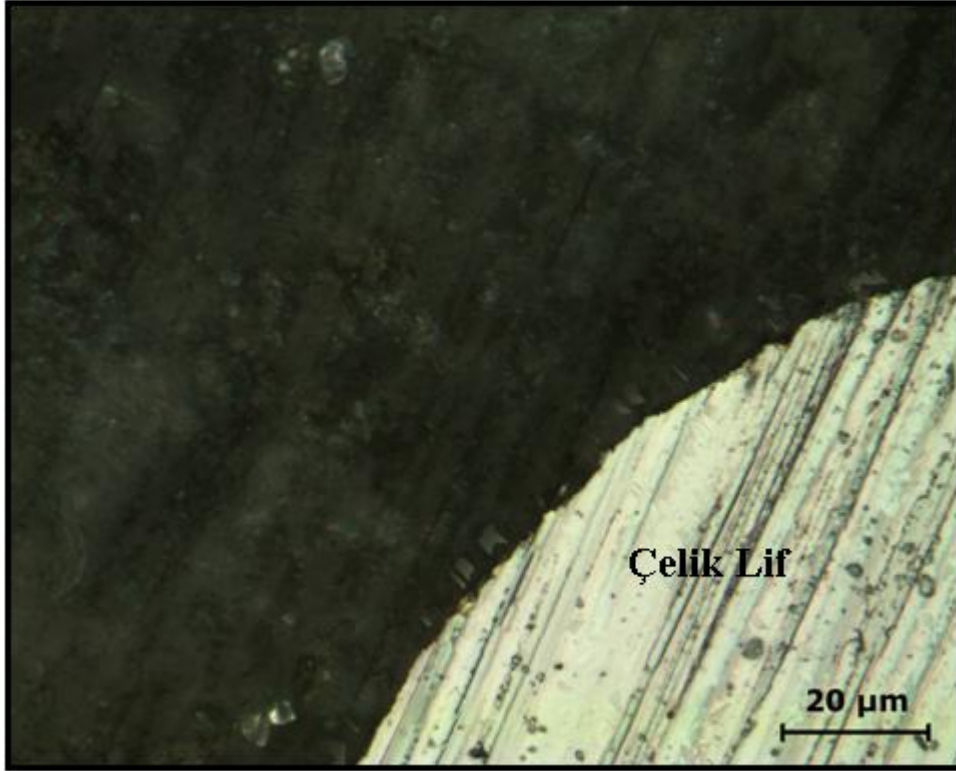
Şekil 4.42. Şahit numuneye ait lif-pasta ara yzeyi



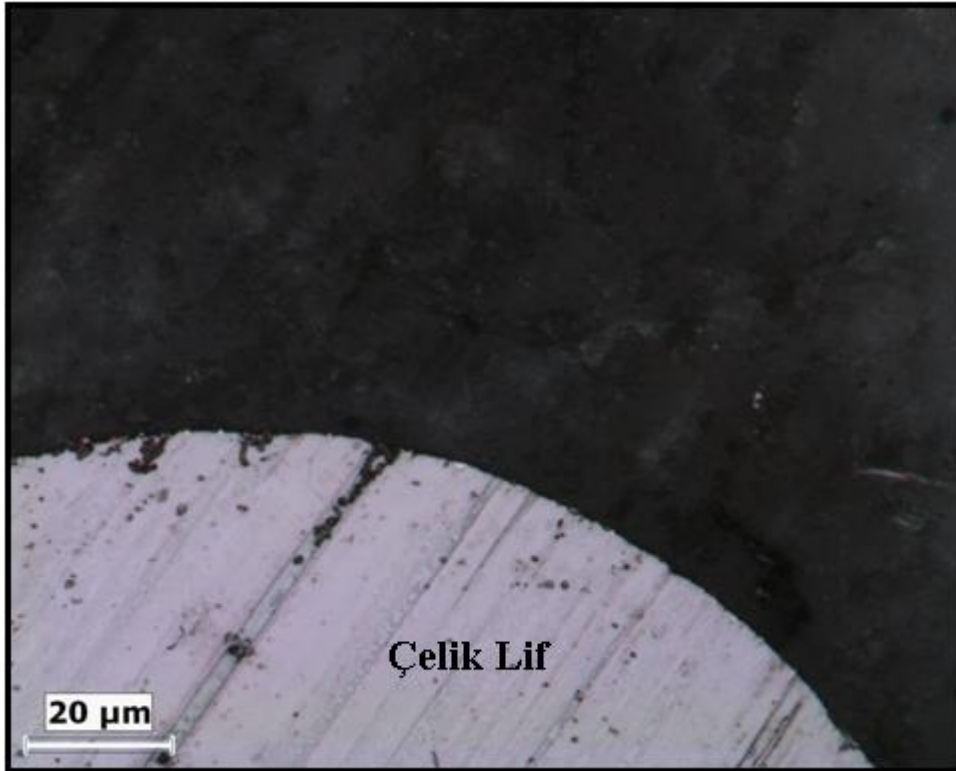
Şekil 4.43. 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi



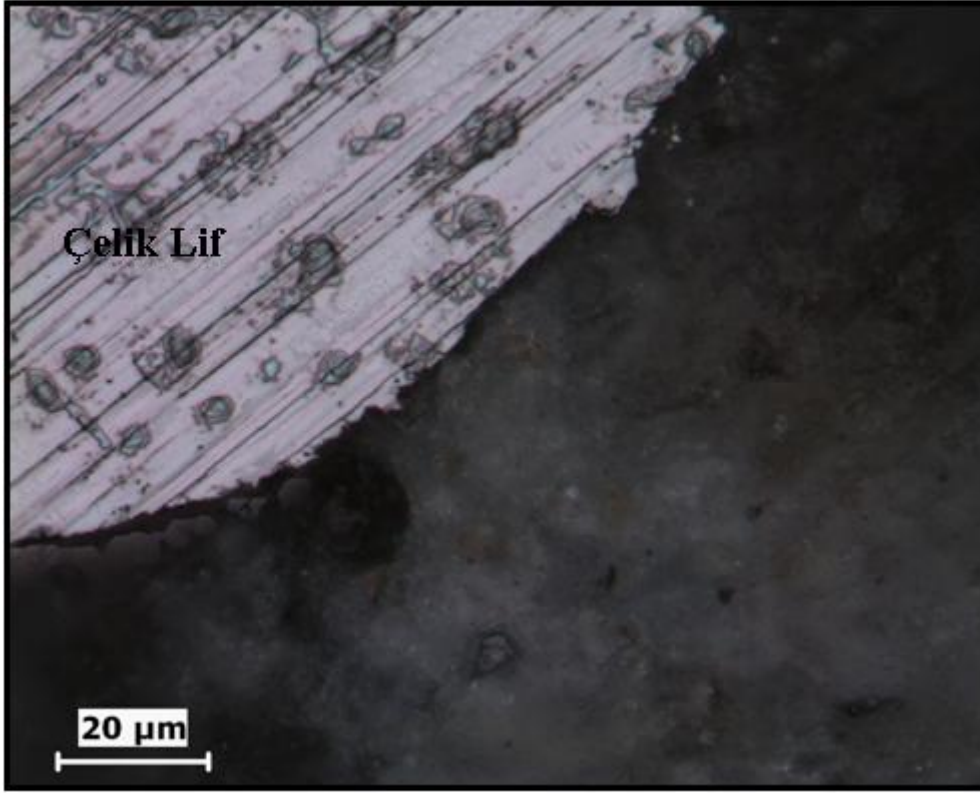
Şekil 4.44. 50 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi



Şekil 4.45. 75 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi



Şekil 4.46. 100 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi



Şekil 4.47. 125 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait lif-pasta ara yüzeyi

Sıkıştırma basıncının 75 MPa'dan, 100 MPa çıkması basınç dayanımında kayda değer bir artışa sebep olmamıştır. Sıkıştırma basıncının 100 MPa'dan 125 MPa çıkmasında ise, basınç dayanımında bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Dayanımdaki bu düşüşün sebebi, yüksek basınç altında, çimentonun hidratasyonu için gerekli olan suyun da dışarı çıkması ve hidratasyonun tam olarak gerçekleşmemesi sonucu olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, uygulanan basınç kuvveti, beton içerisindeki malzemelerin ve özellikle çelik lifin, boyutsal olarak değişime uğratan bir yük düzeyi olduğu söylenebilir. Basınç kuvvetinin kalkması ile birlikte tekrar eski halini almak isteyen malzemeler, betonda içsel gerilmeler oluşturarak içyapıda çatlaklara neden olabilir.

Bu çalışmada, 100 MPa'lık bir sıkıştırma basıncı ile en yüksek basınç dayanımına (475 MPa) ulaşılmıştır. Bu değer şu ana kadar ülkemizdeki çalışmalarda elde edilen en yüksek beton basınç dayanımı olma özelliğindedir. Dünya da ise en yüksek basınç dayanımı RPB ile ilgili yapılan ilk çalışmalarda, 490 MPa ile 810 MPa olarak bildirilmektedir [5]. Çok yüksek basınç dayanımı elde etmek için yapılan bir

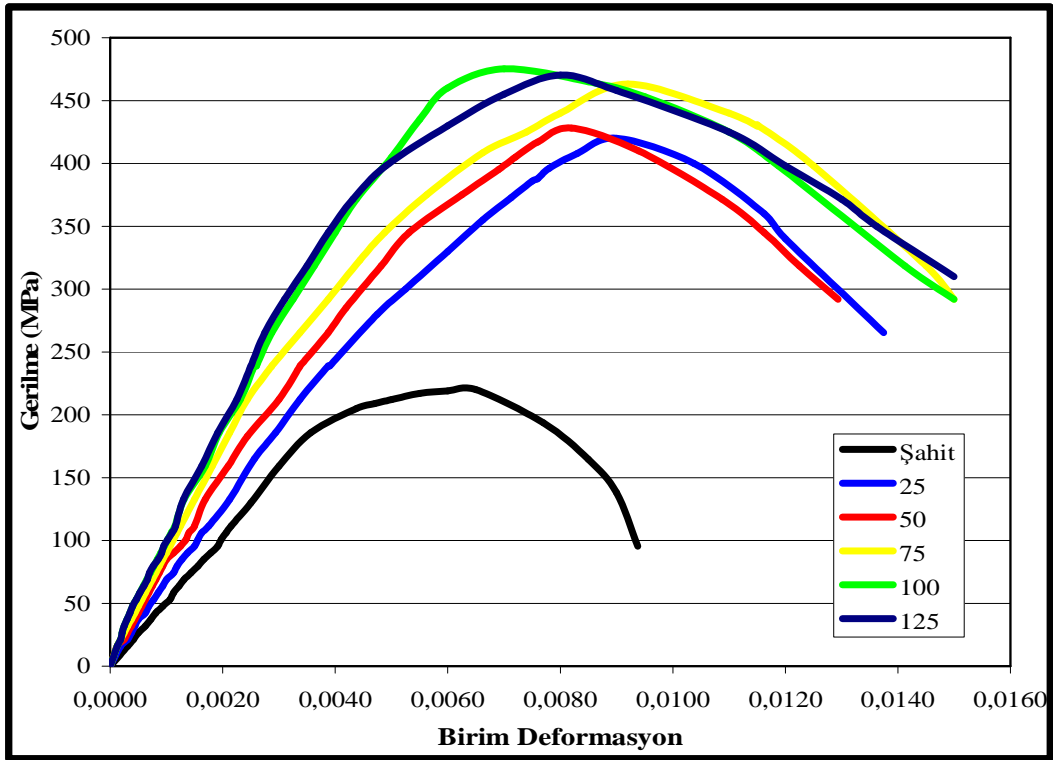
çalışmada ise araştırmacılar 422 MPa ile 520 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir [19]. Yine benzer bir çalışmada da RPB örneklere kalıptan çıkartıldıktan 2 gün sonra, 7 gün 250°C sıcak kürü ve ayrıca RPB numunelerine taze haldeyken 50 MPa basınç uygulamışlardır. Basınç dayanımı bakımından en yüksek dayanımı 487 MPa ile RPB numunelerinden elde etmişlerdir [25].

4.4.1.4. Sıkıştırma basıncının elastisite modülüne etkisi

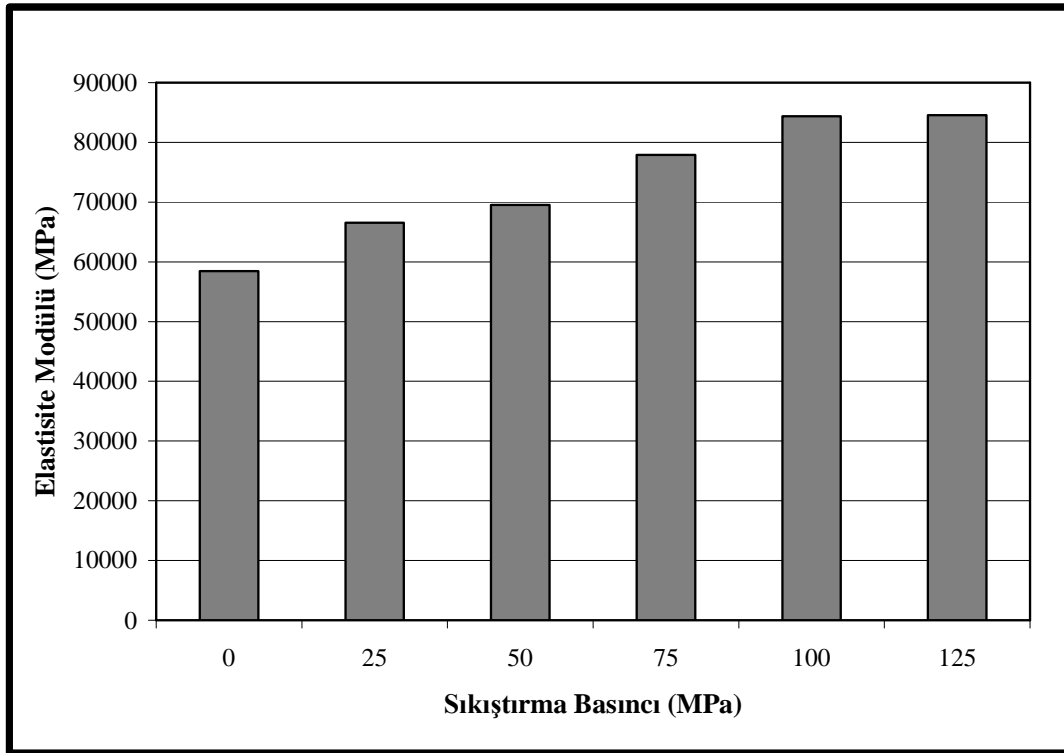
Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'lerin elastisite modülleri bulunarak, sıkıştırma basıncının elastisite modüllerine etkisi araştırılmıştır. Bütün numuneler 28. günün sonunda basınç dayanımı testine tabi tutularak, gerilme-deformasyon grafikleri çizilmiş ve bu grafikler üzerinden elastisite modülleri hesaplanmıştır. (Tablo 4.24. Şekil 4.48, 49).

Tablo 4.24. Sıkıştırma basıncının, elastisite modülüne etkisi

Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Şahit	58469
25	66542
50	69547
75	77896
100	84372
125	84562



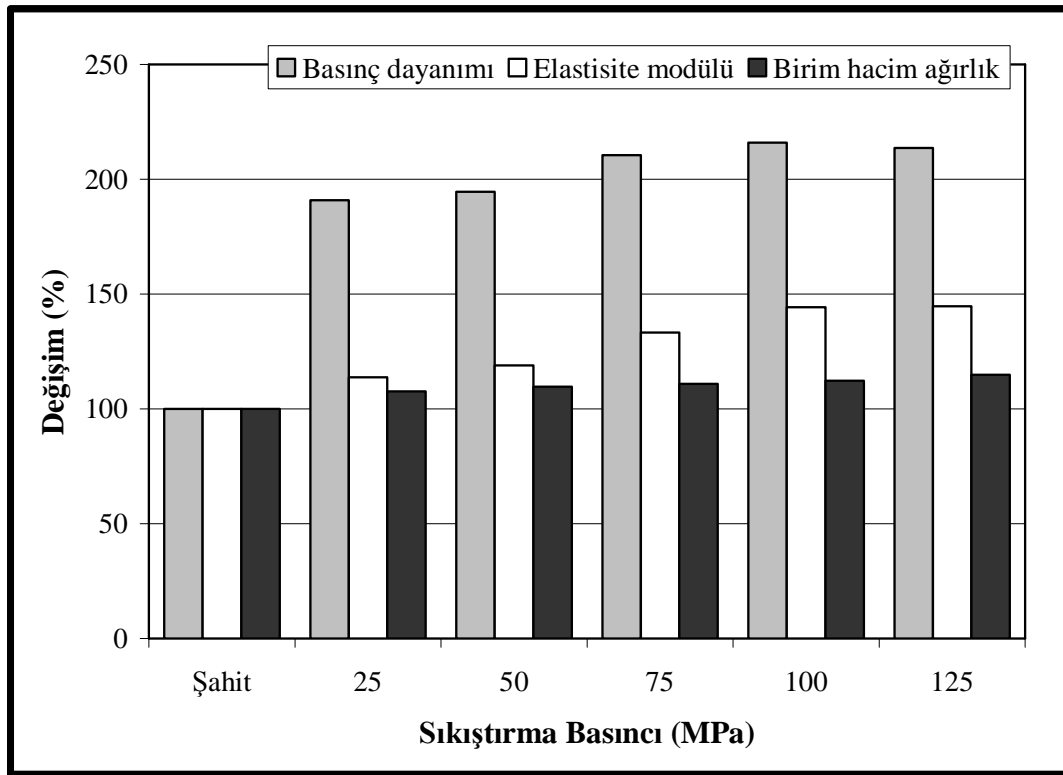
Şekil 4.48. Sıkıştırma basıncı uygulanmış numunelere ait gerilme-deformasyon grafiği



Şekil 4.49. Sıkıştırma basıncının elastisite modülüne etkisi

Yapılan hesaplamalar sonucunda elastisite modüllerinin, sıkıştırma basıncı ile birlikte arttığı görülmüştür. Elastisite modüllerindeki en yüksek artış oranı, %14 ile basınç dayanımında olduğu gibi 25 MPa sıkıştırma basıncında gerçekleşmiştir. Bu değerde basınç dayanımının yaklaşık 2 kat arttığı düşünüldüğünde elastisite modülü artış oranının düşük olduğu görülmektedir. Sıkıştırma basıncı, lif ile pasta ara yüzeyindeki aderansı arttırmakta ve buna bağlı olarak da süneklilik artmaktadır. Süneklilikte elastisite modülünün düşmesine neden olacağı için elastisite modülü artış oranı basınç dayanımı artış oranına göre düşük olmuştur (Şekil 4.50).

Elastisite modülü, 25 MPa ile 50 MPa'lık sıkıştırma basıncı arasında %4,5, 50 MPa ile 75 MPa'lık sıkıştırma basıncı arasında %12, 75 MPa ile 100 MPa'lık sıkıştırma basıncı arasında %8 artarken 100 MPa ile 125 MPa'lık sıkıştırma basıncı arasında %0,2 arttığı görülmüştür.



Şekil 4.50. Sıkıştırma basıncının, birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve elastisite modülüne etkisi

Elastisite modülü 100 MPa'a kadar dayanım ile birlikte artış gösterirken, bu basınçtan sonra basınç dayanımının azalmasına rağmen %0,2 oranında artış

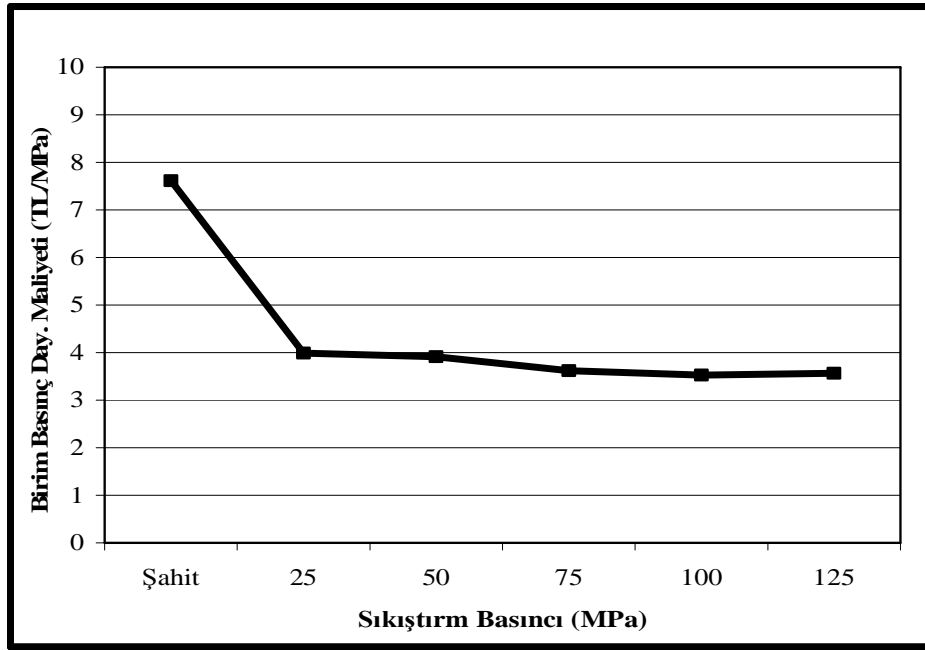
gösterdiği görülmüştür. Bu artış, yüksek basınç altında sıkıştırma sonucu betonun daha gevrek bir hal almasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda numunenin basınç dayanımının da yüksek olması beklenirken, yüksek basınçta beton için yararlı olan suyun çıkması ki, bu durum betonun birim hacim ağırlığının artmasına neden olurken hidrasyon için olumsuz etki yapmıştır.

4.4.1.5. Sıkıştırma basıncının birim dayanım maliyetine etkisi

Sıkıştırma basıncı maliyet açısından da incelenmiş, bunun için Tablo 4.10'daki %4 lif içeren RPB'nin birim maliyet değeri (1676 TL/m³) kullanılmıştır. Bu değer dikkate alınarak birim basınç dayanım maliyetleri hesaplanarak Tablo 4.25'de verilmiştir. Bu değerlerler kullanılarak Şekil 4.51'deki grafik elde edilmiştir.

Tablo 4.25. Sıkıştırma basıncına göre birim dayanım maliyeti

Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Birim Basınç Day. Maliyeti (TL/MPa)
Şahit	7,61
25	3,99
50	3,91
75	3,62
100	3,53
125	3,56



Şekil 4.51. Sıkıştırma basıncının birim maliyet üzerindeki etkisi

Basınç dayanımı birim maliyetinin, 25 MPa sıkıştırma basıncında belirgin bir şekilde düştüğü, 25-100 MPa aralığında düşmeye devam ettiği ve daha sonra 125 MPa sıkıştırma basıncında çok az bir miktar arttığı görülmüştür. Birim basınç maliyetindeki en önemli değişim Şahit RPB ile 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB arasında olmuştur. Bu aralıkta birim basınç dayanımı maliyeti yaklaşık olarak yarıya düştüğü görülmektedir. Maliyetteki bu düşüş, sıkıştırma basıncı uygulamasının bir maliyet getireceği düşünüldüğünde son derece önemli olmaktadır.

Tablo 4.6 ile Tablo 4.23 karşılaştırıldığında, 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin basınç dayanımını, sıkıştırma basıncı uygulamadan elde edebilmek için yaklaşık hacimce %10 oranında lif kullanılması gerekmektedir. Lif hacmi %10 olan RPB'nin maliyeti 3366 TL/m³'dür. 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin maliyeti ise 1676 TL/m³ + sıkıştırma basıncı ekipmanları (basınç uygulayabilmek için yatırım maliyeti) olmaktadır. Bu iki RPB arasında malzeme maliyeti açısından 2 kat fark bulunmaktadır. Bu farkın, prefabrik olarak bir ürünün seri bir şekilde üretilmesi durumunda sıkıştırma basıncı ekipmanları ek maliyetleri ile kapanamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle prefabrik üretim için sıkıştırma basıncı uygulamasının ekonomik açıdan uygun olabileceği ortaya çıkmaktadır.

4.4.1.6. Optimum sıkıştırma basıncının belirlenmesi

Bölüm 3.3.1.2.'de anlatılan yöntemle göre matematiksel bir model kurulmuştur. Bu modelde 6 farklı sıkıştırma basıncı değişken olarak kabul edilmiş ve bu değişkenlerden etkilenen, basınç dayanımı, elastisite modülü, birim hacim ağırlık, maliyet ve sıkıştırma basıncının uygulanmasında yaşanan zorluklar olmak üzere 5 adet sonuç ele alınmıştır. Tablo 4.26'da tüm sonuçlar göz önüne alınarak 1 ile 9 arasında önem dereceleri belirlenmiş ve bunların normalizasyon işlemi sonuçları Tablo 4.27'de verilmiştir. Tablo 4.28'de ise sıkıştırma basıncına göre bulunan sonuçların 0 ile 1 değerleri arasında olması için normalizasyon işlemi uygulanmış ve sonuçları verilmiştir. Normalizasyon işlemi yapılmış 5x5'lik matrisin her bir satır ortalamaları bulunarak 1x5'lik matris elde edilmiş ve matrisin bu değerleri o satıra ait olan sonucun karar vermedeki ağırlık değeri olmuştur.

Tablo 4.26. Sıkıştırma basıncına göre elde edilen sonuçların önem dereceleri

	Basınç Dayanımı	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırlık	Maliyet	Zorluk
Basınç Dayanımı	1,00	6,00	7,00	1,00	1,00
Elastisite Modülü	0,17	1,00	1,00	0,17	0,17
Birim Hac. Ağırlık	0,14	1,00	1,00	0,17	0,17
Maliyet	1,00	6,00	6,00	1,00	1,00
Zorluk	1,00	6,00	6,00	1,00	1,00

Tablo 4.27. Sıkıştırma basıncına göre elde edilen sonuçların önem derecelerinin normalizasyon sonuçları

	Basınç Dayanımı	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırlık	Maliyet	Zorluk
Basınç Dayanımı	0,30	0,30	0,33	0,30	0,30
Elastisite Modülü	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Birim Hac. Ağırlık	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Maliyet	0,30	0,30	0,29	0,30	0,30
Zorluk	0,30	0,30	0,29	0,30	0,30

Tablo 4.28. Lif oranına göre elde edilen sonuçların 0-1 değerleri arasında normalize edilmesi

	Basınç Dayanımı	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırl.	Maliyet	Zorluk
E_k	220,09	84562,00	2870,12	7,61	5,00
E_b	475,24	58469,00	2492,30	3,53	0,00
Şahit	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00
25	0,78	0,69	0,41	0,89	0,80
50	0,82	0,58	0,34	0,91	0,60
75	0,95	0,26	0,26	0,98	0,40
100	1,00	0,01	0,17	1,00	0,20
125	0,98	0,00	0,00	0,99	0,00

Sıkıştırma basıncına bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarının normalizasyon yapılarak oluşturulan 6x5 matris ile her bir sonucun ağırlık matrisi çarpılmış ve elde edilen matrisin sütunları toplanarak en büyük değere ait sıkıştırma basıncı optimum sıkıştırma basıncı olarak belirlenmiştir (Tablo 4.29). Tablo 4.29'daki verimlilik değerlerinden en büyük değer 25 MPa sıkıştırma basıncına ait olduğu görülmektedir.

Tablo 4.29. Sıkıştırma basıncına göre verimlilik değerleri

Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Basınç Dayanımı	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırl.	Maliyet	Zorluk	Verimlilik Değerleri
Şahit	0,00	0,05	0,05	0,00	0,30	0,40
25	0,24	0,03	0,02	0,26	0,24	0,80
50	0,25	0,03	0,02	0,27	0,18	0,74
75	0,29	0,01	0,01	0,29	0,12	0,73
100	0,31	0,00	0,01	0,30	0,06	0,67
125	0,30	0,00	0,00	0,30	0,00	0,60

Sonuç olarak sıkıştırma basıncının zorluğu, içyapı görüntüleri, birim hacim ağırlık değerleri, basınç dayanımı artış oranları ve birim basınç dayanım maliyetleri göz önüne alındığında, 25 MPa'lık bir sıkıştırma basıncının betonun boşluksuz olarak yerleştirilmesi ve optimum maliyet için yeterli düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

4.4.2. Sıkıştırma basıncının eğilme numunelerine etkisi

Lif içeriğinin belirlenmesi için yapılan eğilme deneyinde, RPB'nin lifler ile olan aderansının yeterli gelmediği ve liflerin beton içerisinden sıyrılarak çıktığı görülmüştür (Şekil 4.52). Bu durum eğilme numunelerinin bütün mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Betonun lif ile aderansının artırılması, betonun boşluk yapısı yani taneler arasındaki boşluğun en aza indirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu boşluk yapısını en aza indirmek için betonun yerleştirilmesi sırasındaki işlemler çok önemlidir. RPB akıcı bir kıvamda olduğu için kalıba kendiliğinden yerleşebilmektedir. Fakat bu durumun, yerleştirme problemlerini ortadan kaldırdığı düşünülse de boşluksuz bir yapı elde etmek için yeterli olmadığı görülmektedir (Şekil 4.52).



Şekil 4.52. Eğilme deneyi sonucu liflerin sıyrılarak beton içerisinden çıkması

RPB'de kullanılan çelik liflerin çapı 0,16 mm ve kancasız oluşu bu liflerin beton ile iyi bir aderans sağlaması için çevresinin ince taneli bir pasta ile sarılmasını zorunlu kılmaktadır. RPB'yi oluşturan malzemelerin tamamının mikron düzeyinde olması bu zorunluluğu yerine getirmektedir. Ancak normal betona göre çok az da olsa ince taneli pasta içerisinde boşluklar bulunmaktadır. Boşlukların en aza indirilmesi ile

RPB'nin içerisinde bulunan mikron boyutundaki kancasız lif ile yüksek bir aderans oluşturacağı düşünülmektedir.

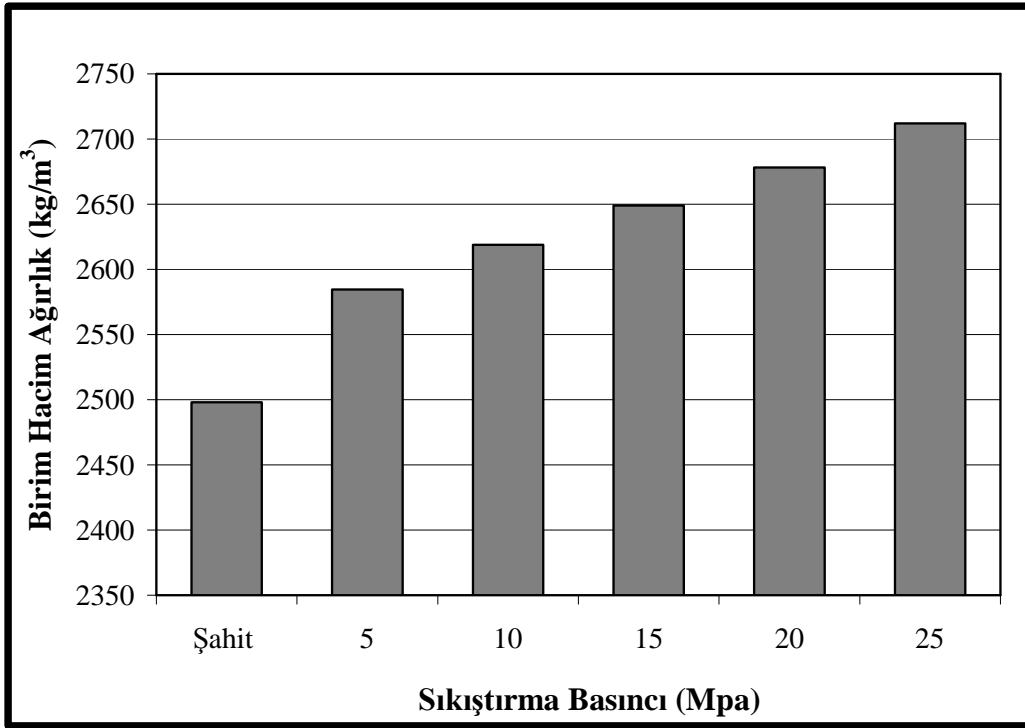
Basınç numunelerine sıkıştırma basıncının uygulanmasının dayanıma büyük katkı sağladığı görülerek sıkıştırma basıncının eğilme numunelerinde de olumlu etki yapacağı düşünülmüştür. Literatürde bu tür bir çalışmaya rastlanılmadığı için uygulanacak basıncın nasıl, hangi düzeyde ve ne kadar süre uygulanması gibi parametreler hakkında bir bilgi mevcut değildir. Eğilme numunelerine sıkıştırma basıncının uygulanmasında, basınç deney numunelerine uygulanan sıkıştırma basıncı çalışması bir rehber olarak dikkate alınmıştır. Basınç numunelerine uygulanan 25 MPa'lık sıkıştırma basıncının dayanımında yaklaşık iki kat bir artış sağlaması bu deney içinde uygulanacak basınçların bu değerden daha fazla olmasının verimli olmayacağı düşünülmüş ve daha yüksek basınç kuvvetlerinin numunenin geometrisi düşünüldüğünde eğilme numunelerinde uygulanmasının zor olacağı ön görülmüştür. Ayrıca uygulamaya yönelik olarak da, eğilmeye çalışan elemanların boyutlarının büyüklüğü göz önüne alındığında bu kalıplara, yüksek basıncın uygulanabilirliğinin pek mümkün olamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle sıkıştırma basıncının 5, 10, 15, 20, 25 MPa'lık basınç kuvvetlerinde uygulanmasına karar verilmiştir.

4.4.2.1. Eğilme numunelerinde sıkıştırma basıncının birim hacim ağırlığa etkisi

Eğilme deneyi numune boyutları, 50 mm genişlikte, 300 mm uzunluğunda ve yaklaşık 50 mm yüksekliğindedir. Numune boyutunun yüksekliği uygulanan sıkıştırma basıncına göre bir miktar farklılık göstermektedir. Daha önce belirlenmiş olan 24 numaralı karışıma hacimce, %4 oranında mikro lif ikame edilerek karışım hazırlanmıştır. Numunelere, Bölüm 3.3.1.3'de detayları verilen sistem sayesinde, taze haldeki betona sıkıştırma basıncı uygulanmıştır. Eğilme numuneleri üzerine uygulanan ve priz sonuna kadar devam eden sıkıştırma basıncının ilk çatlak ve eğilme dayanımı, kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi gibi özelliklere etkisi araştırılmıştır. Numunelerin birim hacim değerleri bulunarak sıkıştırma basıncının etkili olarak uygulanıp uygulanmadığı test edilmiştir (Tablo 4.30, Şekil 4.53).

Tablo 4.30. Sıkıştırma basıncı uygulamasının birim hacim ağırlığa etkisi

Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
Şahit	2498
5	2585
10	2619
15	2649
20	2678
25	2712



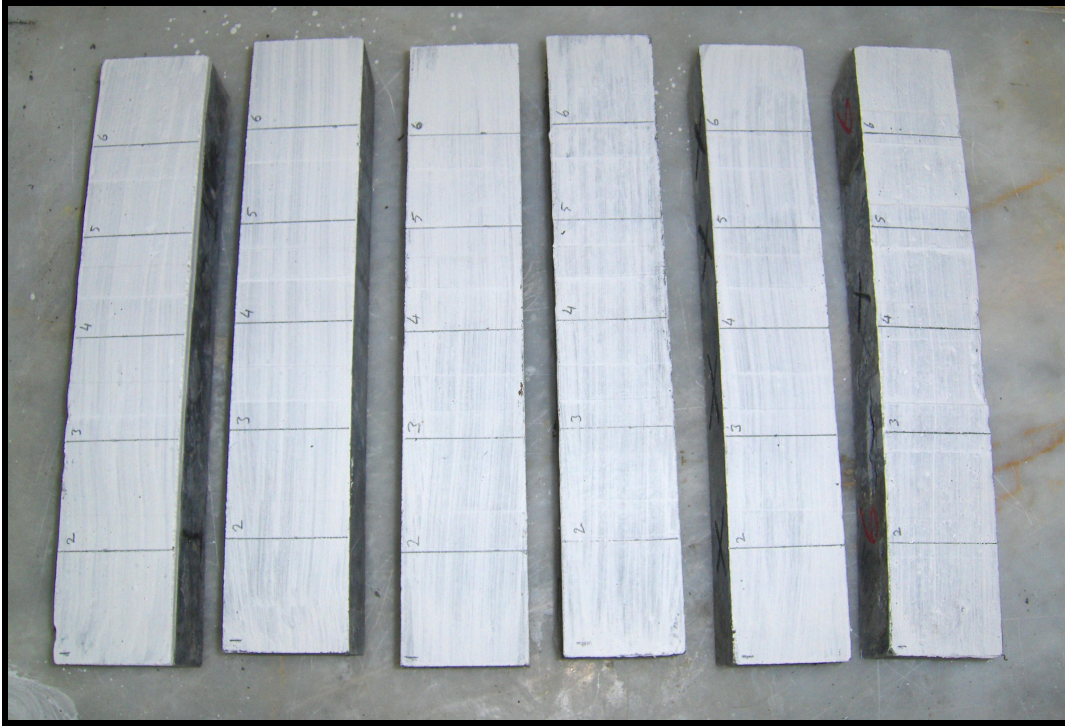
Şekil 4.53. Sıkıştırma basıncının birim hacim ağırlığa etkisi

Birim hacim ağırlık değerleri sıkıştırma basıncıyla artmaktadır. Bunun sebebi olarak basınç numunelerinde olduğu gibi sıkıştırmayla birlikte, suyun ve havanın dışarıya çıkması ve tanelerin birbirine yaklaşması birim hacim ağırlık değerinin artmasına neden olmuştur. Birim hacim ağırlık değeri, 5 MPa'lık sıkıştırma basıncı, Şahit RPB'ye göre %3,5'lik bir artış gösterirken, 25 MPa sıkıştırma basıncına kadar yaklaşık her bir sıkıştırma basıncı aralığında %1 artmıştır. Şahit ile 25 MPa

sıkıştırma basıncı uygulanan RPB arasında birim hacim ağırlık değerinin toplam %8,6 arttığı görülmüştür. Bu artış değeri, 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış basınç numunesinin birim hacim değeri ile kıyaslandığında birbirine yakın olduğu görülmektedir.

4.4.2.2. Eğilme numunelerinde sıkıştırma basıncının eğilme parametrelerine etkisi

Numunelerin, ilk çatlak oluşumu ve ilerleyişiyle çatlak oluşan bölgeyi tespit edebilmek için bir yüzeyi beyaza boyanıp 5 cm'lik dilimlere ayrılarak deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.54). Eğilme deneyi, numuneler kırılıncaya kadar devam ettirilmiş ve yük-sehim eğrileri çizilmiştir (Şekil 4.55).

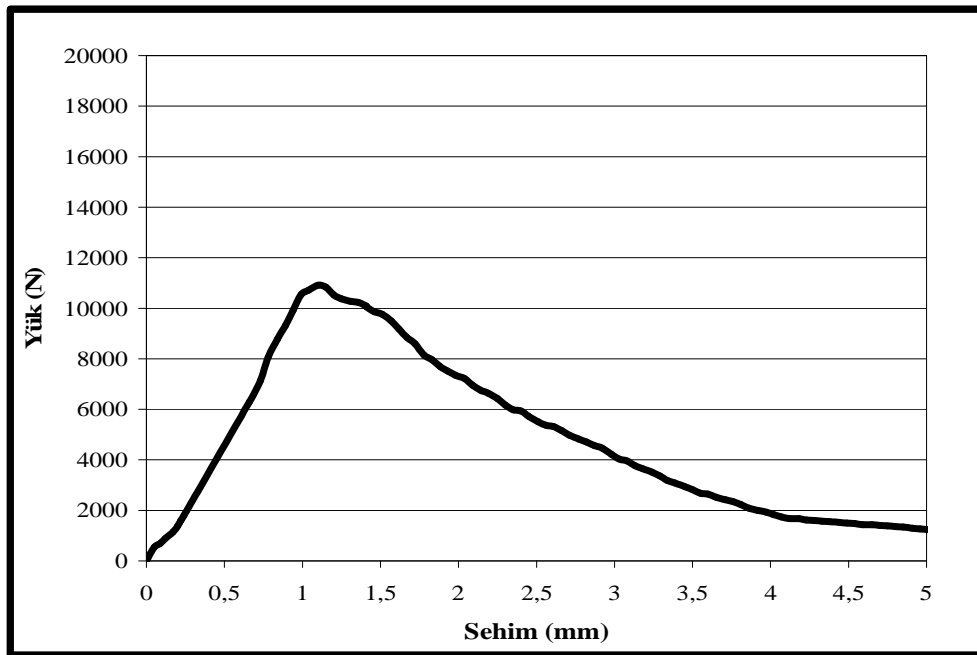


Şekil 4.54. Deneye hazır hale getirilmiş numuneler



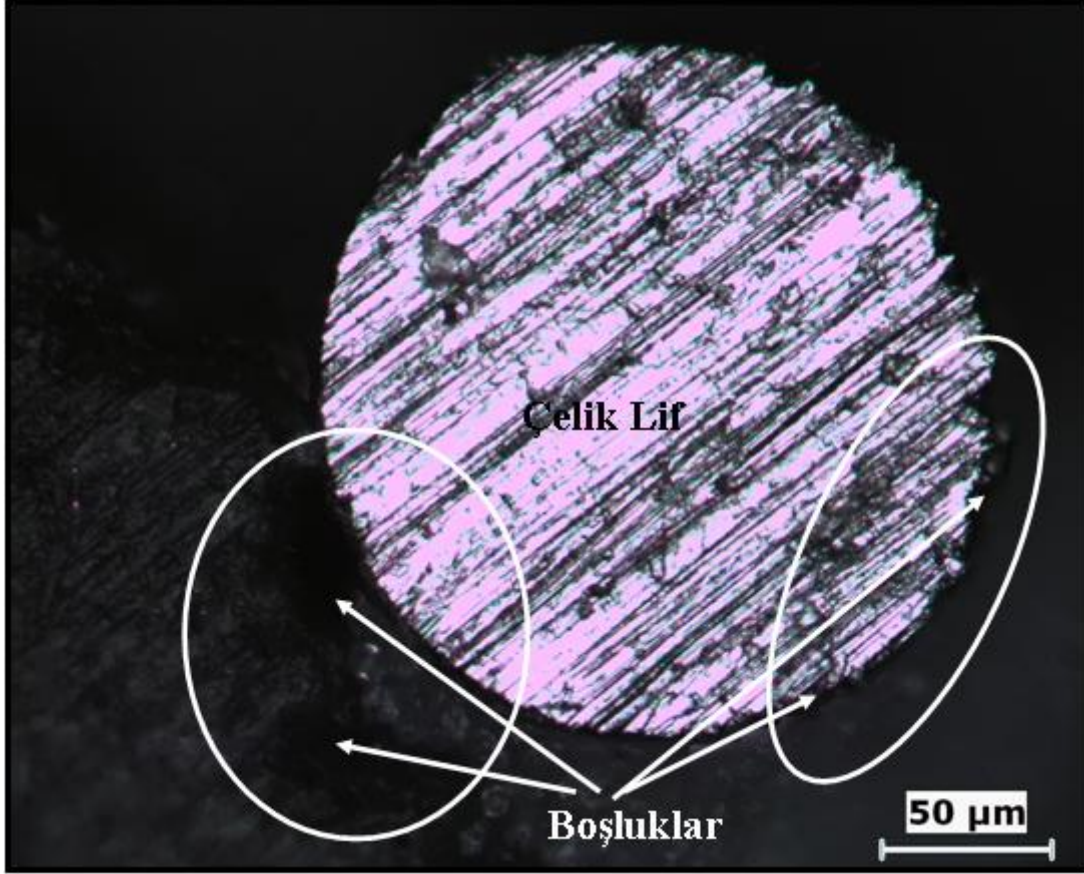
Şekil 4.55. Eğilme deneyinin uygulanması

Şahit RPB'ye ait yük sehim grafiği Şekil 4.58'de verilmiştir. Şahit RPB'nin ilk çatlak yükü 10530 N, çatlakın oluştuğu sehim 0,99 mm olmuştur. Maksimum yük ise 10910 N ve son sehim 5,38 mm olarak ölçülmüştür. Numunenin ilk çatlak dayanımı 21,06 MPa, eğilme dayanımı 21,92 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 9,72 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 22,42 Nm ve kırılma enerjisi 9555,36 joule/m² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.56. Şahit RPB'ye ait yük-sehim grafiği

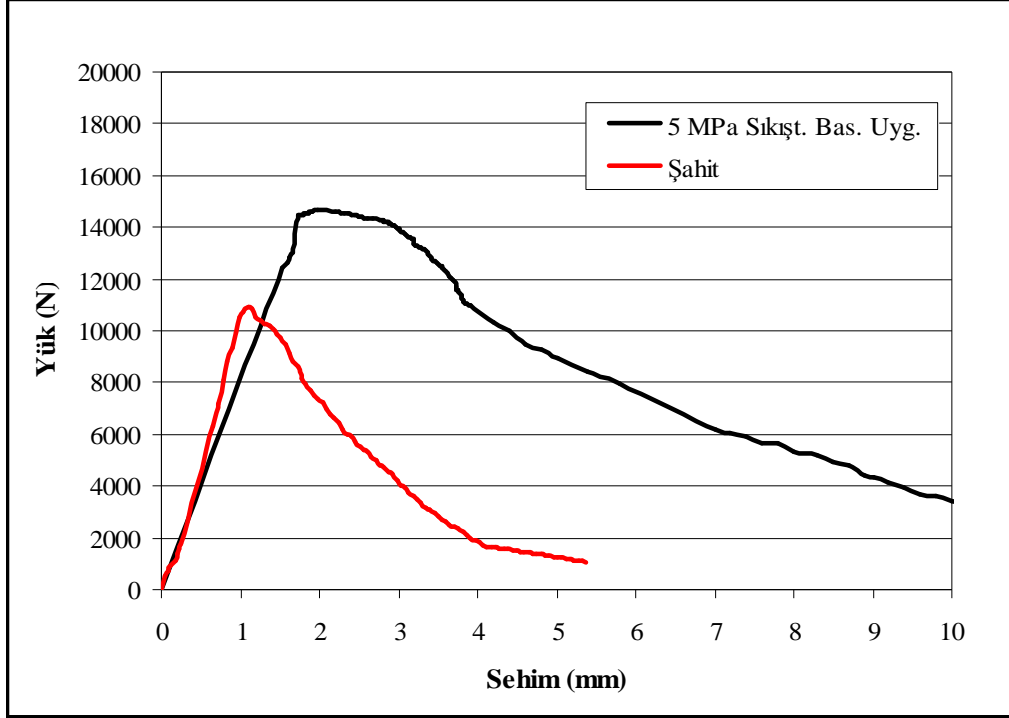
Şahit kiriş numunelerinden alınan örnekler mikroskop altında incelenmiştir. Yapılan incelemede pastada ve lif ile pasta ara yüzeyinde boşluklar olduğu görülmüştür (Şekil 4.57).



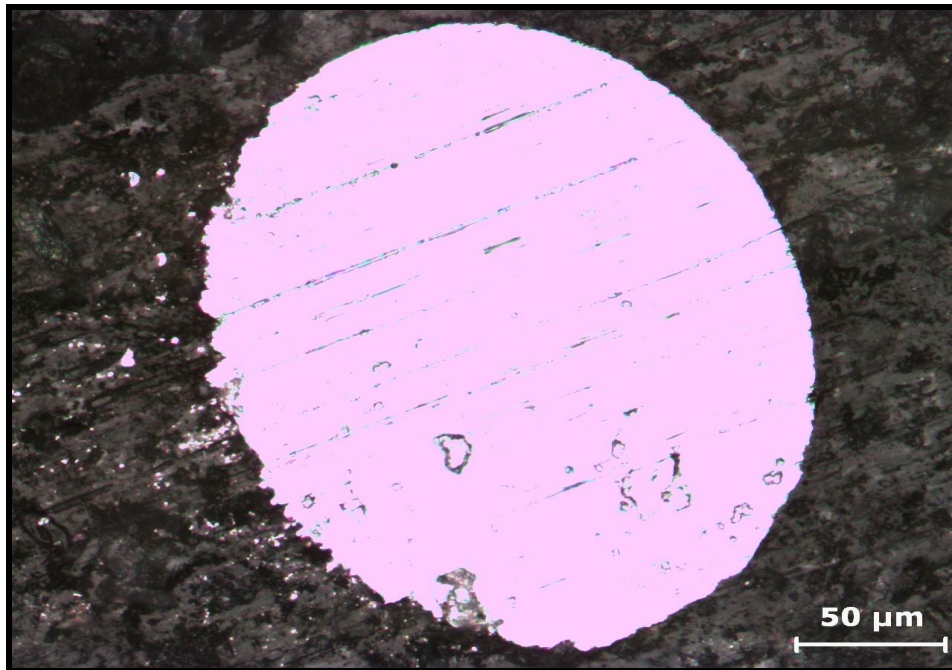
Şekil 4.57. Şahit RPB'nin mikro yapısı

Sıkıştırma basıncı 5 MPa olan RPB'ye ait yük sehim grafiği Şekil 4.58'de verilmiştir. Bu grafiğe göre RPB'nin ilk çatlak yükü 12420 N, çatlak oluştuğu sehim 1,52 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum yük 14640 N ve maksimum sehim miktarı 11,32 mm olmuştur. Lif boyunun kısa olmasına rağmen son sehimin belirgin olarak arttığı görülmüştür. Sıkıştırma basıncı 5 MPa olan RPB'nin maksimum kırılma yükü, Şahit RPB'ye göre yaklaşık %18'lik bir artış göstermiştir. Sıkıştırma basıncı 5 MPa olan RPB'nin içyapı görüntüsü Şekil 4.59'da verilmiştir. Şekil 4.57 ve Şekil 4.59 incelendiğinde, Şahit RPB'nin içyapısının 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin içyapısından daha boşluklu olduğu görülmektedir. Maksimum eğilme yükünün ve sehim miktarının artması, pastada ve lif-pasta ara yüzeyinde

sıkıştırmanın etkisi ile boşlukların azalması ve aderansın artmasıyla olmaktadır (Şekil 4.59).



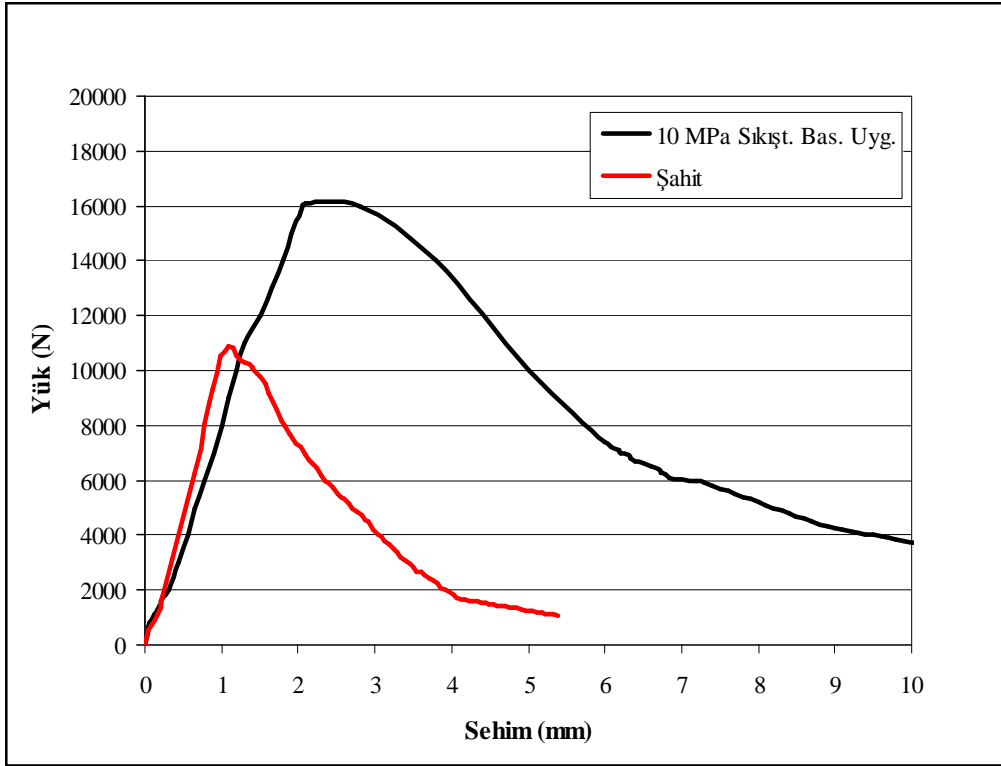
Şekil 4.58. 5 MPa Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait yük-sehim grafiği



Şekil 4.59. 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı

Sıkıştırma basıncı 5 MPa olan RPB'nin ilk çatlak dayanımı 24,84 MPa, eğilme dayanımı 29,28 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 33 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 82,5 Nm ve kırılma enerjisi 32379,33 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Şahit numune ile karşılaştırıldığında, eğilme dayanımı %34 ve eşdeğer eğilme dayanımının ise 3 kattan daha fazla arttığı tespit edilmiştir. Kırılma tokluğu ve enerjisi değerleri, Şahit RPB ile karşılaştırıldığında yine 3 kattan daha fazla artış olduğu görülmektedir. Numunenin ilk çatlaktan sonraki davranışı için hesaplanan indeks değerleri sırasıyla $I_5= 5,19$, $I_{10}= 7,98$ ve $I_{20}= 8,75$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, Tablo 4.8'e göre değerlendirildiğinde lifli betonlar sınıfına denk gelmektedir. Uygulanan sıkıştırma basıncı sayesinde pasta, çelik liflerin çevresini hemen hemen boşluksuz olarak sarmakta ve sonucunda da lif ile pasta ara yüzeyinde aderans artmaktadır. Aderansın artması, kancasız olan çelik lifin pasta içerisinden sıyrılarak çıkmasını zorlaştırmakta ve lifli RPB'nin tepe yükü aşıldıktan sonra da yük taşımaya devam etmesini sağlamaktadır.

Sıkıştırma basıncı 10 MPa olan RPB'ye ait yük sehim grafiği Şekil 4.60'da verilmiştir. Sıkıştırma basıncı 10 MPa olan RPB'nin ilk çatlak yükü 11000 N, çatlak oluştuğu sehim 1,3 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum yük 16100 N ve maksimum sehim miktarı 10,8 mm olmuştur. Sıkıştırma basıncı 10 MPa olan RPB'nin, ilk çatlak dayanımı 22 MPa, eğilme dayanımı 32,2 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 33,75 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 84,38 Nm ve kırılma enerjisi 33119,15 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin sonuçları ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak dayanımının %13 azaldığı fakat eğilme dayanımının %10 arttığı görülmüştür. Eşdeğer eğilme dayanımı ise kayda değer bir artışın olmadığı görülmüştür. Şahit numune ile kıyaslandığında ise ilk çatlak dayanımı %4,5, eğilme dayanımı %47 ve eşdeğer eğilme dayanımı ise yaklaşık 3,5 kat arttığı görülmektedir. Kırılma tokluğu ve enerjisi değerleri, 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin sonuçları ile karşılaştırıldığında yaklaşık %2,3, Şahit numuneye göre ise yaklaşık 3,5 kat arttığı görülmektedir.

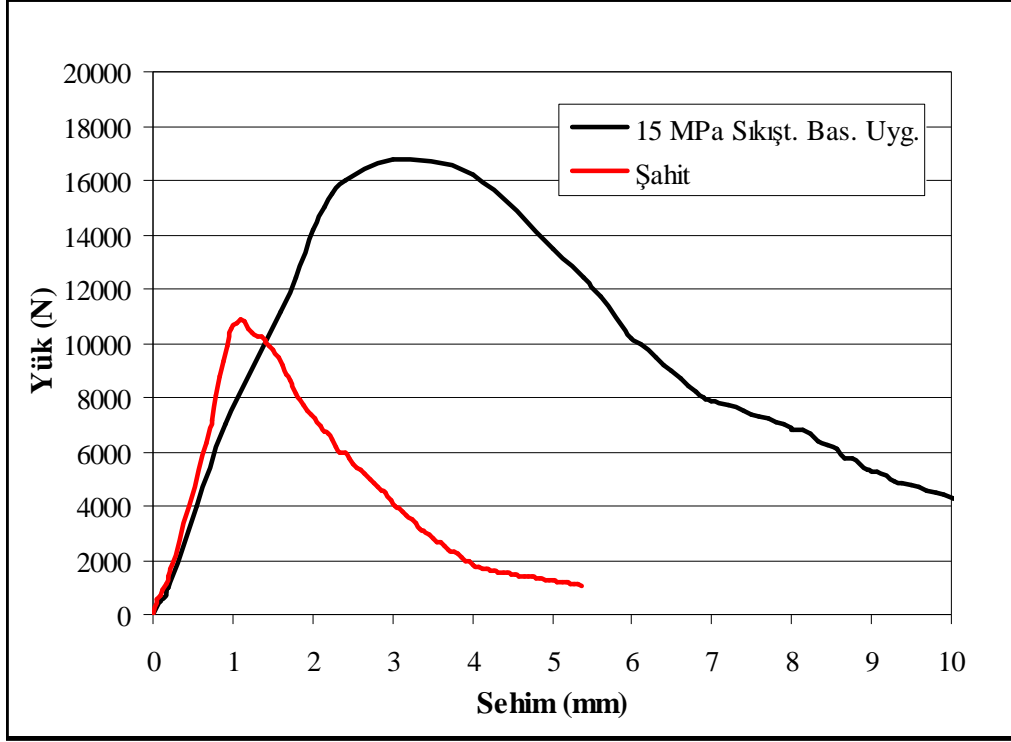


Şekil 4.60. 10 MPa Karşıma ait yük-sehim grafikleri

5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'de ilk çatlak oluştuğu sehim 1,52 mm olurken, 10 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'de ilk çatlak oluştuğu sehim 1,3 mm olmuştur. Numunenin çatlaktan sonraki davranışı incelemek için hesaplanan indeks değerleri sırasıyla $I_5= 6,6$, $I_{10}= 11,24$ ve $I_{20}= 12,88$ değerlerini almışlardır. Bu değerler, 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin sonuçları ile karşılaştırıldığında artış göstermektedir. Bu artışın sebebi ilk çatlak oluştuğu sehim değerinin düşmesi olmuştur.

Sıkıştırma basıncı 15 MPa olan RPB'ye ait yük sehim grafiği Şekil 4.61'de verilmiştir. Sıkıştırma basıncı 15 MPa olan RPB'nin ilk çatlak yükü 14210 N, çatlak oluştuğu sehim 2 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum yük 16800 N ve maksimum sehim miktarı 10,64 mm olarak gerçekleşmiştir. Sıkıştırma basıncı 15 MPa olan RPB'nin, ilk çatlak dayanımı 28,42 MPa, eğilme dayanımı 33,6 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 40,59 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 101,46 Nm ve kırılma enerjisi 39819,95 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, Şahit numune ile kıyaslandığında ilk çatlak dayanımı %30, eğilme dayanımı %53 ve

eşdeğer eğilme dayanımı ise yaklaşık 4 kat arttığı görülmektedir. Kırılma tokluğu ve enerjisi değerleri, Şahit numuneye göre yaklaşık 4 kat arttığı görülmektedir.

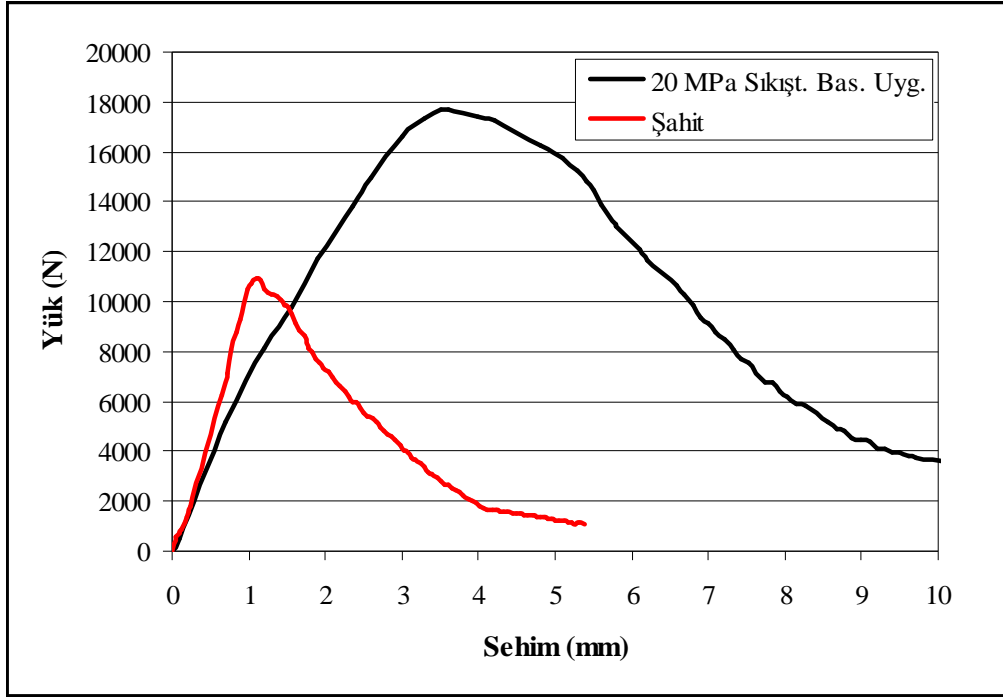


Şekil 4.61. 15 MPa Karşıma ait yük-sehim grafikleri

15 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'de ilk çatlak oluştuğu sehim 2 mm olduğu için indeks değerlerinde bir önceki numuneye göre azalma olduğu görülmüştür. Hesaplanan indeks değerleri sırasıyla $I_5= 5,16$, $I_{10}= 7,25$ ve $I_{20}= 7,25$ olmuştur.

Sıkıştırma basıncı 20 MPa olan RPB'ye ait yük sehim grafiği Şekil 4.62'de verilmiştir. Sıkıştırma basıncı 20 MPa olan RPB'nin ilk çatlak yükü 14810 N, çatlak oluştuğu sehim 2,35 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum yük 17700 N ve maksimum sehim miktarı 10,2 mm olmuştur. Sıkıştırma basıncı 20 MPa olan RPB'nin, ilk çatlak dayanımı 29,66 MPa, eğilme dayanımı 35,4 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 41,23 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 103,06 Nm ve kırılma enerjisi 40447,58 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, Şahit numune ile kıyaslandığında ilk çatlak dayanımı %41, eğilme dayanımı %62 ve eşdeğer

eğilme dayanımı ise yaklaşık 4 kat arttığı görülmektedir. Kırılma tokluğu ve enerjisi değerleri, Şahit numuneye göre yaklaşık 4,3 kat arttığı görülmektedir.

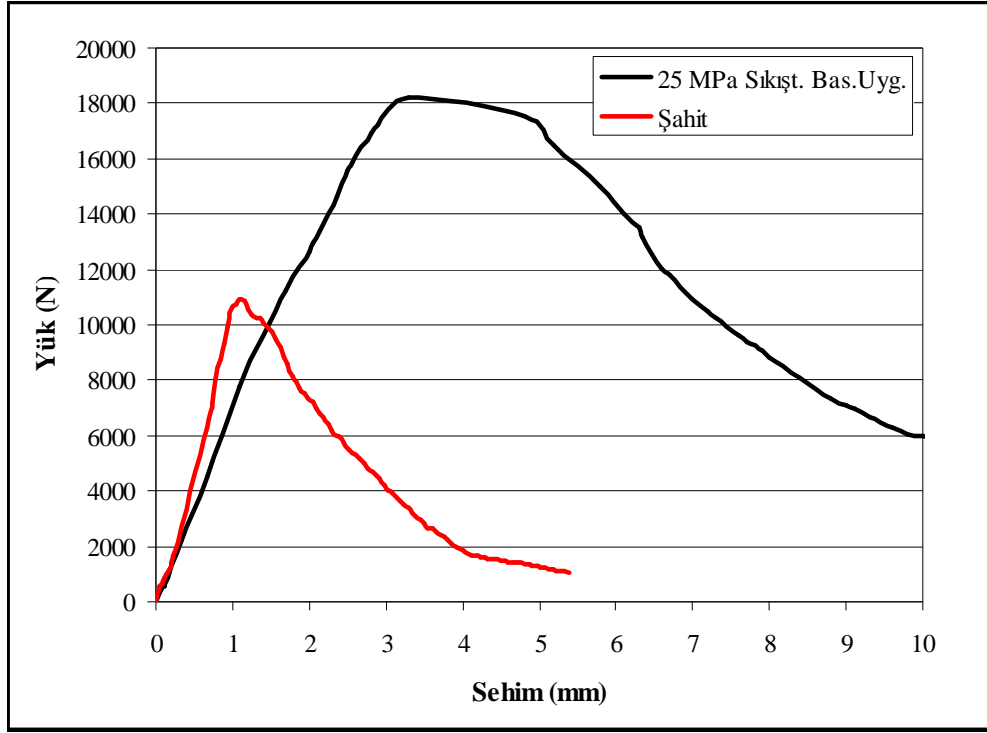


Şekil 4.62. 20 MPa Karşıma ait yük-sehim grafikleri

20 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'de ilk çatlak oluştuğu sehim 2,35 mm olduğu için indeks değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Hesaplanan indeks değerleri sırasıyla $I_5 = 3,78$, $I_{10} = 4,75$ ve $I_{20} = 9,5$ olmuştur.

Sıkıştırma basıncı 25 MPa olan RPB'ye ait yük sehim grafiği Şekil 4.63'de verilmiştir. Sıkıştırma basıncı 25 MPa olan RPB'nin ilk çatlak yükü 12680 N, çatlak oluştuğu sehim 2,3 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum yük 18200 N ve maksimum sehim miktarı 12,60 mm olmuştur. Sıkıştırma basıncı 25 MPa olan RPB'nin, ilk çatlak dayanımı 25,36 MPa, eğilme dayanımı 36,4 MPa ve eşdeğer eğilme dayanımı 46,78 MPa olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu 116,96 Nm ve kırılma enerjisi 45898,6 joule/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, Şahit numuneye göre ilk çatlak dayanımı %44, eğilme dayanımı %66 ve eşdeğer eğilme dayanımı, kırılma tokluğu ve enerjisi değerleri yaklaşık olarak 5 kat arttığı

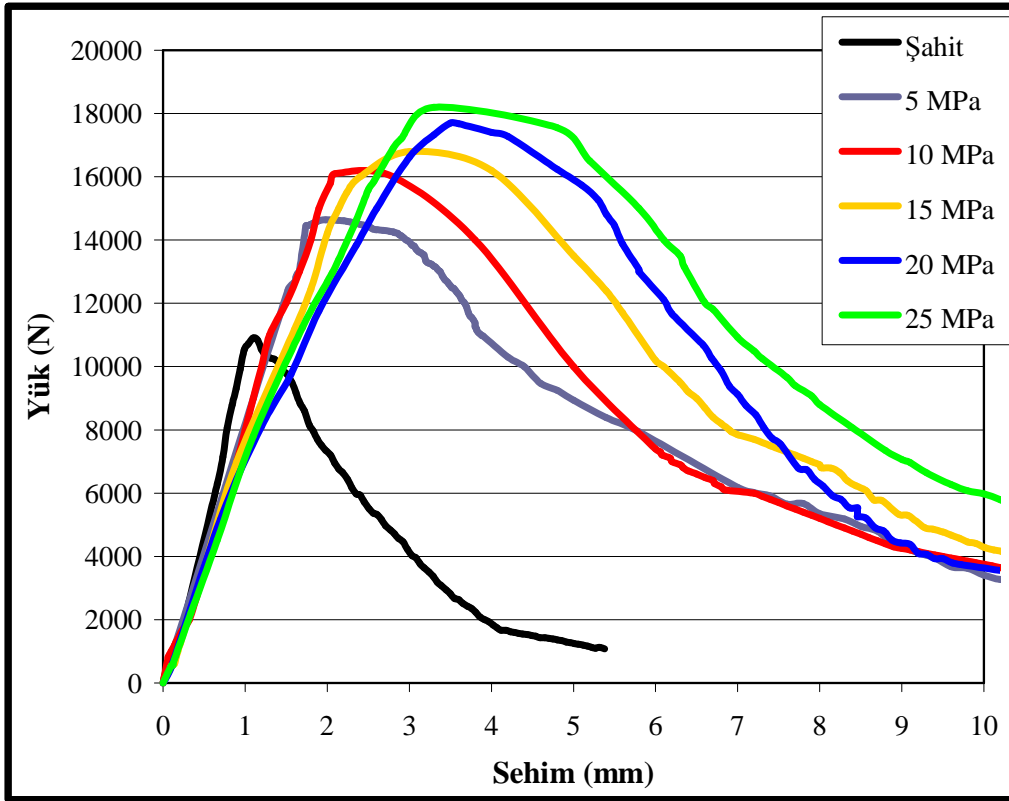
görülmektedir. Hesaplanan indeks değerleri sırasıyla $I_5= 7,10$, $I_{10}= 10,37$ ve $I_{20}= 10,37$ olmuştur.



Şekil 4.63. 25 MPa Karşıma ait yük-sehim grafikleri

Lif miktarına bağlı olarak yük sehim grafikleri toplu halde Şekil 4.64'te verilmiştir. Diğer numunelere ait grafikler Ek C'de verilmiştir. Ayrıca lif miktarına göre Şahit numune referans alınarak eğilme dayanımı değişim oranları Şekil 4.65'de gösterilmiştir.

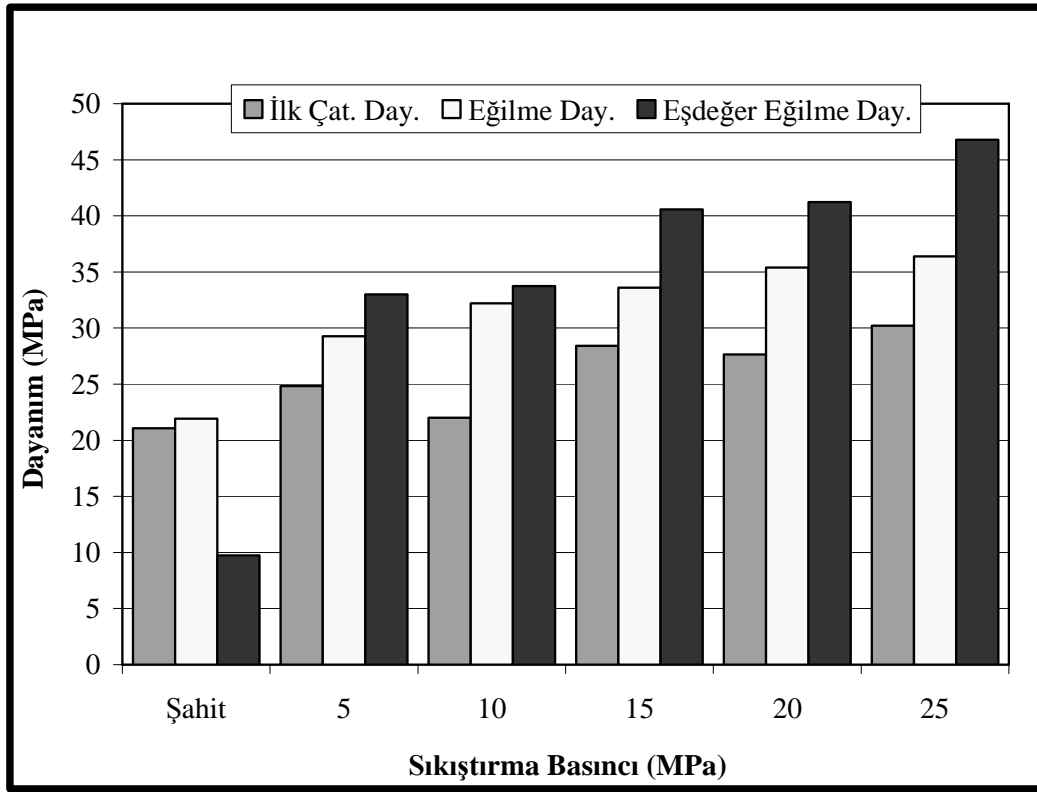
Yük-sehim grafikleri kullanılarak, metot bölümünde verilen 3.8-15 bağıntıları ile hesaplanan, tokluk indeksleri, çatlak dayanımları, eğilme dayanımları, kırılma tokluğu, kırılma enerjisi ve eşdeğer eğilme dayanımı değerleri Tablo 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.64. Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait yük-sehim grafikleri

Tablo 4.31. Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'lerin eğilme dayanımı sonuçları

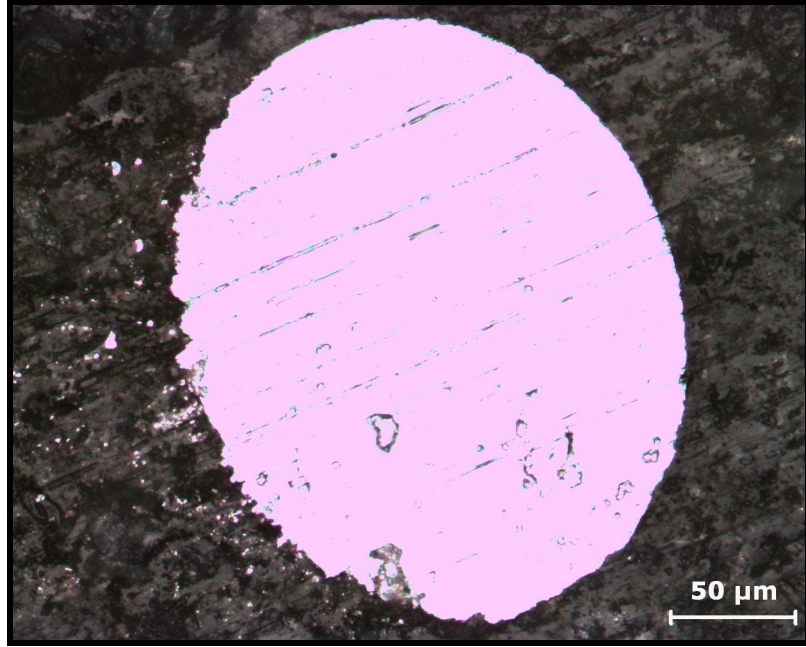
No	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	İlk Çat. Day. (MPa)	Eğilme Day. (MPa)	Toplam Sehim(mm)	Kırılma Tokluğu (Nm)	Kırılma Enerjisi (Joule/m ²)	Eşd. Eğilme Day. (MPa)
Şahit	4,20	5,25	5,25	21,06	21,92	5,38	24,31	9555,36	9,72
5	5,19	7,98	8,75	24,84	29,28	11,32	82,50	32379,33	33,00
10	6,60	11,24	12,88	22,00	32,20	10,80	84,38	33119,15	33,75
15	5,16	7,25	7,25	28,42	33,60	10,64	101,46	39819,95	40,59
20	3,78	4,75	9,50	29,66	35,40	10,20	103,06	40447,58	41,23
25	7,10	10,37	10,37	30,20	36,40	12,60	116,96	45898,60	46,78



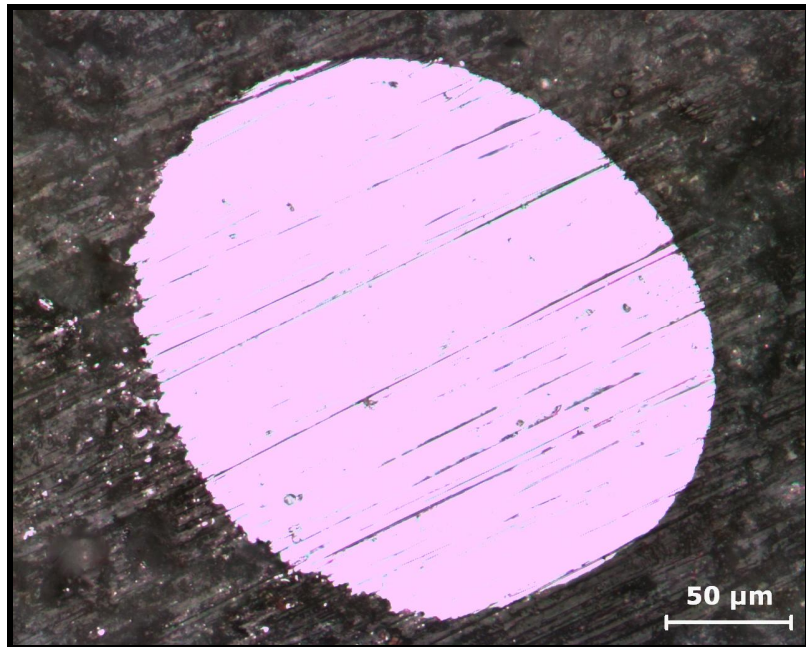
Şekil 4.65. Sıkıştırma basıncına göre eğilme dayanımı değişimi

Şekil 4.69'daki grafik incelendiğinde Şahit RPB'nin eğilme dayanımı (21,92 MPa) ile 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış olan RPB'nin eğilme dayanımı (29,28 MPa) arasındaki dayanım artışı oranı %34 olmuştur. Artış oranı azalarak, 5 MPa ile 10 MPa arasındaki %10, 10 MPa ile 15 MPa arasında %4, 15 MPa ile 20 MPa arasında %5, 20 MPa ile 25 MPa arasında %3 olmuştur. Şahit RPB ile 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB arasındaki eğilme dayanımı diğer sıkıştırma basınçlarındaki artışa göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle tokluğu dikkate alarak hesaplanan eşdeğer eğilme dayanımındaki artış miktarı 3 kattan daha fazla olmuştur. Akıcı kıvamdaki RPB'ye uygulanan 5 MPa sıkıştırma basıncı büyük hava boşluklarını ve serbest haldeki suyun dışarı çıkması için yeterli geldiği görülmüştür. Bu nedenle bu değerden daha yüksek sıkıştırma basıncı değerlerinin uygulanmasında eğilme numuneleri parametrelerinde çok anlamlı bir artış olmamasının yanı sıra bu yüklerin uygulanmasının da oldukça zor olduğu görülmüştür. Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait örneklerin içyapı görüntüleri incelendiğinde 5 MPa

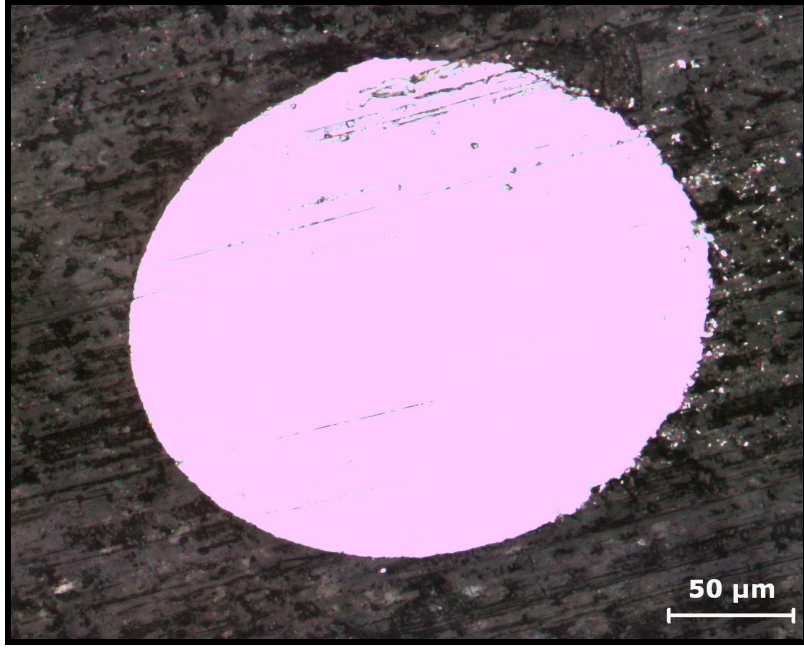
sıkıştırma basıncından sonraki sıkıştırma basınçları ile üretilen RPB'lerin içyapılarında belirgin bir farkın olmadığı görülmüştür (Şekil 4.66-70).



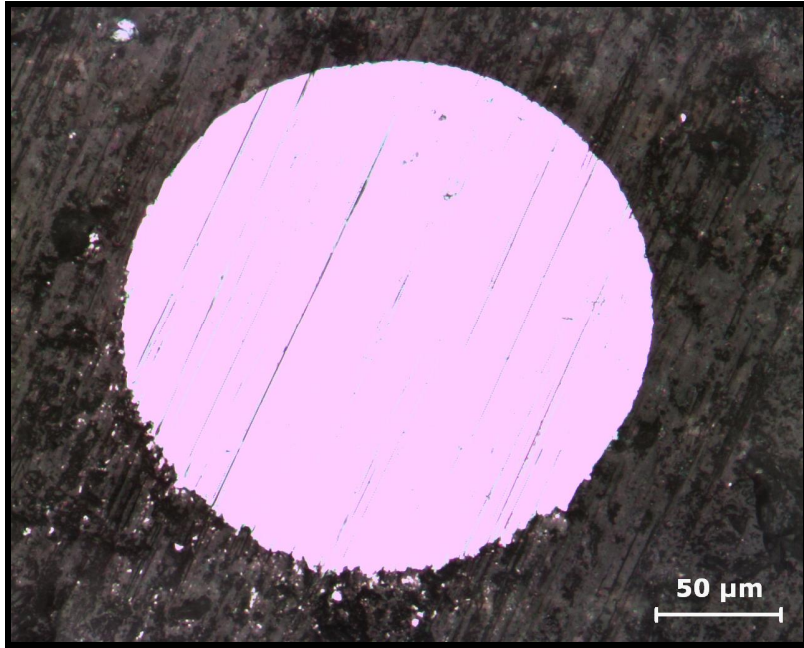
Şekil 4.66. 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı



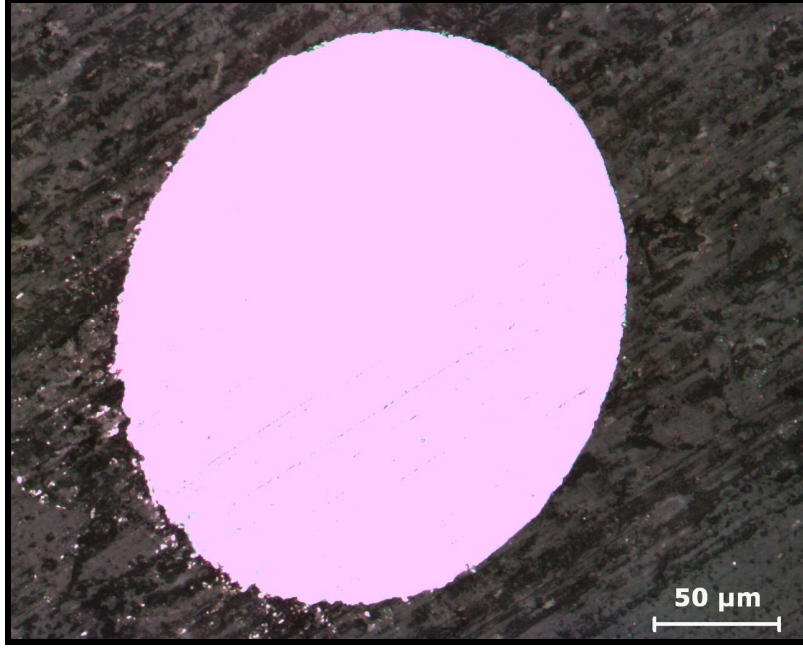
Şekil 4.67. 10 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı



Şekil 4.68. 15 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı

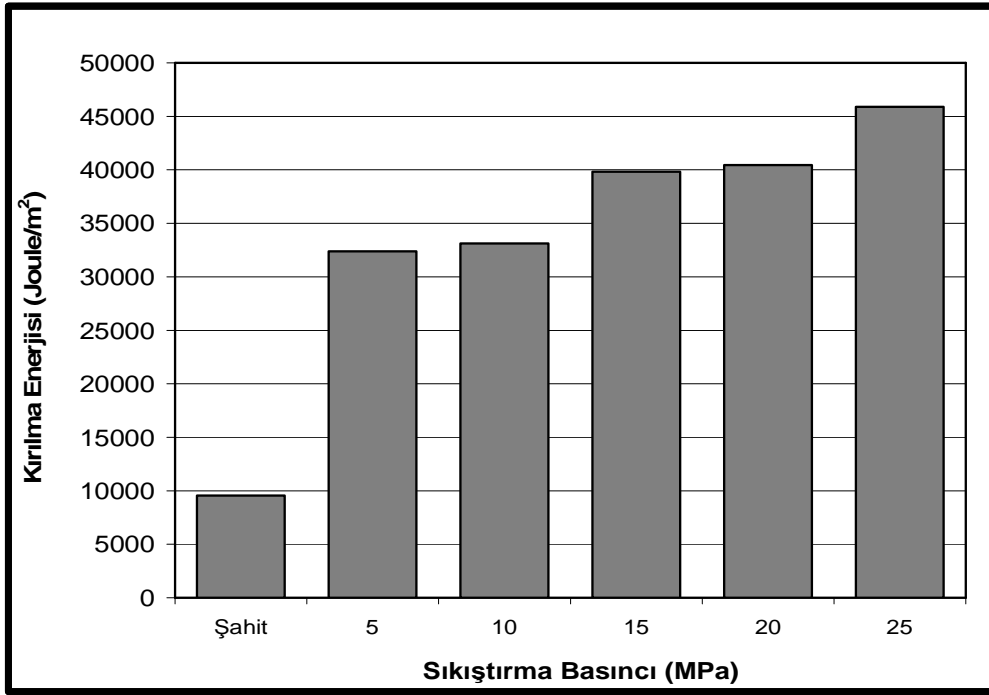


Şekil 4.69. 20 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı

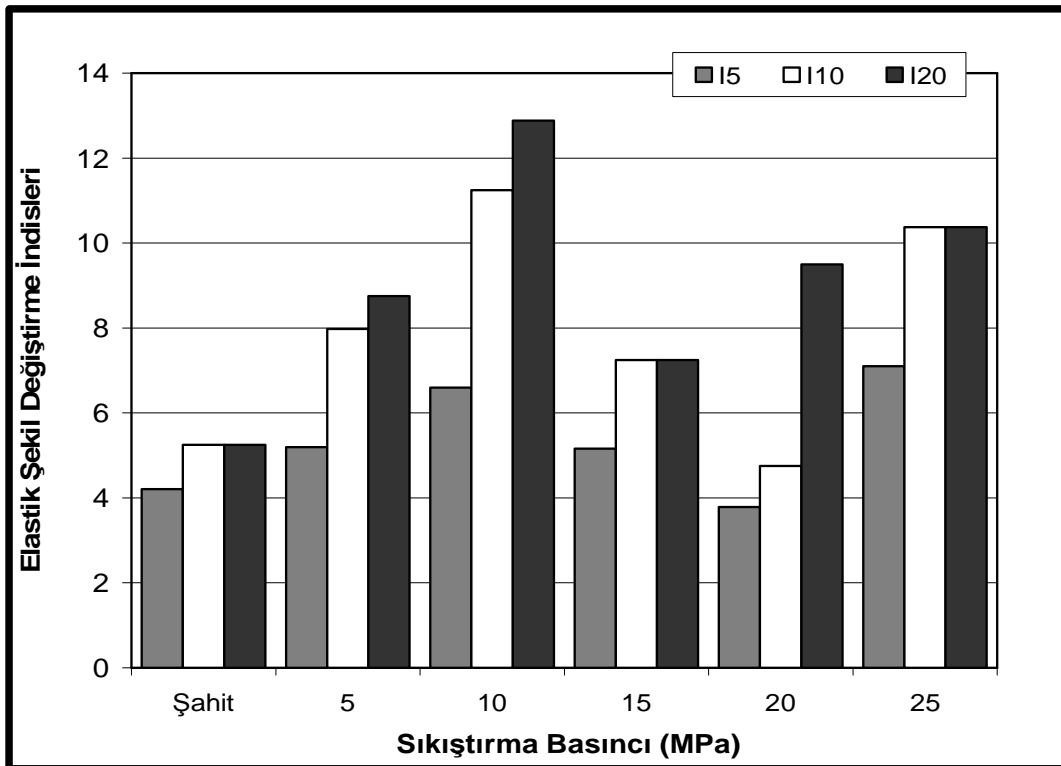


Şekil 4.70. 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin mikro yapısı

Eğilme deney sonuçlarından önemli bir parametre olan kırılma enerjisi grafiği (Şekil 4.71) incelendiğinde Şahit RPB'nin kırılma enerjisi ($9555,36 \text{ joule/m}^2$) ile 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış olan RPB'nin kırılma enerjisi ($32379,33 \text{ joule/m}^2$) arasındaki enerji artış oranı 3 kattan daha fazla olmuştur. Daha sonraki sıkıştırma basınçlarında artış oranı azalarak, 5 MPa ile 10 MPa arasındaki %2, 10 MPa ile 15 MPa arasında %20, 15 MPa ile 20 MPa arasında yaklaşık %2, 20 MPa ile 25 MPa arasında %13 olmuştur. 5 MPa sıkıştırma basıncı ile pasta ile lif ara yüzeyindeki aderansın arttığı çekilen içyapı görüntülerinde görülmektedir. Aderansın artması ile liflerin sıyrılarak çıkması zorlaşmış ve yük-sehim eğrisi maksimum yükten sonra daha fazla sehim yaparak kırılma gerçekleşmiştir. Aynı zamanda aderansın artışı lifin bulunmadığı yalın RPB'nin kendi içinde de olumlu etkiler yaparak eğilme parametrelerine katkı sağlamaktadır. Eğilme dayanımı ve kırılma tokluğunu etkileyen parametreler aynı zamanda elastik şekil değiştirme indekslerini de etkilemektedir (Şekil 4.72).



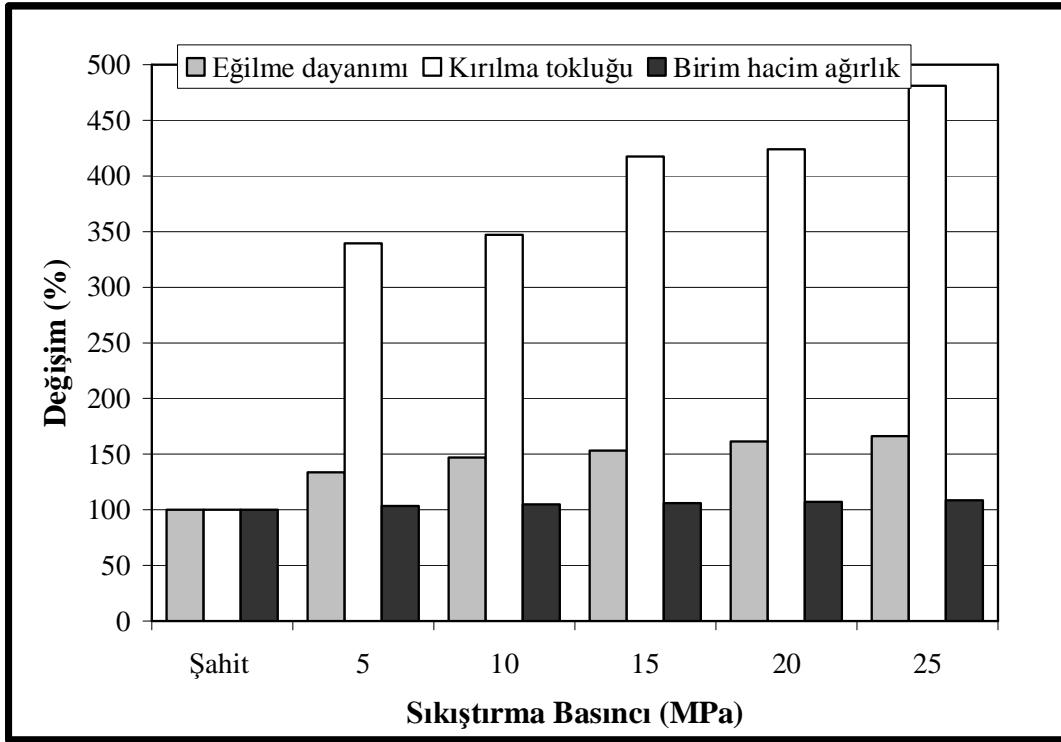
Şekil 4.71. Sıkıştırma basıncına göre kırılma enerjileri



Şekil 4.72. Sıkıştırma basıncına göre elastik şekil değişirme indeksleri

Elastik şekil değiştirme indeksleri, çatlaktan sonraki davranışı ifade ettiği için yük sehim eğrisinin durumunu rakamsal olarak iyi bir şekilde ifade etmektedir. Eğilme dayanımının artmasına paralel olarak ilk çatlağın olduğu sehim miktarı da artmaktadır. İndekslerin hesaplanmasında çatlak oluşuncaya kadarki eğrinin alanının yüksek olması indeks değerlerini düşürmektedir. 10 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış numunenin çatlak dayanımının düşük olması fakat eğilme dayanımının ve tokluğunun önceki sıkıştırma basınçlarına göre yüksek olması indeks değerlerini arttırmıştır.

Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'nin, birim hacim ağırlık değeri ile eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu arasındaki ilişki araştırılmıştır (Şekil 4.73). Grafik incelendiğinde, sıkıştırma basıncının eğilme dayanımına göre kırılma tokluğu değerini daha çok arttırdığı, birim hacim ağırlık değerini ise toplam %7,4 oranında en az arttırdığı görülmektedir.



Şekil 4.73. Sıkıştırma basıncının, birim hacim ağırlık, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğuna etkisi

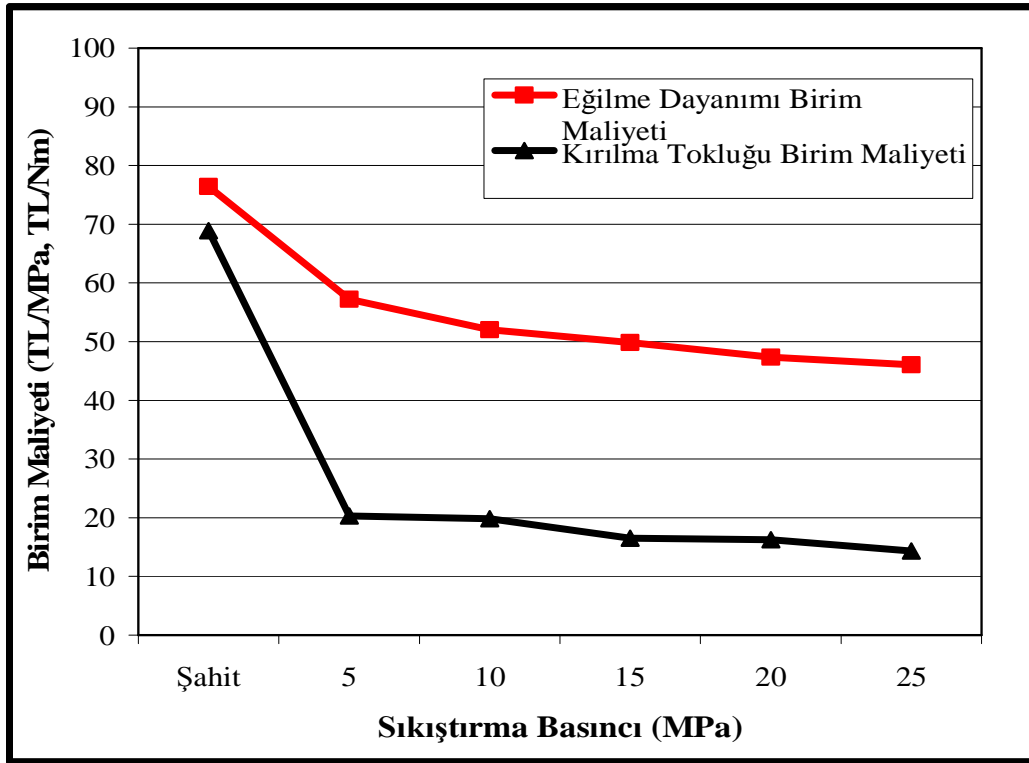
Sonuç olarak 25 MPa'lık bir sıkıştırma basıncı ile 36,4 MPa eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Bu değer şu ana kadar ülkemizdeki çalışmalarda elde edilen en yüksek eğilme dayanımıdır. Yüksek eğilme dayanımı elde etmek için yapılan başka bir çalışmada ise araştırmacılar 32 MPa eğilme dayanımı elde etmişlerdir [19]. Kırılma enerji açısından genel bir değerlendirme yapıldığı da ise bugüne kadar RPB ile 40000 juole/m²'den daha fazla bir değere ulaşamadığı görülmüştür. Bu çalışmada 45898,60 joule/m²'lik kırılma enerjisine ulaşılmıştır.

4.4.2.3. Eğilme numunelerinde sıkıştırma basıncının birim dayanım maliyetine etkisi

Sıkıştırma basıncı maliyet açısından da incelenmiştir. Bunun için Tablo 4.10'daki %4 lif içeren RPB'nin birim maliyet değeri (1676 TL/m³) kullanılmıştır. Bu değer dikkate alınmış, birim eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu maliyetleri hesaplanarak Tablo 4.32'de verilmiştir. Bu değerlerler kullanılarak Şekil 4.74'deki grafik elde edilmiştir.

Tablo 4.32. Sıkıştırma basıncına göre birim dayanım maliyeti

Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Eğilme Dayanımı Birim Maliyeti (TL/MPa)	Kırılma Tokluğu Birim Maliyeti (TL/Nm)
Şahit	76,44	68,92
5	57,22	20,31
10	52,04	19,86
15	49,87	16,51
20	47,33	16,26
25	46,03	14,33



Şekil 4.74. Sıkıştırma basıncının birim maliyet üzerindeki etkisi

Şekil 4.74 incelendiğinde eğilme dayanımı birim maliyetinde belirgin şekilde azalma olduğu görülmektedir. Birim maliyetler üzerinde en belirgin değişim Şahit ile 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB arasında olduğu görülmektedir. Eğilme dayanımının birim maliyetine göre, 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB ile Şahit RPB karşılaştırıldığında %25, kırılma tokluğu birim maliyetinde ise %70,5 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir. 5 MPa sıkıştırma basıncından sonra maliyetteki düşüş oranının azaldığı görülmektedir.

Tablo 4.9 ile Tablo 4.31 karşılaştırıldığında, 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin eğilme dayanımını, sıkıştırma basıncı uygulamadan elde edebilmek için hacimce %8 oranında lif kullanılması gerekmektedir. Bu durum kırılma enerjisi açısından düşünüldüğünde, Tablo 4.9'da belirtilen lif oranları ile 5 MPa'lık sıkıştırma basıncının kırılma enerjisi değeri elde edilememektedir. Bu nedenle sadece eğilme dayanımı açısından değerlendirilirse, lif hacmi %8 olan RPB'nin maliyeti 2803 TL/m³'dür. 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin maliyeti ise 1676 TL/m³ + sıkıştırma basıncı ekipmanları olmaktadır. Sıkıştırma basıncı uygulanmamış %8 lif

oranına sahip RPB'nin malzeme maliyeti, sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin malzeme maliyetine göre %67 daha fazladır. Prefabrik seri üretimde, sıkıştırma presi ve ekipmanlarının maliyetleri dahil edilse bile malzeme maliyet farkının kapanamayacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle prefabrik üretim için sıkıştırma basıncı ekonomik açıdan daha uygun olacağı söylenebilir.

4.4.2.4. Eğilme numunelerinde optimum sıkıştırma basıncının belirlenmesi

Bölüm 3.3.1.4'de anlatılan yönteme göre matematiksel bir model kurulmuştur. Bu modelde 6 farklı sıkıştırma basıncı değişkeni olarak kabul edilmiş ve bu değişkenlerden etkilenen, eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, birim hacim ağırlık, maliyet ve sıkıştırma basıncının uygulanmasında yaşanan zorluklar olmak üzere 5 adet sonuç ele alınmıştır. Tablo 4.33'de tüm sonuçlar göz önüne alınarak 1 ile 9 arasında önem dereceleri belirlenmiş ve bunların normalizasyon işlemi sonuçları Tablo 4.34'de verilmiştir. Tablo 4.35'de ise sıkıştırma basıncına göre bulunan sonuçların 0 ile 1 değerleri arasında olması için normalizasyon işlemi uygulanmış ve sonuçları verilmiştir. Normalizasyon işlemi yapılmış 5x5'lik matrisin her bir satır ortalamaları bulunarak 1x5'lik matris elde edilir ve matrisin bu değerleri o satıra ait olan sonucun karar vermedeki ağırlık değeri olmuştur.

Tablo 4.33. Eğilmede sıkıştırma basıncına göre elde edilen sonuçların önem dereceleri

	Eğilme Dayanımı	Kırılma Tokluğu	Birim Hac. Ağırlık	Maliyet	Zorluk
Eğilme Dayanımı	1,00	1,00	7,00	1,00	1,00
Kırılma Tokluğu	1,00	1,00	7,00	1,00	1,00
Birim Hac. Ağırlık	0,14	0,14	1,00	0,17	0,17
Maliyet	1,00	1,00	6,00	1,00	1,00
Zorluk	1,00	1,00	6,00	1,00	1,00

Tablo 4.34. Eğilmede sıkıştırma basıncına göre elde edilen sonuçların önem derecelerinin normalizasyon sonuçları

	Basınc Dayanımı	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağr.	Maliyet	Zorluk
Basınc Dayanımı	0,24	0,24	0,26	0,24	0,24
Elastisite Modülü	0,24	0,24	0,26	0,24	0,24
Birim Hac. Ağr.	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
Maliyet	0,24	0,24	0,22	0,24	0,24
Zorluk	0,24	0,24	0,22	0,24	0,24

Tablo 4.35. Lif oranına göre elde edilen sonuçların 0-1 değerleri arasında normalize edilmesi

	Basınc Dayanımı	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağr.	Maliyet	Zorluk
E_k	21,92	24,31	2711,98	46,03	5,00
E_b	36,40	116,96	2497,98	76,44	0,00
Şahit	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00
5	0,51	0,63	0,60	0,37	0,80
10	0,71	0,65	0,44	0,20	0,60
15	0,81	0,83	0,29	0,13	0,40
20	0,93	0,85	0,16	0,04	0,20
25	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00

Sıkıştırma basıncına bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarının normalizasyon yapılarak oluşturulan 6x5 matris ile her bir sonucun ağırlık matrisi ile çarpılır ve elde edilen matrisin sütunları toplanarak en büyük değere ait sıkıştırma basıncı optimum sıkıştırma basıncı olarak belirlenmiştir (Tablo 4.36). Tablo 4.36'daki verimlilik değerlerinden en büyük değer 5 MPa sıkıştırma basıncına ait olduğu görülmektedir.

Tablo 4.36. Sıkıştırma basıncına göre verimlilik değerleri

Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Basınc Dayanımı	Elastisite Modülü	Birim Hac. Ağırlık	Maliyet	Zorluk	Verimlilik Değerleri
Şahit	0,00	0,00	0,04	0,24	0,24	0,51
5	0,12	0,15	0,02	0,09	0,19	0,58
10	0,17	0,16	0,02	0,05	0,14	0,54
15	0,20	0,20	0,01	0,03	0,09	0,54
20	0,23	0,21	0,01	0,01	0,05	0,50
25	0,24	0,24	0,00	0,00	0,00	0,49

Sonuç olarak sıkıştırma basıncının zorluğu, içyapı görüntüleri, birim hacim ağırlık değerleri, eğilme dayanımı, kırılma tokluğu artış oranları ve birim basınç dayanım maliyetleri göz önüne alındığında 5 MPa'lık bir sıkıştırma basıncının betonun boşluksuz olarak yerleştirilmesi ve optimum maliyet için yeterli düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması aşağıda özetlenen adımlar gerçekleştirilerek tamamlanmıştır.

RPB'yi oluşturan malzemeler temin edilerek bu malzemelerin özellikleri ve karışım oranları belirlenmiştir. Oluşturulan karışıma, hacimce farklı oranlarda mikro lif ikame edilerek lif miktarının basınç, eğilme parametreleri ve maliyet üzerindeki etkisini incelemiş ve optimum lif oranı belirlenmiştir. Malzemeler, karışım oranları ve lif içeriğinin belirlenmesinden sonra RPB'ye farklı tiplerde kür uygulanmış ve en uygun kür tipi belirlenmiştir. Bu deneylerden sonra özel tasarlanmış kalıplar kullanılarak taze halde bulunan RPB'ye prizini alıncaya kadar sıkıştırma basıncı uygulanmıştır. Farklı sıkıştırma basınçlarının; RPB'nin, birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı ve kırılma parametreleri ile maliyete etkisi incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- RPB'yi oluşturan malzemeler ve üretim tekniği normal betonlardan farklı olmakla birlikte çoğunluğu ülkemizde üretilen malzemeleri kullanılarak RPB üretilebilmektedir.
- RPB karışımlarının hazırlanması, normal betonlara göre farklılık göstermektedir. Karıştırma işlemi için kullanılan mikserin karıştırma hızı ve karışıma giren malzemelerin miksere konulma sırası belli bir düzen içerisinde olmalıdır. Aksi takdirde aynı malzemeler ile çok yüksek dayanımlı bir beton elde edilebileceği gibi çok düşük dayanımlı bir beton da elde edilebilmektedir. Bu nedenle RPB'nin karıştırma işlemi için özel tasarlanmış karıştırıcılara ihtiyaç duyulmaktadır.
- Lifsiz ve sıkıştırma olmaksızın hazırlanan RPB'ler ile 98 MPa ile 145 MPa arasında değişen yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmıştır.

- RPB’ye lif katılması ile birlikte karıştırma ve yerleştirme işlemlerinde zorluklarla karşılaşmıştır. Akıcı bir kıvama sahip olan RPB’nin %6 lif oranından sonra bu özelliğini kaybettiği görülmüştür. Özellikle %10 lif içeren numunenin üretiminde ve kalıba yerleştirilmesinde çok büyük sorunlar ile karşılaşmıştır.
- Lif miktarının artması ile basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Basınç dayanımındaki artış, lif miktarının %4’üne kadar belirgin bir şekilde olurken, %4 ile %6’lık lif miktarlarında minimum olmuştur. Şahit (lifsiz) RPB’nin basınç dayanımı 125,63 MPa olurken, %4 lif içeren RPB’nin basınç dayanımı Şahit RPB göre %35,5 artarak 170,29 MPa olmuş ve artış oranı %10 lif içeren RPB’de %93’e yükselerek 242,28 MPa olmuştur.
- RPB’nin elastisite modülü lif miktarına bağlı olarak 58000 MPa ile 69000 MPa arasında değerler almıştır. Lifsiz RPB’nin elastisite modülü 58764 MPa olarak bulunmuştur. Lifler bir yandan sünekliliği arttırarak elastisite modülünü düşürmekte, diğer yandan da agrega gibi davranarak basınç dayanımını arttırmakta ve bunun sonucu olarak da betonu gevrekletirmektedir. Bu nedenle basınç dayanım artış oranının fazla olduğu lif oranlarında elastisite modülü artarken tersi durumda azalmaktadır.
- RPB’nin poisson oranı normal betonların poisson oranı değerine benzer şekilde yaklaşık olarak 0,21 bulunmuştur. Lif miktarına bağlı olarak poisson oranı değerinde önemli bir fark görülmemiştir.
- RPB’ye lif katılması ile eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlanmıştır. Lif miktarı %2 olan RPB’nin eğilme dayanımında lifsiz RPB’ye göre %13’lük bir artış olurken kırılma tokluğu değerinde 12 kat artış olduğu görülmüştür. Bu durum diğer lifli RPB’lerde, lif miktarına bağlı olarak artış gösterirken en yüksek artış oranı %2 ile %4 arasında %53 olmuştur. En yüksek eğilme dayanımı sonucunu %10 lif içeren RPB vermiştir. %10 lif içeren RPB’nin eğilme dayanımı 36,58 MPa ve kırılma tokluğu 36,41 değerine kadar yükselmiştir. Mikro boyuttaki lif, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğunda önemli artışlar sağlarken boyunun kısa olması nedeniyle

toplam sehım değerlerinin dūşmesine neden olmaktadır. Ayrıca mikro lifin geometrisi açısından kancasız olması nedeniyle aderans yönünden dezavantajlı olduğu görülmüştür.

- RPB’yi oluşturan malzemelerden en pahalı olan mikro boyuttaki elik liftir. elik liflerin katılması ile RPB’nin birim maliyeti yaklaşık 2 katına çıkmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda %4 lif kullanıldığında birim maliyet başına dūřen, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerinin diğer lif içeren RPB’lere kıyasla optimum seviyede olduğu görülmüştür.
- Lif oranının etkilediği özellikler incelenerek optimum lif miktarı %4 olarak belirlenmiştir ve çalışmanın kür ve sıkıştırma basıncı ile ilgili bölümlerinde bu lif oranı kullanılmıştır.
- RPB’de yüksek oranda silis dumanı kullanılmaktadır. Bu yüksek oran imento ve kuvars pudrası taneleri arasındaki boşlukları doldurmak ve imento hidrasyon ürünleri ile puzolanik aktivite gerçekleştirmek için gerekmektedir. Puzolanik aktivite hızı ve gerçekleşme oranı kür işlemi ile direk olarak ilgilidir. Yapılan alışma sonucunda sıcak kür işleminin içyapıyı güçlendirdiği ve buna bağlı olarak da basınç dayanımını arttırdığı görülmüştür.
- Uygulanan kür tipine göre en dūřük dayanımı 20°C normal su kürü vermiştir. Su kürüne göre, 3 gün 90°C sıcak su ve buhar kürü dayanımda her iki kürde de ortalama %7 basınç dayanımını arttırmıştır. Su kürüne göre, 3 gün 90°C buhar kürü ardından 12 saat 200°C ve 300°C etüv kürü 28 günlük dayanımda sırasıyla, %25 ve %31 dayanım artışı sağlamıştır. Bu kür işlemi ile numuneler buhar kürü ile bünyesine gerekli suyu alarak hidrasyonu ve puzolanik aktivitenin bir kısmını tamamlamış, etüv kürü ile yeniden hidrasyon ve puzolanik aktivitesi canlanarak büyük oranda gelişimini tamamlamıştır.
- Sıcak kür işleminin uygulanmasında sıcaklık artış-azalış hızının termal gerilmeleri en aza indirecek şekilde olması gerekmektedir. Aksi takdirde

numunede çatlaklar oluşarak dayanım düşmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda uygun olan artış-azalış hızının $10^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ olduğu tespit edilmiştir.

- Sıcak kür işleminin numunelerin kalıptan çıkarıldıktan hemen sonra başlaması, hidratasyonun ve puzolanik aktivitenin kesintiye uğramaması gerekmektedir. Yapılan çalışma sonucunda sıcak kür işleminin 3, 5 ve 7 gün sonra başlamasının basınç dayanımına kayda değer olumlu bir etki sağlamadığı görülmüştür.
- Akıcı bir kıvamda sahip olmasına rağmen RPB'nin kalıba en az boşluk kalacak şekilde yerleştirilmesinde ve çelik lif ile arasında aderans sorunu olduğu yapılan makro ve mikro boyuttaki incelemeler sonucu anlaşılmıştır. Bu nedenle bilinen farklı yerleştirme metotları denenmiş fakat istenilen sonuç alınmamıştır. RPB'nin kalıba yerleştirilmesinde literatürde RPB üzerinde bu güne kadar denenmemiş revibrasyon tekniği de denenmiş fakat deney sonucunda basınç dayanımının revibrasyon süresine bağlı olarak sürekli düştüğü görülmüştür.
- RPB'nin kalıba yerleştirilmesinde 25, 50, 75, 100, 125 MPa'lık sıkıştırma basınçları uygulanmıştır. Bu işlem için özel tasarlanmış kalıplar kullanılmıştır. Bu kalıplar sıkıştırma basıncı sırasında, boyut değişikliğine uğramayacak dayanıklılıkta, su ve havanın çıkışına izin verecek ama taneli malzemelerin çıkışını engelleyecek şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda kalıpların, sistem olarak içerisinde oluşan sıkıştırma basıncını betonun priz sonuna kadar muhafaza edebilecek şekilde tasarlanmıştır.
- Sıkıştırma basıncı uygulanan numunelerde hava ve su çıkışının olması ve tanelerin birbirine yaklaşması sonucu birim hacim ağırlık değerleri artmıştır. Ayrıca içyapı numunelerinin incelenmesi ile hem boşluk yapısının düzeldiği hem de RPB içerisinde bulunan çelik lifin beton ile arasındaki ara yüzeyinde kusursuz denebilecek bir yapının oluştuğu görülmüştür.
- 25 MPa'lık bir sıkıştırma basıncı akıcı halde kalıba yerleştirilen RPB'deki büyük hava boşlukları ve serbest haldeki suyu çıkarmak için yeterli geldiği ve RPB'nin

birim hacim ağırlığını %9 ve basınç dayanımını yaklaşık 2 kat arttırdığı görülmüştür.

- Sıkıştırma basıncı 100 MPa kadar basınç dayanımında artış sağlarken, sıkıştırma basıncının 100 MPa'dan 125 MPa çıkması, basınç dayanımlarında bir miktar düşüğe sebep olmuştur. Dayanımlardaki bu düşüşün nedeni olarak, yüksek basınç altında, çimentonun hidratasyonu için gerekli olan suyun da dışarı çıkması ve hidratasyonun tam olarak gerçekleşmemesinin sebep olduğu düşünülmektedir.
- En yüksek basınç dayanımına 475,24 MPa olarak 100 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'de ulaşılmıştır. Bu değer ülkemizde erişilebilen en yüksek basınç dayanım özelliği taşırken, dünyada da kayda değer bir büyüklüktedir.
- Sıkıştırma basıncı uygulaması basınç dayanımı arttırmasının yanı sıra gevrekliğinde artmasına neden olmuştur. Bu nedenle sıkıştırma basıncı ile elastisite modülleri, orantılı olarak artmıştır. Artış oranı, basınç dayanımında olduğu gibi elastisite modülünde de 25 MPa sıkıştırma basıncında, en yüksek oranda (%14) olmuş ve 66542 MPa değerine ulaşmıştır. Bu değerde basınç dayanımının 2 kat arttığı düşünüldüğünde elastisite modülü artış oranının düşük olduğu görülmektedir. Sıkıştırma basıncı, lif ile pasta ara yüzeyindeki aderansı arttırmakta ve buna bağlı olarak da süneklik artmaktadır. Süneklikteki artış, elastisite modülünün düşmesine neden olacağı için elastisite modülü artış oranı basınç dayanımı artış oranına göre düşük olmuştur. En yüksek elastisite modülü değeri 84562 MPa ile 125 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'de meydana gelmiştir.
- Sıkıştırma basıncının uygulama zorluğu, içyapı görüntüleri, birim hacim ağırlık değerleri, basınç dayanımı artış oranları ve birim basınç dayanım maliyetleri göz önüne alındığında 25 MPa'lık bir sıkıştırma basıncının betonun boşluksuz olarak yerleştirilmesi için optimum düzeyde olduğu görülmüştür.
- Sıkıştırma basıncı maliyet açısından incelendiğinde; %4 lif içeren RPB'nin birim maliyet değeri dikkate alınarak birim basınç dayanım maliyetleri hesaplanmış ve

basınç dayanımının birim maliyetinin, 100 MPa sıkıştırma basıncına kadar orantılı olarak azaldığı daha sonra 125 MPa sıkıştırma basıncında çok az bir miktar arttığı görülmüştür. Birim basınç maliyetindeki en önemli değişim Şahit RPB ile 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB arasında gerçekleşmiştir.

- 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin basınç dayanımını, sıkıştırma basıncı uygulamadan elde edebilmek için yaklaşık hacimce %10 oranında lif kullanılması gerekmektedir. Lif hacmi %10 olan RPB'nin maliyeti 3366 TL/m³'dür. 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin maliyeti ise 1676 TL/m³ + sıkıştırma basıncı ekipmanları olmaktadır. Bu iki RPB arasında malzeme maliyeti açısından 2 kat fark bulunmaktadır. Bu farkın, prefabrik olarak bir ürünün seri bir şekilde üretilmesi durumunda sıkıştırma basıncı ekipmanları ek maliyetleri ile kapanamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle prefabrik üretim için sıkıştırma basıncı ekonomik açıdan uygun olabileceği düşünülmektedir.
- Eğilme deneyi sonucunda yapılan incelemelerde RPB'nin lifler ile olan aderansı yeterli gelmemekte ve lifler beton içerisinden sıyrılarak çıkmaktadır. Bu durum eğilme numunelerinin bütün mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle eğilme numunelerine daha önceki basınç numunelerine uygulanan sıkıştırma basıncı göz önüne alınarak, 5, 10, 15, 20, 25 MPa'lık sıkıştırma basıncı uygulanmıştır. Akıcı kıvamdaki RPB'ye uygulanan 5 MPa sıkıştırma basıncının büyük hava boşluklarını ve serbest haldeki suyun dışarı çıkması için yeterli geldiği görülmüştür. Sıkıştırma basıncı arttıkça eğilme dayanımı, kırılma tokluğu ve buna bağlı olarak kırılma enerjisi artmıştır. Sıkıştırma basıncı uygulanmamış RPB'nin eğilme dayanımı ile 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış olan RPB'nin eğilme dayanımı arasındaki dayanım artışı diğer sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'lere göre en yüksek oranda (%34) olmuştur. Ayrıca kırılma tokluğu ve enerjisi değerlerinin 3 kattan daha fazla arttığı tespit edilmiştir. Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait örneklerin içyapı görüntüleri incelendiğinde 5 MPa sıkıştırma basıncından sonraki sıkıştırma basınçları ile üretilen RPB'lerin pasta ile lif ara yüzeyinin içyapılarında belirgin bir farkın olmadığı görülmüştür.

- Aderansın artması ile 20 MPa ile 25 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan numunelerde çelik liflerin sıyrılarak çıkması zorlaşmış ve yük-sehim eğrisi maksimum yükten sonra daha fazla sehim yaparak kırılma gerçekleşmiştir. Aynı zamanda aderansın artışı, lifin bulunmadığı yalın RPB'nin kendi içinde de olumlu etkiler yaparak eğilme parametrelerine katkı sağlamaktadır.
- 25 MPa'lık bir sıkıştırma basıncı ile 36,4 MPa eğilme dayanımına kadar ulaşılmıştır. Bu değer şu ana kadar ülkemizdeki çalışmalarda elde edilen en yüksek eğilme dayanımıdır. Kırılma enerji açısından genel bir değerlendirme yapıldığı da ise bugüne kadar 40000 juole/m² daha fazla bir değere ulaşamadığı görülmüştür. Bu tez çalışması ile 45898,60 joule/m²'lük kırılma enerjisine ulaşılmıştır.
- Sıkıştırma basıncı birim maliyet açısından incelendiğinde, eğilme dayanımı birim maliyetinde belirgin şekilde azalma olduğu görülmüştür. Birim maliyetler üzerinde en belirgin değişim Şahit ile 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB arasında olduğu görülmektedir. 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin eğilme dayanımını, sıkıştırma basıncı uygulamadan elde edebilmek için yaklaşık hacimce %8 oranında lif kullanılması gerekmektedir. Bu durum kırılma enerjisi açısından düşünüldüğünde hiçbir lif oranı ile 5 MPa'lık sıkıştırma basıncının kırılma enerjisi değeri elde edilememektedir. Bu nedenle sadece eğilme dayanımı açısından değerlendirilirse, lif hacmi %8 olan RPB'nin maliyeti 2803 TL/m³'dür. 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanan RPB'nin maliyeti ise 1676 TL/m³ + sıkıştırma basıncı ekipmanları olmaktadır. Bu iki RPB arasında malzeme maliyeti açısından %67'lik bir fark bulunmaktadır. Bu nedenle prefabrik üretim için sıkıştırma basıncı eğilme elamanlarında da ekonomik açıdan uygun olabileceği düşünülmektedir.
- Sıkıştırma basıncı uygulanarak RPB'ler ile uygulamada prefabrik elemanlar üretilebilir. Bu RPB elemanlar endüstride sadece beton malzemelerin değil aynı zamanda diğer malzemelere de alternatif olarak kullanılabilir. Basınç uygulama düzeneği, ilk yatırım maliyetinde üretilmesi düşünülen elemana göre artı bir maliyet getirecektir. Bu nedenle endüstriyel üretime yönelik olarak basınç

yüklerine maruz kalacak elemanların üretilmesine optimum 25 MPa, eğilme yüklerine maruz kalacak elemanların üretilmesinde ise optimum 5 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmalıdır.

- RPB’lerin kırılma şekilleri normal betonlardan farklı olarak lifler sayesinde kırılma sırasında parçalara ayrılmamasıdır. Çok yüksek basınç altında dahi formunu koruyabilmektedir. Bu durum askeri yapılar için son derece önemlidir ve bu nedenle cephanelik gibi stratejik özelliği olan yapılarda hem yüksek dayanımı hem de parçalanmama özelliğinden dolayı kullanılabilir.
- RPB’lerin dayanıklılık özellikleri literatürdeki çalışmalara göre incelendiğinde normal betonlar ile kıyas edilemeyecek düzeyde yüksek olduğu görülmektedir. Sıkıştırma basıncı uygulanması RPB’nin birim hacim ağırlığını arttırmaktadır. Birim hacim ağırlığın artması betonun bünyesinde bulunan boşlukların azalması anlamına gelmektedir. Bu nedenle zaten yüksek olan dayanıklılık özellikleri, sıkıştırma basıncı uygulanması ile daha da artacaktır. Bu amaçla yüksek dayanıklılık özelliklerine ihtiyaç duyulan malzemelerin yerine endüstriyel ve nükleer atıkların depolandığı tesislerde kullanılabilir.
- Sıkıştırma basıncı uygulaması ile ince cidarlı elemanlar üretilbileceği gibi mevcut üretilen elemanların kalınlıkları veya içerisinde kullanılan ve en büyük maliyet oluşturan lif miktarı azaltılabilir.
- Uygulamada sıkıştırma basıncı uygulanan elemanların ekonomi sağlanması açısından karışma akışkanlaştırıcı katkı ile birlikte priz hızlandırıcı katkı ilavesi yapılarak kalıp alma süreleri kısaltılabilir.
- RPB’nin karıştırma işlemi normal betonlara göre farklılıklar gösterdiği için normal hazır beton üreten tesislere bir takım ek modifikasyonlar yapılarak hazır beton tesislerinde RPB üretimi yapılabilir.
- RPB farklı lif tipleri kombinasyonlu olarak kullanılabilir ve bu RPB’lere sıkıştırma basıncı uygulanarak mekanik özellikleri test edilmelidir.

- Sıkıştırma basıncı uygulanarak üretilen RPB'lerin durabilite özellikleri üzerine kapsamlı bir çalışma yapılmalıdır.
- RPB'de en büyük maliyeti oluşturan malzeme çelik lifdir. RPB'de çelik lif yerine metal endüstri atıkları değerlendirilebilir. RPB'de kuvars pudrası ve kumu yerine benzer özelliklerde farklı doğal ve atık malzemeler de kullanılabilir. Bu aynı zamanda atıkların değerlendirilmesi konusunda da yarar sağlayacağı için detaylı olarak incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.lafarge-beton.com.tr>. (8.5.2007)
- [2] AITCIN, P.C., Cement of Yesterday and Today Concrete of Tomorrow, Cement and Concrete Research, 30, 9, pp. 1349–1359, 2000.
- [3] TAŞDEMİR, M.A., BAYRAMOV, F., KOCATÜRK, A.N., YERLİKAYA, M., Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton2004 Kongresi, İstanbul, sf. 1-34, 2004.
- [4] ÇİVİCİ, F., Çelik Lif Donatılı Betonun Eğilme Tokluğu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 2, sf. 183-188, 2006.
- [5] RICHARD, P., CHEYREZY, M.H., Composition of Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, 25, 7, pp. 1501-1511, 1995.
- [6] AITCIN, P.C., Concrete the most widely used construction materials, ACI SP- 154, pp. 257-266, 1995.
- [7] AITCIN, P.C., SARKAR, S.L., RANC, R., LEVY, C., A High-Silica-Modulus Cement For High Performance Concrete, Advanced Cementitious Materials Ceramic Transaction, Gaithersburg, 16, pp. 103–121, 1991.
- [8] <http://www.elkem.com>. (10.2.2008)
- [9] RICHARD, P., CHEYREZY, M.H., Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, ACI Spring Convention, San Francisco, 1994.
- [10] GOLDMAN, A., BENTUR, A., The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength, Cement and Concrete Research, 23, 4, pp. 962–972, 1993.
- [11] YEĞİNOBALI, A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği /AR-GE Enstitüsü, 2. Baskı, sf. 18-46, Ankara, 2002.

- [12] AVAR, D., Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, SF. 27-32, 2006.
- [13] TAŞDEMİR, C., Combined Effects of Mineral Admixtures and Curing Conditions on The Sorptivity Coefficient of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 10, pp. 1637–1642, 2003.
- [14] TAŞDEMİR, C., TAŞDEMİR, M.A., MILLS, N., BARR, B.I.G., LYDON, F.D., Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Postpeak Response of Concrete in Bending, *ACI Mater. J.*, 96, 1, pp. 74–83, 1999.
- [15] TAŞDEMİR, C., TAŞDEMİR, M.A., MILLS, N., BARR, B.I.G., LYDON, F.D., Effects of Silica Fume and Aggregate Size on Brittleness of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 26, 1, pp. 63–68, 1996.
- [16] TAŞDEMİR, C., TAŞDEMİR, M.A., GRIMM, R., KÖNIG, G., Microstructural Effects on Brittleness of High Strength Concretes, in: F.H., Wittmann (Ed.), *Fracture Mechanics of Concrete Structures, FRAMCOS-2*, Aedificatio Publishers, Freiburg, Germany, pp. 125–134, 1995.
- [17] TAŞDEMİR, M.A., TAŞDEMİR, C., AKYÜZ, S., JEFFERSON, A.D., LYDON, F.D., BARR, B.I.G., Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three Phase Composite Model Approach, *Cement and Concrete Composites*, 20, 4, pp. 301–318, 1998.
- [18] LARRARD, F., SEDRAN, T., Optimization of Ultra-High-Performance Concrete By The Use of A Packing Model, *Cement and Concrete Research*, 24, 6, pp. 997–1009, 1994.
- [19] DUGAT, J., ROUX, N., BERNIER, G., Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, *Materials and Structures*, 29, 4, pp. 233-240, 1996.
- [20] TAŞDEMİR M.A., KOCATÜRK, A.N., HABERVEREN, S., ASLAN, G., Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar, İstanbul, pp. 447–457, 2005.
- [21] DALLAIRE, E., AITCIN, P.C., LACHEMI, M., High-Performance Powder, University of Sherbrooke Source: Civil Engineering (New York), *ASCE Civ. Eng. Mag. USA*, 68, 1, pp. 48-51, 1998.
- [22] DOWD, W.M., DAURIAC, C.E., Reactive Powder Concrete, HDR Engineering, Inc Source: Construction Specifier, Construction Specifications Institute Inc, Alexandria, VA, USA, 49, 12, pp. 47–52, 1996.

- [23] GILLILAND, S.K., Reactive Powder Concrete (RPC), A New Material For Prestressed Concrete Bridge Girders, HDR Engineering, Inc Source: Structures Congress-Proceedings of The 14th Structures Congress. Part 1 of 2, Chicago, IL, USA, pp. 125–132, 1996.
- [24] O'NIEL, F.E., DAURIAC, E.C., GILLILAND, S.K., Development of Reactive Powder Concrete (RPC) Products in The United States Construction Market, ACI, Convention Committee 363, High-Strength Concrete, An International Perspective, Montreal, SP 167-12, 249–261, 1997.
- [25] TEICHMAN, T., SCHMIDT, M., Influence of The Packing Density of Fine Particles on Structure, Strength and Durability of UHPC, International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, pp. 312-323, 2004.
- [26] MA, J., ORGASS, M., DEHN, F., SCHMIDT, D., TUE, N.V., Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates, International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, pp. 205-212, 2004.
- [27] SADREKARIMI, A., Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 2, 3, pp. 409–417, 2004.
- [28] ADELIN R., BEHLOUL M., High Ductile Beams Without Passive Reinforcement, 4th International Symposium On Utilization Of High-Strength/High Performance Concrete, Paris, France, pp. 1383–1390, 1996.
- [29] ADELIN R., BEHLOUL M., BERNIER G., High Ductile Beams Without Passive Reinforcement, FIP Symposium on Post-Tensioned Concrete Structures, Concrete Society Publication CS112/113, pp. 592–606, 1996.
- [30] MATTE, V., MORANVILLE, M., Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes, Cement and Concrete Composites, 21, 1, pp. 1–9, 1999.
- [31] BLAIS, P.Y., COUTURE, M., Precast, Prestressed Pedestrian Bridge World's First Reactive Powder Concrete Structure, PCI Journal, 44, 5, pp. 61-71, 1999.
- [32] CAVILL, B., CHIRGWIN, G., The World's First RPC (Ductal) Road Bridge at Shepherds Creek, NSW, Austroads 5th Bridge Conference, Hobart, Australia, pp. 1–13, 2004.
- [33] CAVILL, B., REBENTROST, M., Reactive Powder Concrete Bridges, Austroads 6th Bridge Conference, Perth, Australia, pp. 11-23, 2006.

- [34] <http://www.wapellocounty.org/roads/marshall.htm>. (4.3.2008)
- [35] BIERWAGEN, D., ABU-HAWASH, A., Ultra High Performance Concrete Highway Bridge, Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, pp. 18–19, 2005.
- [36] RICCIOTTI, R., Bridge to the Future, ASCE Civil Engineering Magazine, 71, 1, pp 1–45, 2001.
- [37] TANAKA, Y., MUYSA, H., OOTAKE, A., SHIMOYAMA, Y., KANEKO, A., Design and Construction of Skata-Mirai Footbridge Using Reactive Powder Concrete, Proceedings of the 1st Fib. Congress, Osaka, Japan, pp. 417–424, 2002.
- [38] REBENTROST, M., Design and Construction of the First Ductal Bridge in New Zealand, New Zealand Concrete Industry Conference, Auckland, New Zealand, pp. 1–100, 2005.
- [39] WEN-YU, J., MING-ZHE, A., GUI-PING, Y., JUN-MIN, W., Study on Reactive Powder Concrete Used in the Sidewalk System of the Qinghai-Tibet Railway Bridge, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, pp. 333–339, 2007.
- [40] <http://www.ductal-lafarge.com>. (4.4.2008)
- [41] <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/3147.pdf> (6.7.2008)
- [42] WALRAVEN, J., The Evolution of Concrete, Structural Concrete, Journal of Fib, P1, 1, 3–11, 1999.
- [43] BONNEAU, O., LACHEMI, M., DALLAIRE, E., DUGAT, J., AITCIN, P.C., Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes, ACI Materials Journal, 94, 4, 286–290, 1997.
- [44] FEYLESSOUFI, A., VILLIERAS, F., MICHOT, L. J., DE DONATO, P., CASES, J. M., RICHARD, P., Water Environment and Nanostructural Network in a Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Composites, 18, 1, pp. 23–29, 1996.
- [45] CHAN, Y., CHU, S., Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, 34, 7, pp. 1167–1172, 2004.
- [46] BONNEAU, O., VERNET, C., MORANVILLE, M., AITCIN, P. C., Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete, Cement and Concrete Research, 30, 12, pp. 1861–1867, 2000.

- [47] BAYARD, O., PLE, O., Fracture Mechanics of Reactive Powder Concrete: Material Modeling and Experimental Investigations, *Engineering Fracture Mechanics*, 70, (7-8), pp. 839–851, 2003.
- [48] LEE, M.G., WANG, Y.C., CHIU, C.T., A Preliminary Study of Reactive Powder Concrete As A New Repair Material, *Construction and Building Materials*, 21, 1, pp. 182–189, 2007.
- [49] <http://www.beksa.com.tr/dramixDocs/depreamsunusu.pdf>. (02.04.2007).
- [50] YAZICI, H., The Effect of Curing Conditions on Compressive Strength of Ultra High Strength Concrete With High Volume Mineral Admixtures, *Building and Environment*, 42, 5, pp. 2083–2089, 2007.
- [51] TALEBINEJAD, I., BASSAM, S.A., IRANMANESH, A., SHEKARCHIZADEH, M., Optimizing Mix Proportions of Normal Weight Reactive Powder Concrete with Strengths of 200–350 Mpa, *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, pp. 133-41, 2004.
- [52] ROUGEAU, P., BORYS B., Ultra High Performance Concrete with Ultra Fine Particles Other Than Silica Fume, *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, International Symposium On Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, pp. 213–225, 2004.
- [53] TOPÇU, İ.B., KARAKURT, C., Reaktif Pudra Betonları, *İMO, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi (TMH)*, 437, sf. 25-30, 2005.
- [54] YAZICI, H., YİĞİTER, H., KARABULUT, A.Ş., BARADAN, B., Utilization of Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag As An Alternative Silica Source In Reactive Powder Concrete, 87, 12, pp. 2401–2407, 2008.
- [55] COPPOLA, L., TROLI, R., CERULLI, T., COLLEPARDI, M., The Influence of Materials on the Performance of Reactive Powder Concrete, *Proceedings of the International Congress on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures*, Florianopolis, Brazil, pp. 502–513, 1996.
- [56] PURKISS, J.A., Steel Fibre Reinforced Concrete of Elevated Temperatures, *Int. Journal of Cem. Composites and Lightweight Concrete*, 6(3):179-183, August, 1984.
- [57] <http://www.dti.dk/2783> (02.02.2008).
- [58] MOONEY, M., The Viscosity of Concentrated Suspension of Spherical Particles, *Journal of Colloids*, 6, pp. 162, 1951.
- [59] <http://www.materials.elkem.com> (07.03.2008).

- [60] KORKANÇ, M., TUĞRUL A., Beton Agregası Olarak Kullanılacak Bazaltların Alkali-Silis Reaksiyonu Yönünden İncelenmesi, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 17, 2, sf. 161-169, 2004.
- [61] AITCIN, P.C., High Performance Concrete, E.&F.N. SPON, New York, 2004.
- [62] <http://www.beksa.com.tr>. (04.07.2007).
- [63] NAWY, E.G., Concrete Construction Engineering Handbook, CRC Press, 2. Edition, sf. 22-5, USA, 2008.
- [64] COLLEPARDI, M., Admixtures-Enhancing Concrete Performance, 6th Int. Congress on Global Construction and Ultimate Concrete Opportunities, University of Dundee England, 2005.
- [65] MINDESS, S., YOUNG, J.F., DARWIN, D., Concrete, Prentice-Hall, Pearson Education Inc., Second Edition, 644, 2003.
- [66] RAMYAR, K., Portland Çimentosu–Süperakışkanlaştırıcı Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörler, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi, 2007.
- [67] KAWAI, T., State of the Art Report on High-Strength Concrete in Japan–Recent Developments and Applications, The JSCE-VIFCEA Joint Seminar on Concrete Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam, pp. 87-107, 2005
- [68] FURNAS, C.C., Grading Aggregates - I. - Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density, Industrial and Engineering Chemistry, American Chemical Society (ACE), 23, 9, pp. 1052-1058, 1931.
- [69] GLAVIND, M., OLSEN, G.S., PETERSEN, C., Packing calculations and Concrete Mix Design, Teknologisk Institut Beton, The Nordic Concrete Federation, Taastrup, Denmark, 13, 2, pp. 21-34, 1993.
- [70] FULLER, W, THOMPSON, S.E, The Laws of Proportioning Concrete, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Paper no 1053, pp 67-143, 1907.
- [71] SHAKHMENKO, G., BIRSH, J., Concrete mix design and optimization, 2nd International Ph.D. Symposium in Civil Engineering, Budapest, Hungary, pp. 1-8, 1998,

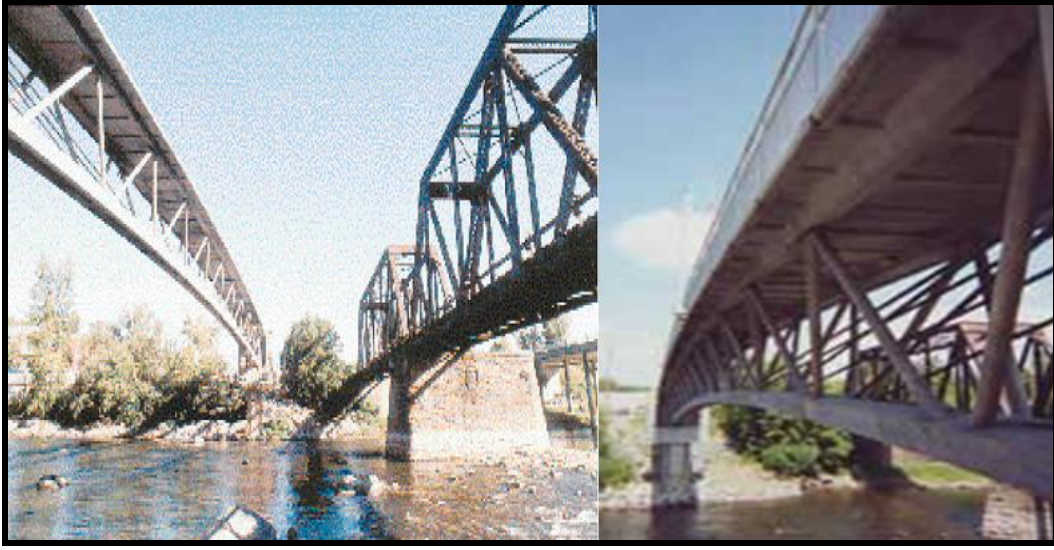
- [72] UTHUS, L., HERMANSSON, A., HORVLI, I., HOFF, I., A Study On The Influence of Water And Fines on the Deformation Properties and Frost Heave of Unbound Aggregates, Proceedings of the 13th International Conference on Cold Regions Engineering, Orono, Main, 2006.
- [73] ABDEL-JAWAD, Y.A., ABDULLAH, W.S., Design of Maximum Density Grading, Construction and Building Materials, 16, 8, pp. 495-508, 2002.
- [74] TS EN 12390-3, Beton-Sertleşmiş Beton Deneylemleri-Bölüm 3: Deneysel Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türkiye Standartları Enstitüsü, 2003.
- [75] ASTM C 39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM (American Society for Testing and Materials), 1996.
- [76] TS 3502, Betonda Statik Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Tayini, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1981.
- [77] ASTM C 469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM (American Society for Testing and Materials), 1996.
- [78] TS 10513, Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1992.
- [79] TS 10514, Beton - Çelik Tel Takviyeli - Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1992.
- [80] TS 10515, Çelik Tel Takviyeli Betonun Eğilme Mukavemeti Deneysel Metodu, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1992.
- [81] ASTM C 1018, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), ASTM (American Society for Testing and Materials), V 4.02, pp. 637-644, 1989.
- [82] JSCE Standard SF-4, Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete, pp. 58-66, 1984.
- [83] SUKONTASUKKUL, P., Toughness Valuation of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Beams Under Bending, Thammasa Int. J. Sc. Tech., 9, 3, pp. 35-41, 2004.
- [84] NATARAJA, M.C., DHANG, N., GUPTA, A.P., Toughness Characterization of Steel Fiber-Reinforced Concrete by JSCE Approach, Cement and Concrete Research 30, 4, 593-597, 2000.

- [85] ÖZALP, F., Ultra Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Davranışı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, SF. 36-40, 2006.
- [86] ÇETİN, A.E., Matlab 6.5, Alfa yayınları, sf. 20-240, İstanbul, 2003.
- [87] SAATY, T.L., Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting Resource Allocation, 2nd Ed., 20-110, 1990,
- [88] <http://www.isl.itu.edu.tr/ya/AHAS.pdf> (19.01.2009)
- [89] TAHA, H.A., (Çevirenler BARAY, Ş.A., ESNAF, Ş.), Yöneylem Araştırması, 6. Baskı, Literatür Kitapevi, sf. 511-525, İstanbul, 2000.
- [90] TS 3323, Beton Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması, Hızlandırılmış Kürü ve Basınç Dayanım Deneyi, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1979.
- [91] TS 3648, Önyapımlı Beton Elemanlara Atmosfer Basıncı Altında Buhar Kürü Uygulama Kuralları, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1984.
- [92] HEGGER, J., TUCHLINSKI, D., KOMMER, B., Bond Anchorage Behavior and Shear Capacity of Ultra High Performance Concrete Beams, International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, pp. 312-323, , 2004.
- [93] ZANNI, H., CHEYREZY, M., MARET, V., PHILIPPOT, S., NIETO, P., Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction In Reactive Powder Concrete (RPC) Using ²⁹Si NMR, Cement Concrete Res 26, 1, pp. 93–100, 1996.
- [94] NEVILLE, A.M, Properties of Concrete, 4th edition, Longman Group Limited, England, sf. 25-300, 1995.
- [95] YILMAZ, K., Tekrarlı Vibrasyonun Beton Kalitesindeki Önemi, Beton2004 Kongresi, İstanbul, 2004.
- [96] UYAN, M., PEKMEZCİ, B.Y., Tekrarlı Vibrasyonun Beton Özelliklerine Etkisi, Beton Prefabrikasyon Dergisi, Sayı 60, sf. 5-8, 2001.
- [97] UZKUT, M., ÖZDEMİR, İ., Farklı Çeliklere Uygulanan Değişen Isıtma Hızlarının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 3, 3, sf. 65-73, 2001.
- [98] LONG, G., WANG, X., XIE, Y., Very-High-Performance Concrete with Ultrafine, Cement and Concrete Research, 32, 4, pp. 601–605, 2002.

- [99] DEMİRBOĞA, R., Influence of Mineral Admixtures on Thermal Conductivity and Compressive Strength of Mortar, *Energy and Buildings* 35, 2, pp. 189–192, 2003
- [100] <http://www.flyash.info/2005/79liv.pdf> (24.01.2009)
- [101] <http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ITA/servizi/pdf/aggiunte/21.pdf> (24.01.2009)
- [102] GÜVENSOY, G., Yüksek Performanslı Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Kırılma Parametreleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, SF. 20-90, 2004.
- [103] BETTERMAN, L.R., OUYANG, C., SHAH, S.P., Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*, 2, 2, pp. 53–61, 1995.

EKLER

Ek A Reaktif Pudra Betonları Kullanılarak Yapılan Köprüler



Şekil A.1. Sherbrooke şehrindeki ilk RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü [31].



Şekil A.2. Shepherds ırmağı üzerindeki, RPB kullanılarak yapılan ilk araç köprüsü [32].



Şekil A.3. RPB'den araştırma amaçlı yapılmış köprü kirişleri [33].



Şekil A.4. Wapello'daki, RPB kullanılarak yapılan şehir köprüsü kirişleri [34, 35].



Şekil A.5. Wapello'daki, RPB kullanılarak yapılan şehir köprüsü [34, 35].



Şekil A.6. Sunyudo'da üzerinde RPB kullanılarak yapılan ilk köprü'nün kiriş resmi [36].



Şekil A.7. Sakata-Mirai RPB kullanılarak yapılan yaya köprüsü [37].



Şekil A.8. Papatoetoe ve Penrose RPB kullanılarak yapılan üst geçit köprüsü [38].

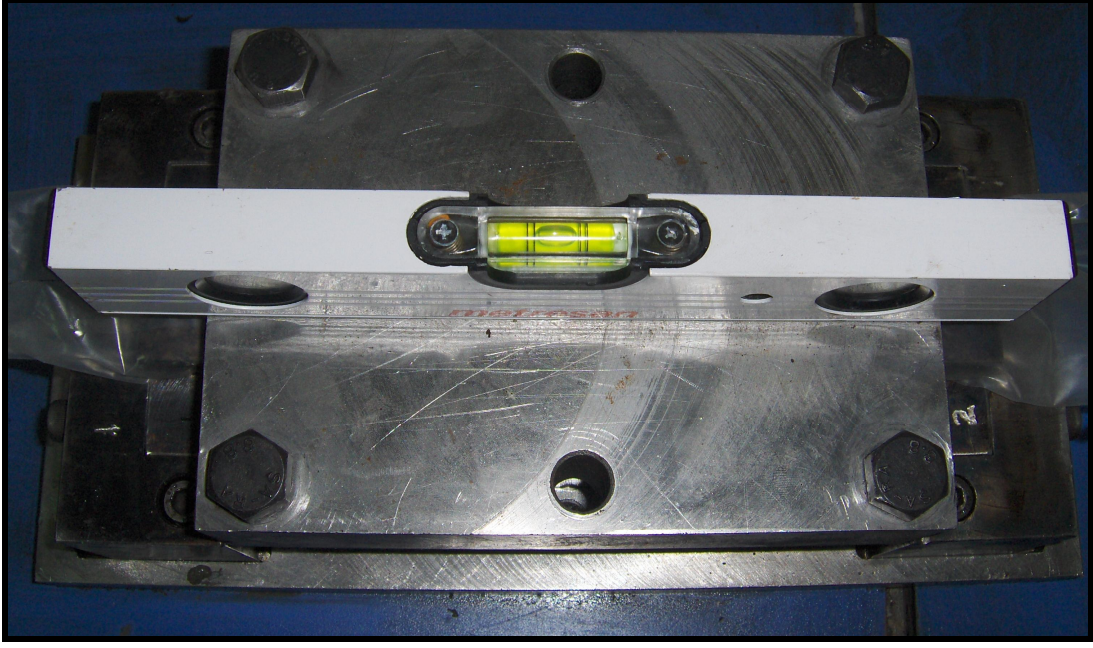
Ek B Beton Sıkıştırma Kalıpları



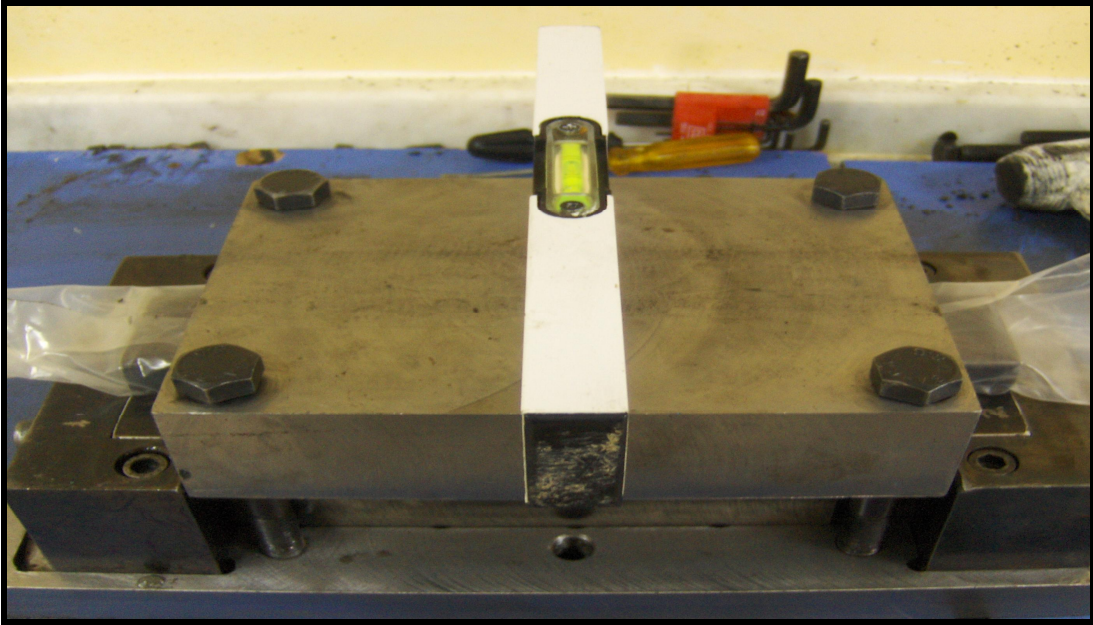
Şekil B.1. Silindir kalıp ve su kanalları



Şekil B.2. Kalıbın yan ve alt parçalarına açılan su çıkış kanalları



a)



b)

Şekil B.3. a Kalıp düzeneğinin uzun kenar doğrultusunda terazisinin ayarlanması
b Kalıp düzeneğinin kısa kenar doğrultusunda terazisinin ayarlanması



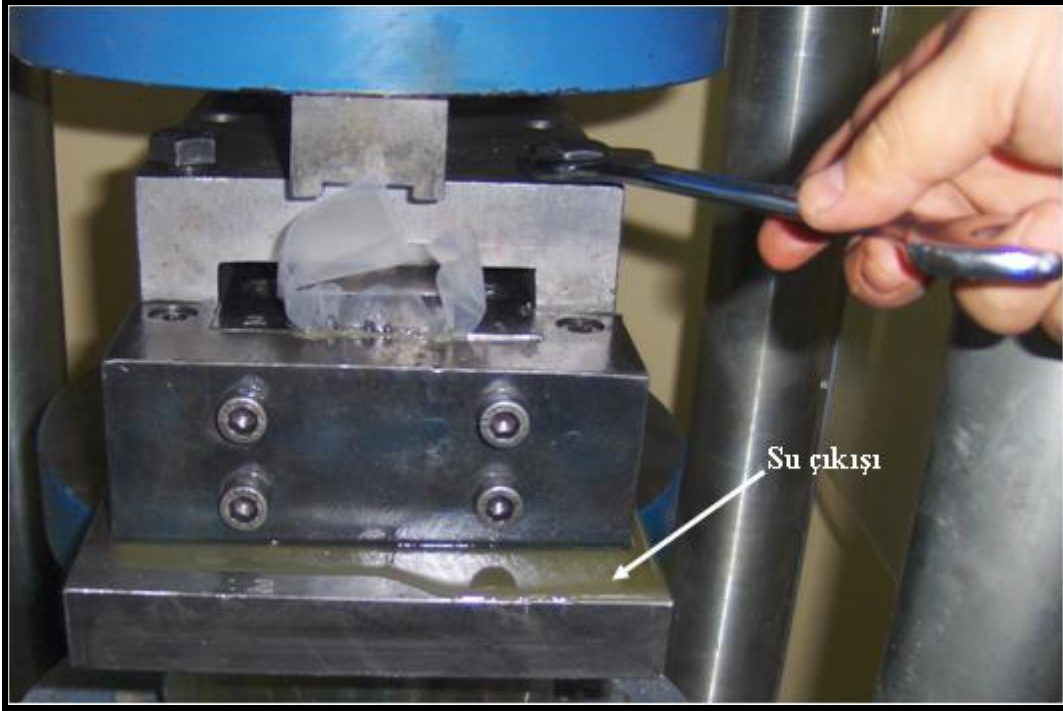
a)



b)

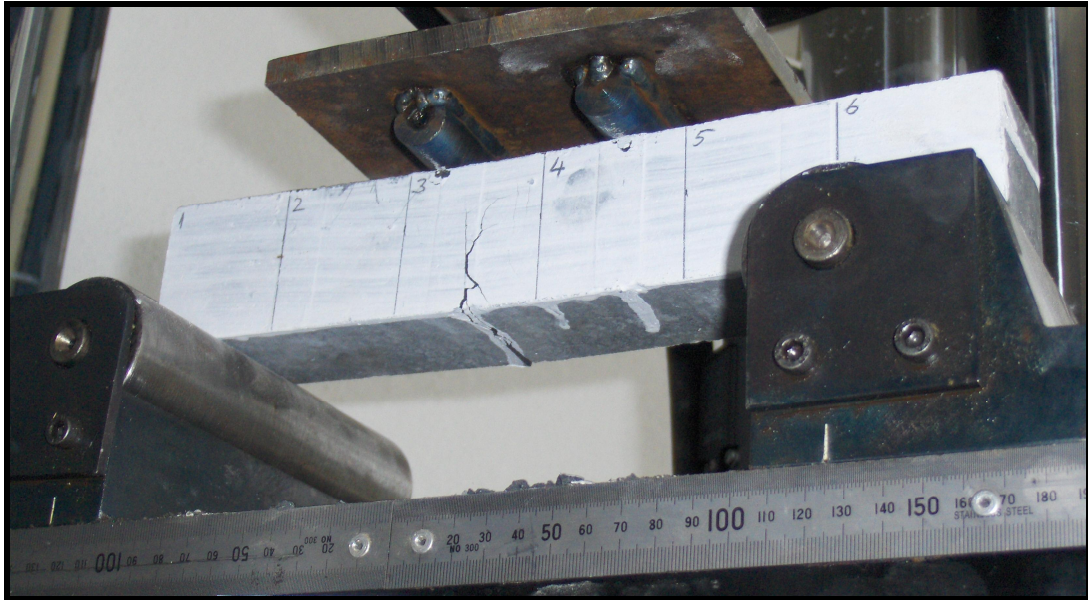
Şekil B.4.a Kalıbın yüklemeye hazır hale getirilmesi

b Kalıp sistemine yük uygulanması



Şekil B.5. RPB'nin sıkışması sonucu gevşeyen vidaların sıkılması

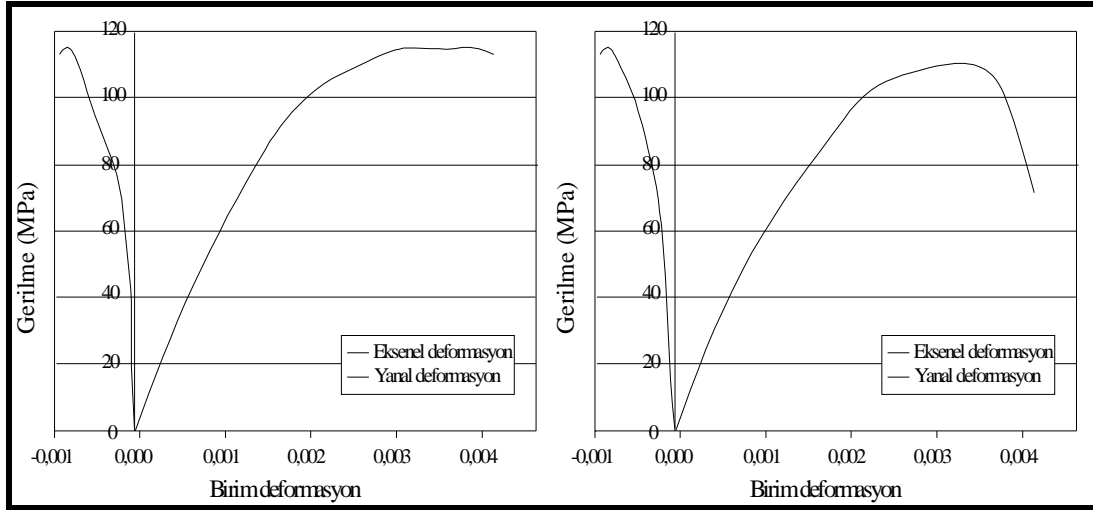
Ek C Deney Numunelerine Ait Ek Şekil ve Grafikler



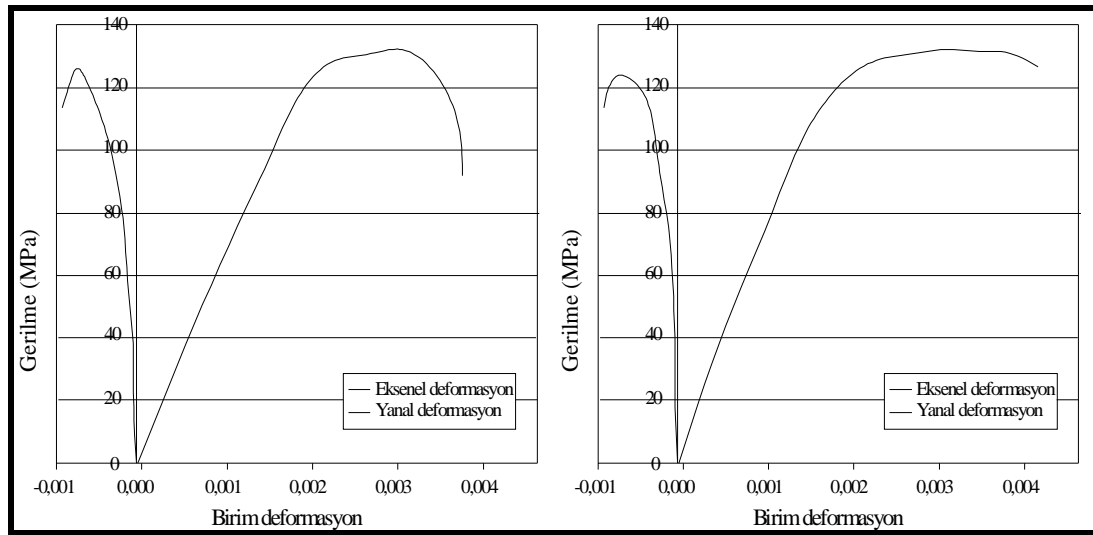
Şekil C.1. Eğilme deney düzeneği



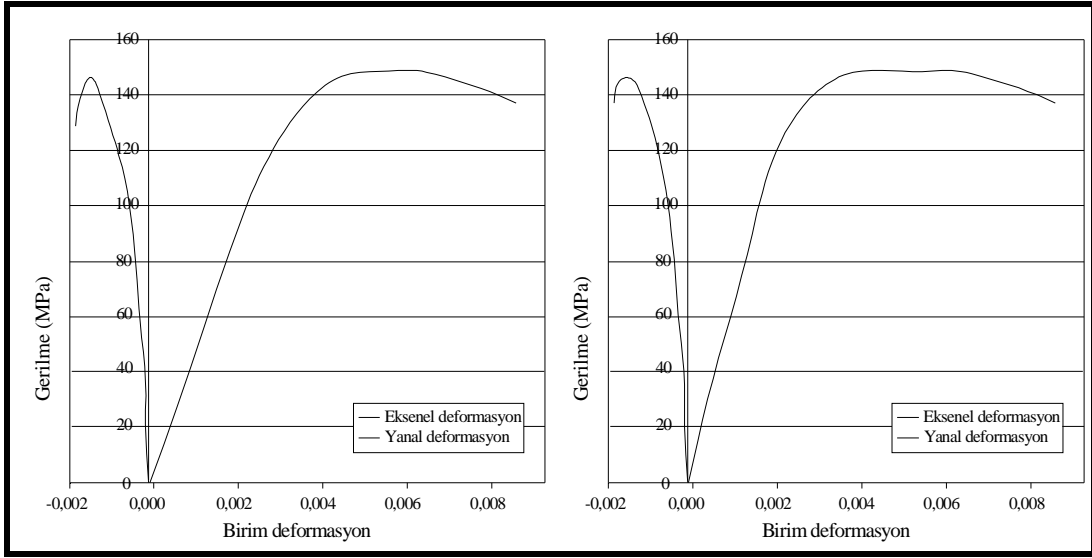
Şekil C.2. Eğilme deneyi sonucu kırılmış Şahit ve lifli içeren numuneler



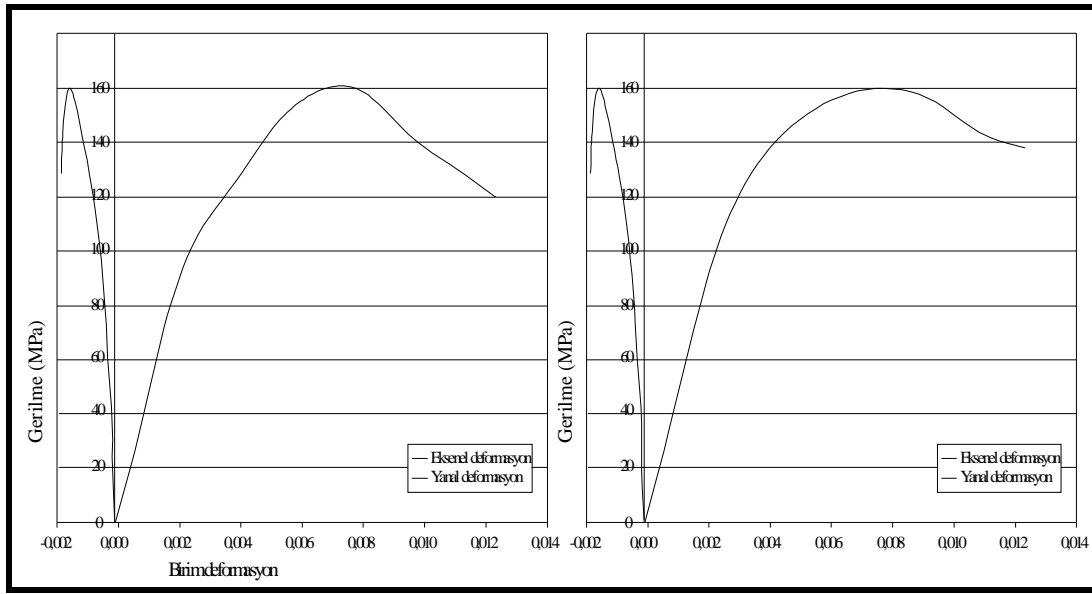
Şekil C.3. Lif oranına göre şahit numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafikleri



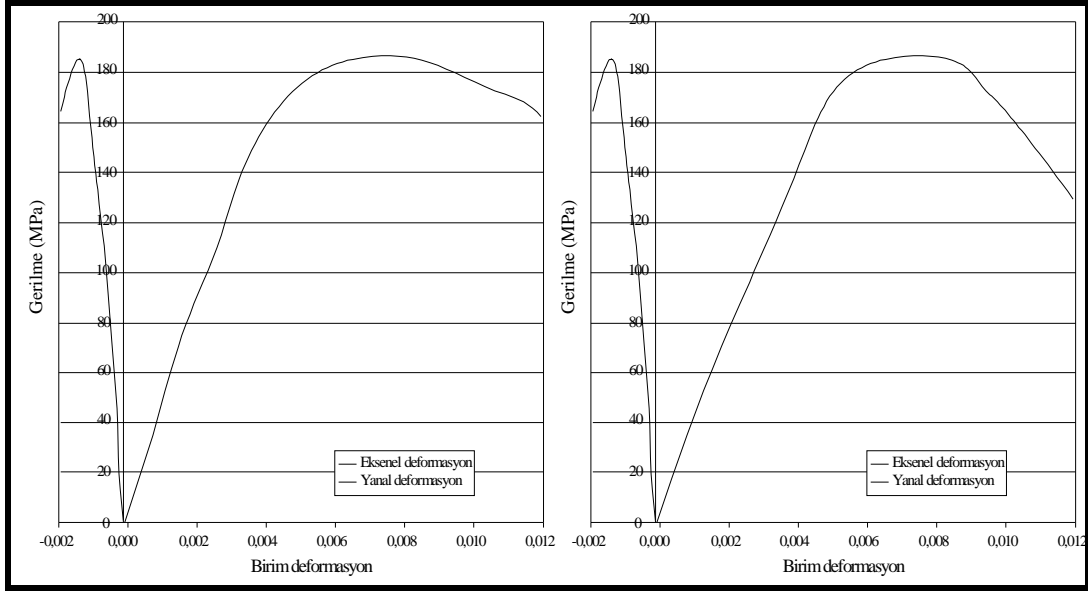
Şekil C.4. Lif oranına göre %2 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafikleri



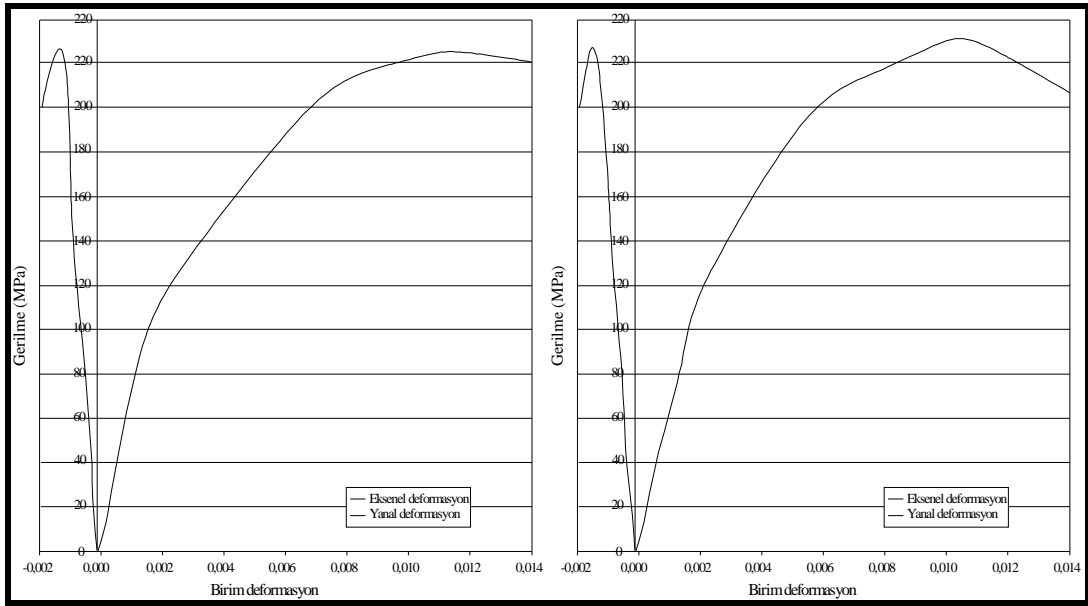
Şekil C.5. Lif oranına göre %4 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafikleri



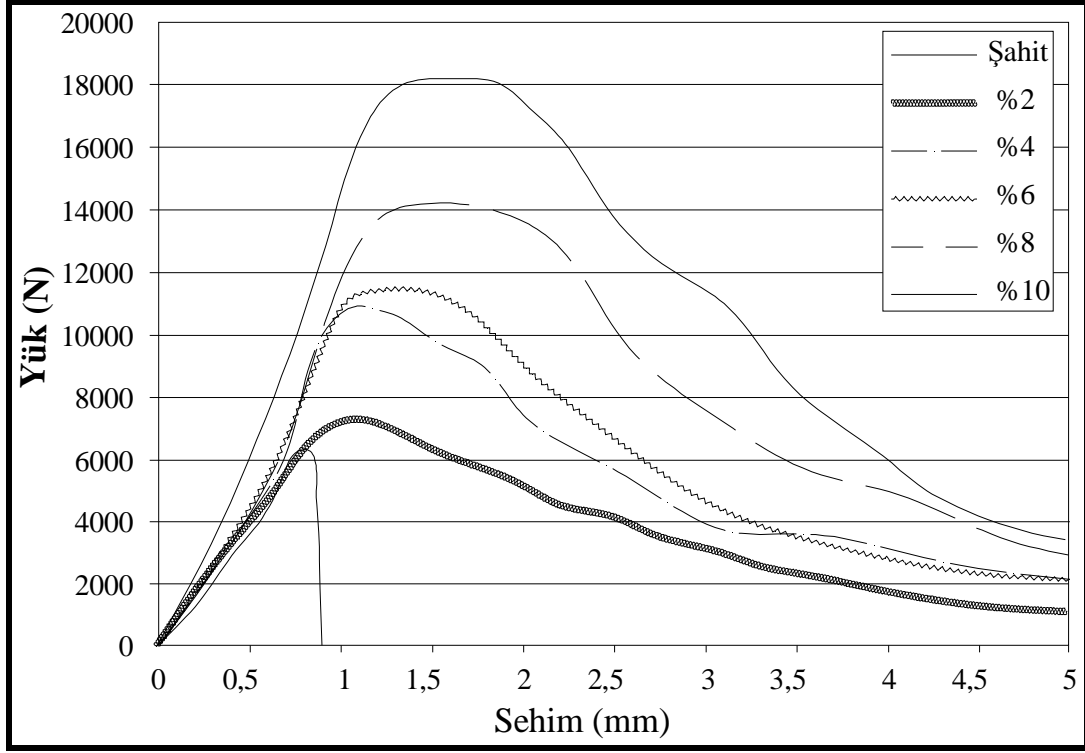
Şekil C.6. Lif oranına göre %6 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafikleri



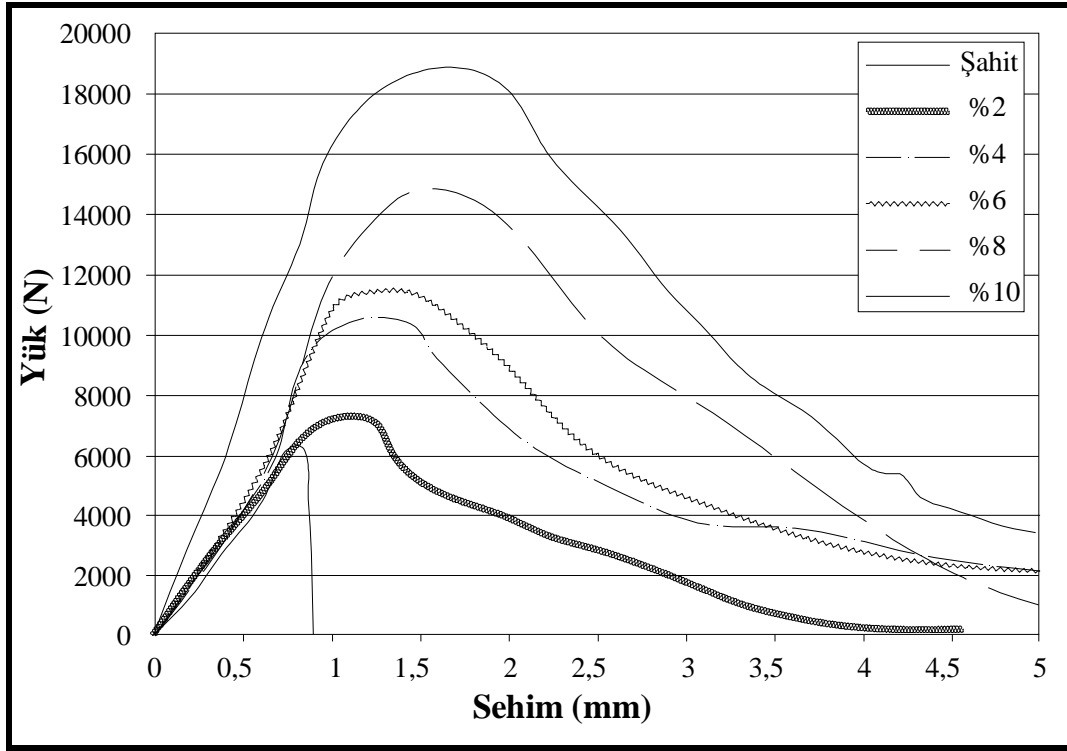
Şekil C.7. Lif oranına göre %8 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafikleri



Şekil C.8. Lif oranına göre %10 lif içeren numunenin gerilme-yanal ve düşey deformasyon grafikleri



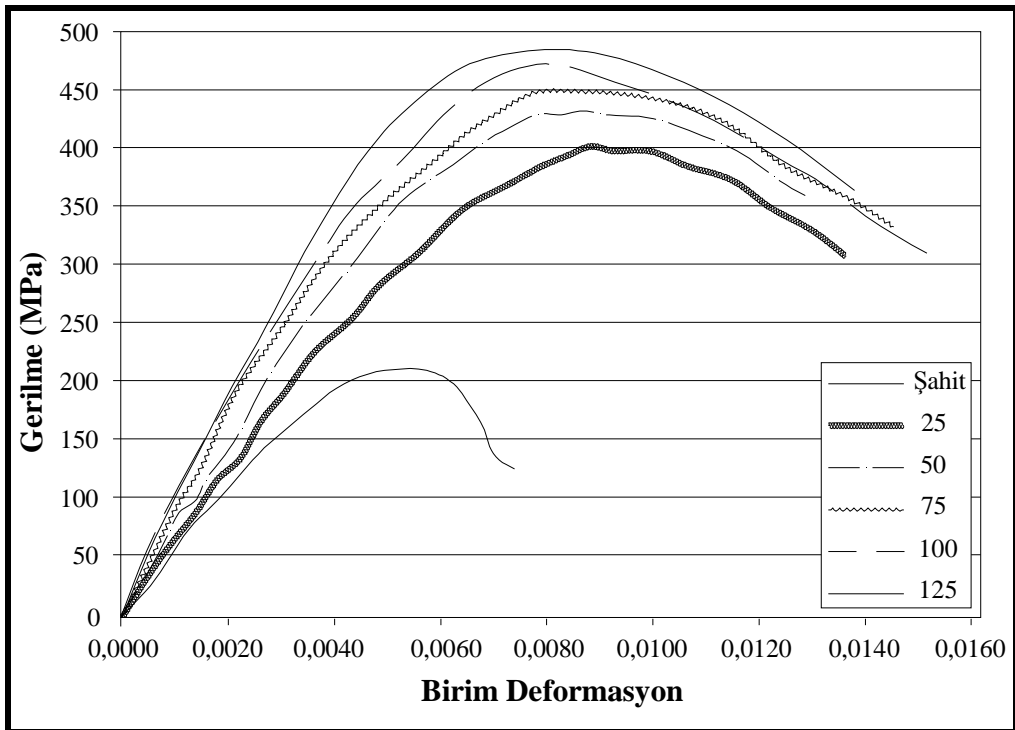
Şekil C.9. Lifli ve lifsiz numunelerin yük sehim eğrileri



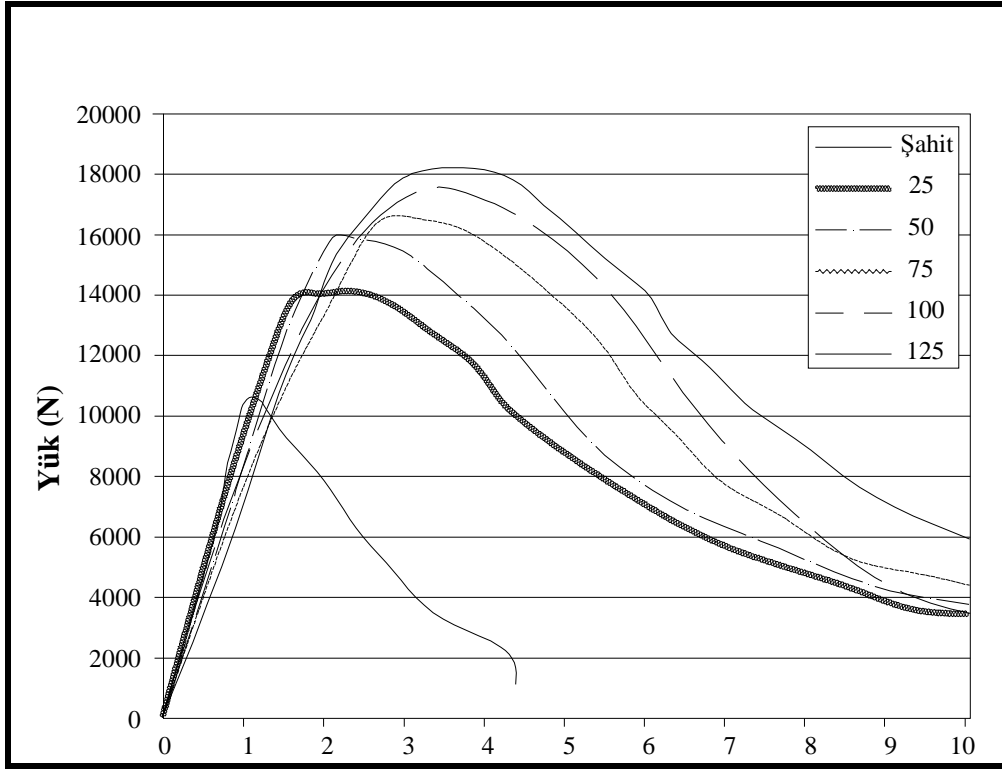
Şekil C.10. Lifli ve lifsiz numunelerin yük sehim eğrileri



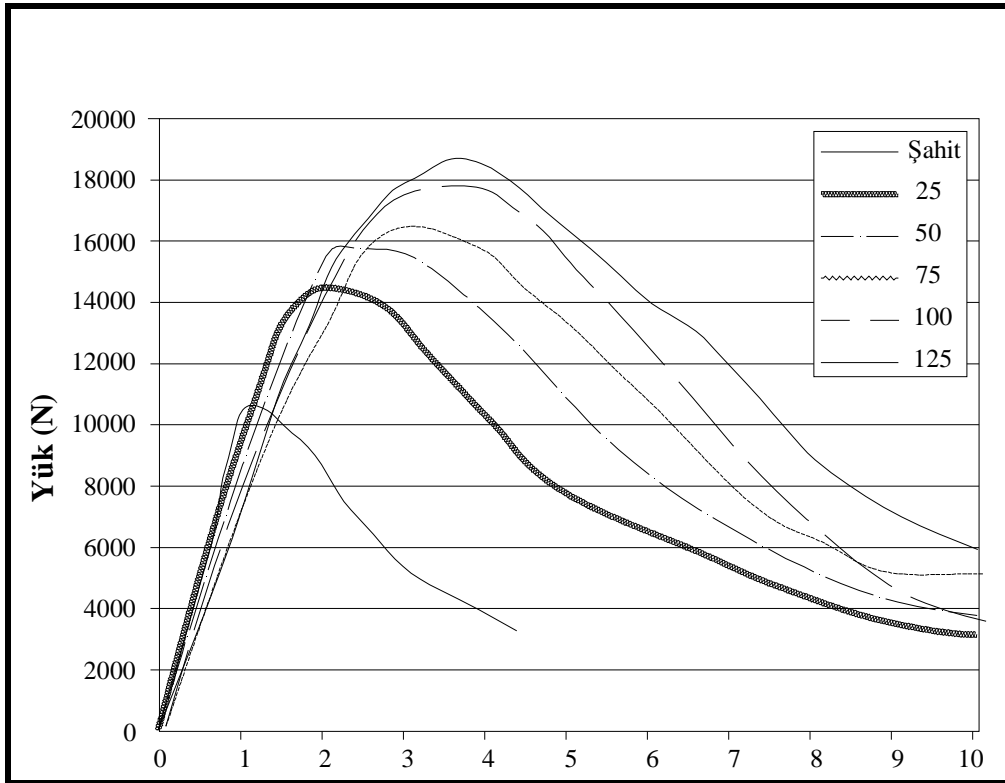
Şekil C.11. Sıkıştırma basıncı uygulanmış numunelere ait gerilme-deformasyon grafikleri



Şekil C.12. Sıkıştırma basıncı uygulanmış numunelere ait gerilme-deformasyon grafikleri



Şekil C.13. Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait yük-sehim grafikleri



Şekil C.14. Sıkıştırma basıncı uygulanmış RPB'ye ait yük-sehim grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

Metin İpek, 28.05.1977'de Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Şehit Kubilay İlköğretim Okulunda tamamladıktan sonra Ankara Yapı Meslek Lisesi Yapı Bölümüne girdi. 1994 yılında buradan mezun olarak aynı yıl Kırıkkale Üniversitesi Kırıkkale Meslek Yüksek Okulu İnşaat bölümünü kazandı ve 1997 yılında mezun oldu. 1997 yılında başladığı Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünden 2001 yılında mezun oldu ve aynı bölümde yüksek lisans eğitimine başladı. 2004 yılında yüksek lisansını bitirerek Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde doktora eğitimine başladı. Halen aynı bölümde doktora eğitimine devam etmektedir. Ayrıca 2001 yılından itibaren Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.