

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**REAKTİF PUDRA BETONLARINDA ÇATLAK
OLUŞUMUNUN KALICILIĞA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Farhad DABESTANI

Temmuz, 2014

İZMİR

**REAKTİF PUDRA BETONLARINDA ÇATLAK
OLUŞUMUNUN KALICILIĞA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı

Farhad DABESTANI

Temmuz, 2014

İZMİR


YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

FARHAD DABESTANI, tarafından yönetiminde hazırlanan **DOÇ. DR. HALİT YAZICI** “**REAKTİF PUDRA BETONLARINDA ÇATLAK OLUŞUMUNUN KALICILIĞA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Halit YAZICI

Yönetici



Doç. Dr. Fennisi YAZICI



Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL

Jüri Üyesi Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca sahip olduğu bilgi birikimi ve güler yüzlü yaklaşımıyla bilim yolunda bana ışık tutan değerli danışman hocam Sn. Doç. Dr. Halit YAZICI'ya teşekkürlerimi borç bilirim.

Çalışma boyunca değerli fikirleri ile beni yönlendiren ve her zaman daha iyisini yapabileceğime inandıran Sn. Arş. Gör. Çağlar YALÇINKAYA'ya çok teşekkür ederim.

Bu çalışma 110M691 numaralı ve "Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Boyutsal Kararlılığının İncelenmesi ve Boyutsal Kararlılığın Durabilite Özelliklerine Etkisinin Araştırılması" başlıklı TÜBTAK 1001 araştırma projesinin bir bölümü olup, desteği için TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı Öğretim Görevlileri Sn. Yrd. Doç. Dr. Hüseyin YİĞİTER, Sn. Arş. Gör. Muhammer KESKİNATEŞ ve İnşaat Yük. Müh. Ahsanollah BEGLARIGALE'e çok teşekkür ederim. Sn. Prof. Dr. Bülent BARADAN ve Sn. Prof. Dr. Selçuk TÜRKEİ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin düzenlemesi aşamasında yardım, fikir ve önerilerini benden esirgemeyen değerli arkadaşlarım Yahya Baran Oruç ve Elyar SAEEDİ İLKHCHİ'ye teşekkür ederim.

Yaklaşık üç yıldır uzağımda olsalar da bana olan güven ve inançları ile her zaman yanımda hissettiğim, beni destekleri ile yücelten, bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan, bana hep çok şanslı olduğumu hissettiren canım aileme sonsuz teşekkürler.

Farhad DABESTANI

REAKTİF PUDRA BETONLARINDA ÇATLAK OLUŞUMUNUN KALICILIĞA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Reaktif Pudra Betonu (RPB) üstün mekanik ve kalıcılık özellikleri sayesinde giderek daha yaygın kullanılmaya başlanan yüksek performanslı çimento bazlı kompozit malzemedir. Bu malzemenin mekanik özellikleri literatürde yaygın olarak incelenmesine rağmen, mekanik özellik-büzülme-kalıcılık ilişkisi ayrıntılı incelenmemiş bir konudur. Bu çalışma 110M691 Nolu Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Boyutsal Kararlılığının İncelenmesi ve Boyutsal Kararlılığın Durabilite Özelliklerine Etkisinin Araştırılması başlıklı Tübitak projesinin bir bölümüdür. Proje çalışmaları kapsamında geliştirilen RPB karışımlarının boyutsal kararlığı ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Seçilen karışımlar için boyutsal kararlılık-mekanik özellik-donma-çözülme dayanıklılığı ilişkisi bu tez çalışması kapsamında incelenmiştir.

Çalışmada seçilen karışımlar kontrol, çimento yerine uçucu kül veya yüksek fırın curufu ikame edilen karışımlardır. Hazırlanan RPB karışımlarının uygun ortamda herhangi bir kısıtlama olmadan ve kuruma ortamında kısıtlanmış halde tutulan örneklerin, çatlak gelişimi, mekanik özellikler, donma-çözülme sonrası dayanıklılıkları belirlenmiştir. Bu karışımlara çelik lif eklenmesinin etkisi ayrıca incelenmiştir.

Çalışma sonuçları lifsiz karışımlarda kısıtlanmış halde oluşan büzülme nedeniyle ortaya çıkan çatlak gelişiminin mekanik özellikleri ve donma-çözülme dayanıklılığını olumsuz etkilediğini göstermiştir. Çelik lifli karışımlarda ise donma-çözülme dayanıklılığının 500 çevrim sonunda bile oldukça iyi olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler : Reaktif pudra betonu, durabilite, büzülme, çatlak, donma-çözülme.

THE EFFECT OF CRACK FORMATION ON DURABILITY PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE

ABSTRACT

Reactive Powder Concrete (RPB) is a high-performance cement-based composite material which is being used increasingly due to its superior mechanical and durability properties. The mechanical properties of Reactive Powder Concrete (RPC) have been investigated by many researchers in the literature. However, there is no detailed study about dimensional stability and its effect on durability. This study is a part of TÜBİTAK research project (PN: 110M691 Investigation of Dimensional Stability of High Performance Cement Based Composites and Its Effect on Durability Properties). Dimensional stability of mixtures was determined in this project previously. The shrinkage – mechanical properties – freezing and thawing interaction of RPC mixtures were investigated in this thesis.

Control, ground granulated blast furnace slag and fly ash replaced mixtures were chosen for experimental studies. Crack development, mechanical properties and freeze-thaw resistance of RPC mixtures were determined. Two different kept conditions were used. These are the proper environment without restriction and dry environment with restricted condition. The effect of steel fiber usage in the RPC mixtures was also investigated.

Shrinkage cracks were decreased the mechanical properties and freeze-thaw strength of RPC mixtures without steel fiber. Fiber reinforced RPC exhibited good performance even after 500 freeze–thaw cycles.

Keywords: Reactive powder concrete, durability, shrinkage, crack formation, freezing - thawing.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xvii

BÖLÜM BİR - TEMEL YÖNLERİYLE REAKTİF PUDRA BETON..... 1

1.1 Yüksek Performanslı Betonlar	1
1.2 Reaktif Pudra Betonun Tanımı Ve Tarihiçesi	2
1.3 RPB’Nin Üretim Amaçları Ve Avantajları	4
1.4 Reaktif Pudra Betonunun Üretimi	5
1.5 Reaktif Pudra Betonunun Kullanım Alanları	5
1.6 RPB’de Kullanılan Malzemeler	6
1.6.1.Çimento Seçimi	6
1.6.2.RPB İçin Su Seçimi	6
1.6.3.RPB’de Kullanılan Agregalar	7
1.6.4.Silis Dumanı	8
1.6.5Uçucu Kül.....	9
1.6.6 Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	9

BÖLÜM İKİ-ÇELİK LİFLİ BETONLAR VE ÇELİK LİF İÇEREN REAKTİF PUDRA BETONLAR

10	
2.1 Çimentolu Kompozitlerde Kullanılan Lif Türleri	12
2.2 Çelik Lifli Betonlar	13
2.4 RPB’de Lif Kullanımı	23

BÖLÜM ÜÇ - BETON ÇATLAKLARI 25

3.1 Taze Beton Çatlakları	25
3.2 Sertleşmiş Beton Çatlakları	25
3.3 Çimento Bazlı Kompozitlerde Büzülme	26
3.3.1 Büzülme Mekanizmaları.....	27
3.3.1.1 Plastik Büzülme	27
3.4 RPB’de Büzülme.....	33

BÖLÜM DÖRT - BETONDA DONMA-ÇÖZÜLME OLAYI 37

4.1 Taze Betonda Donma-Çözülme	37
4.2 Sertleşmiş Betonda Donma-Çözülme	39
4.2.1 Donma Mekanizması	39
4.3 Hava Sürüklenmiş Beton.....	40
4.4 Buz Çözücü Tuzların Etkisi	43
4.5 Donma-Çözülme Hasarını Etkileyen Faktörlere Genel Bakış	44
4.5.1 S/Ç Oranı	44
4.5.3 Doygunluk Derecesi	47
4.5.4 Agrega.....	48
4.5.5 Çimento Tipi.....	49
4.5.6 Donma Hızı.....	50
4.5.7 Minimum Sıcaklık	50
4.5.8 Donmada Bekletilme Süresi	50
4.5.9 Kür Sıcaklığı.....	51
4.5.10 Süperakışkanlaştırıcılar.....	51
4.5.11 Mikrolifler.....	52
4.5.12 Genel Değerlendirme.....	53
4.6 Donma Hasarının İçyapı Etkileri.....	53
4.7 Reaktif Pudra Betonun D-Ç Dayanıklılığı	57

BÖLÜM BEŞ - DENEYSEL ÇALIŞMA 60

5.1 Amaç	60
5.2 RPB Karışımlarında Kullanılan Malzemeler	61
5.2.1 Çimento.....	61
5.2.2 Uçucu Kül.....	61
5.2.3 Silis Dumanı	62
5.2.4 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu	63
5.2.5 Agrega.....	63
5.2.6 Hiperakışkanlaştırıcı Katkı	64
5.2.7 Karışım Suyu	65
5.2.8 Mikro Lifler	65
5.3 Karışım Oranları –Taze Hal Özellikleri	65
5.3.1 Puzolan İkamesinin Araştırılması.....	66
5.4 Taze Hal	69
5.4.1 Karıştırma Prosedürü ve İşlenebilirlik deneyleri.....	69
5.6 Kısıtlanmış Durumda Çatlak Oluşturma Denemeleri ve Durabilite Çalışmaları.....	71
5.6.1 Kısıtlayıcı Kalıp Sistemi.....	71
5.6.2 Durabilite Çalışmaları.....	72
5.7 Donma-Çözülme Etkisinin Araştırılması	73
5.8 Deney Metotları.....	77
BÖLÜM ALTI - RPB’NİN ERKEN YAŞ BÜZÜLME DAVRANIŞI.....	79
6.1 Erken Yaş Büzülme Davranışı	82
BÖLÜM YEDİ-DONMA – ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİNİN ÇELİK LİFLİ KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ	86
7.1 Donma – Çözülme Çevrimlerinin Eğilme Performansına Etkisi	92
7.2 Genel Değerlendirme	107

BÖLÜM SEKİZ- DONMA – ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİNİN LİFSİZ KARIŞIMLARIN MEKANİK DAYANIMINA ETKİSİ..... 110

- 8.1 Donma – Çözülme Çevrimlerinin Basınç Dayanımına Etkisi..... 110
8.2 Donma – Çözülme Çevriminin Lifsiz Serilerin Eğilme Performansına Etkisi116
8.3 Genel Değerlendirme 128

BÖLÜM DOKUZ-DONMA – ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİNİN LİFLİ VE LİFSİZ SERİLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN KİYASLANMASI..... 130

BÖLÜM ON-DONMA – ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİNİN ÖRNEKLERİN ULTRASONİK SES GEÇİŞ HIZINA ETKİSİ..... 134

- 10.1 Lifli Serilerin Ses Geçiş Hızları 134
10.2 Lifsiz Serilerin Ses Geçiş Hızları 137

BÖLÜM ONBİR-BÜZÜLME ÇATLAKLARININ VE DONMA – ÇÖZÜLME ORTAMINDAKİ DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ 140

- 11.1 Genel Değerlendirme 156

BÖLÜM ONİKİ-SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 158

KAYNAKLAR 162

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Betonun evrimi kapsamında Basınç Dayanımı-Su/Ç İlişkisi.....	2
Şekil 1.2 RPB'den üretilmiş rögar kapağı ve yağmur suyu ızgarası.....	5
Şekil 1.3 Sherbrooke yaya köprüsü – Kanada	5
Şekil 1.4 Su/b grafiği	7
Şekil 1.5 Agregat tipinin RPB dayanımına etkisi	8
Şekil 2.1 Yüksek dayanımlı bir silindirin basınç deneyi esnasında gevrek kırılması.	11
Şekil 2.2 Japon Beton Enstitüsüne göre çimentolu kompozitlerin sınıflandırılması	12
Şekil 2.3 Maksimum basınç yükü aşıldıktan sonra lifli betonun uzayan kuyruk bölgesi	14
Şekil 2.4 Matris içerisinde ilerleyen çatlakın liflerce yakalanması	16
Şekil 2.5 Lifin çatlak sönümlediği gerçek fotoğraf	16
Şekil 2.6 Tek eksenli çekme altında kırılma zonu ve liflerin etkisi	18
Şekil 2.7 Çelik lifli kiriş numunelerde eğilme yükü – deplasman eğrisi	19
Şekil 2.8 Lifli çimentolu kompozitlerde eğilme etkisi altında	22
Şekil 2.9 RPB'de mikro ve makro lif kullanımı	29
Şekil 3.1 S/Ç oranı 0,45 olan kendiliğinden yerleşen beton için faz değişimi geçiş süreleri ve otojen büzülme	25
Şekil 3.2 İlk 24 saatte ve sonrasında etkili olan büzülme mekanizmalarının gruplandırılması	26
Şekil 3.3 Farklı kür koşullarında erken yaşlarda ve uzun vadede büzülme, rüzgar..	27
Şekil 3.4 Taze betonun çekme birim deformasyon kapasitesinin zamana bağlı değişimi	28
Şekil 3.5 Hidrate kalsiyum silikat (CSH) jelinin farklı nem koşullarında nemini kaybederek birbirine yaklaşması ile büzülme	29
Şekil 3.6 Karışım suyu miktarının kuruma büzülmesine etkisi	30
Şekil 3.7 S/Ç oranı ve agregat miktarının kuruma büzülmesine etkisi	31
Şekil 3.8 Altı ay boyunca kurutulmuş çimento hamuru ve 14 mm en büyük tane boyutlu agregat ile hazırlanan beton.....	31

Şekil 3.9 Benzer ince agrega/iri agrega oranına sahip karışımların S/Ç oranı değişimi ile kuruma büzülmesi ve bünyesel büzülme değerleri.....	9
Şekil 3.10 Farklı derinliklerdeki nem kaybı - kuruma zamanı ilişkisi.....	32
Şekil 3.11 Erken yaş kuruma büzülmesi eğilimleri	33
Şekil-3.12 Uzun dönemli büzülme eğilimi	34
Şekil 3.13 Farklı su/bağlayıcı oranı ve farklı yaşlarda RPB'nin kuruma büzülmesi..	34
Şekil 3.14 Farklı süper akışkanlaştırıcı dozajı ve farklı yaşlarda RPC'nin kuruma büzülmesi.....	35
Şekil 3.15 Su/bağlayıcı oranı 0,4 olan RPB'de 14. günde ortaya çıkan çatlaklar	35
Şekil 4.1 Geniş boşluklarda donmuş su ve ısınma sırasında buzun genleşmesi.	40
Şekil 4.2 Hava sürüklemenin ve S/Ç oranının donma-çözülmede ağırlık kaybına etkisi	42
Şekil 4.4 Tuz konsantrasyonu ve pullanma hasarı	44
Şekil 4.6 Hava boşluğu aralığı - boy değişimi ilişkisi, kritik L' değeri.....	46
Şekil 4.7 Agrega ortalama boşluk boyutunun artışıyla buz hasarına karşı artan dayanıklılık	48
Şekil 4.8 Kapiler porozitenin yüksek olduğu 30 µm genişliğindeki çimento pastası agrega arayüzeyi	54
Şekil 4.9 Yüksek performanslı çelik lifli çimentolu kompozitte makro çelik lifin, mikro lifler arasına gömülerek yarattığı sinerji	55
Şekil 4.10 Donma-çözülme çevrimi sonrası RPB'nin basınç dayanımının HSM ve RC ile kıyaslanması	58
Şekil 4.11 RPB ile çelik arasındaki aderansın HSM ve RC ile karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.12 RPB karışımına farklı boylarda gömülü kancalı lifin yük-sıyrılma eğrileri	59
Şekil 4.13 RPB ile çelik arasındaki aderansın HSM ve RC ile karşılaştırılması.....	59
Şekil 5.1 Karıştırıcı	65
Şekil 5.2 Mini Çökme ve V-kutusu deney aletleri	69
Şekil 5.3 Kendiliğinden yerleşen RPB hamur görüntüsü	70
Şekil 5.4 UK ve YFC ikamesinin yayılma çapına etkisi.....	70
Şekil 5.5 Büzülme kısıtlayıcı kalıp	71
Şekil 5.6 İklim kabini (Nem ve sıcaklık kontrollü)	72

Şekil 5.7 Taze RPB'nin iklim kabinine yerleştirilmesi.....	72
Şekil 5.8 D-Ç çalışmanın ön görülen akış şeması.....	74
Şekil 5.9 Donma – çözülme kabini	75
Şekil 5.10 Ultrases test cihazı	76
Şekil 5.11 Deplasman kontrollü kapalı devre eğilme test cihazı	78
Şekil 6.1 Lazer sensör ile büzülme ölçümünün mantığı	79
Şekil 6.2 Erken yaş büzülme test kabini	80
Şekil 6.3 Erken yaş büzülme kalıbı.....	80
Şekil 6.4 Otomatik Vicat cihazı ile priz sürelerinin tayini.....	82
Şekil 6.5 Kontrol karışımı, UK ve YFC ikameli örneklerin erken yaş bünyesel büzülme eğrileri.....	83
Şekil 6.6 Erken yaş bünyesel büzülmenin puzolan ikamesi ile değişimi.....	84
Şekil 6.7 Kontrol karışımı, UK ve YFC ikameli örneklerin erken yaş kuruma büzülmesi eğrileri	84
Şekil 6.8 Erken yaş kuruma büzülmesinin puzolan ikamesi ile değişimi	85
Şekil 7.1 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin basınç dayanımları	87
Şekil 7.2 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin basınç dayanımları	88
Şekil 7.3 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için 24 saat ve 28 gün bağıl basınç dayanımları	89
Şekil 7.4 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin bağıl basınç dayanımları	91
Şekil 7.5 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin bağıl basınç dayanımları.....	92
Şekil 7.6 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 DÇ sonrası (c), 500 DÇ sonrası (d), 300 DÇ eşlenik (e), 500 DÇ eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri	95
Şekil 7.7 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanmış halde bekletilen serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 DÇ sonrası (c), 500 DÇ sonrası (d), 300 DÇ eşlenik (e), 500 DÇ eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri	97

Şekil 7.8 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin eğilme dayanımları	98
Şekil 7.9 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin eğilme dayanımları	100
Şekil 7.10 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için 24 saat ve 28 gün bağıl eğilme dayanımları.....	100
Şekil 7.11 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin bağıl eğilme dayanımları	101
Şekil 7.12 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin bağıl eğilme dayanımları	102
Şekil 7.13 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin toklukları	104
Şekil 7.14 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin bağıl toklukları.....	104
Şekil 7.15 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin toklukları.....	105
Şekil 7.16 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin bağıl toklukları.....	106
Şekil 7. 17 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için 24 saat ve 28 gün bağıl tokluklar	107
Şekil 8.1 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin basınç dayanımları	111
Şekil 8.2 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin basınç dayanımları.....	112
Şekil 8.3 Kuruma ortamında lifsiz karışımlarda kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için 24 saat ve 28 gün bağıl basınç dayanımları.....	113
Şekil 8.4 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin bağıl basınç dayanımları.....	114
Şekil 8.5 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin bağıl basınç dayanımları	115
Şekil 8.6 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 DÇ sonrası (c), 500 DÇ sonrası (d), 300 DÇ eşlenik (e), 500 DÇ eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri.....	118

Şekil 8.7 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 DÇ sonrası (c), 500 DÇ sonrası (d), 300 DÇ eşlenik (e), 500 DÇ eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri	119
Şekil 8.8 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin eğilme dayanımları	120
Şekil 8.9 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin eğilme dayanımları	121
Şekil 8.10 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için lifsiz serilerin 24 saat ve 28 gün bağıl eğilme dayanımları	122
Şekil 8.11 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin bağıl eğilme	123
Şekil 8.12 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin bağıl eğilme dayanımları	124
Şekil 8.13 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin toklukları.....	125
Şekil 8.14 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin bağıl toklukları.....	125
Şekil 8.15 İlk 24 saat kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin toklukları.....	127
Şekil 8.16 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için lifsiz serilerin 24 saat ve 28 gün bağıl toklukları	127
Şekil 9.1 İlk 24 saat ideal koşulda serbest halde bekletilen serilerin lif ilavesi ile bağıl tokluklarının değişimi.....	130
Şekil 9.2 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin lif kullanımı ile bağıl tokluklarının değişimi	131
Şekil 9.3 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin lif kullanımı ile bağıl eğilme dayanımlarının değişimi	132
Şekil 9.4 İlk 24 saat ideal koşulunda serbest halde bekletilen serilerin lif kullanımı ile bağıl basınç dayanımının değişimi	132
Şekil 9.5 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin lif kullanımı ile bağıl eğilme dayanımlarının değişimi	133

Şekil 10.1 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifli serilerin ses geçiş hızları.....	135
Şekil 10.2 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin ses geçiş hızları.....	136
Şekil 10.3 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin ses geçiş hızları.....	138
Şekil 10.4 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin ses geçiş hızları.....	139
Şekil 11.1 Kısıtlanmış numunelerde yüzey isimlendirmesi.....	141
Şekil 11.2 İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlaklarının 500 D-Ç çevriminden önceki ve sonraki hali.....	143
Şekil 11.3 UK30-İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlaklarının 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali.....	144
Şekil 11.4 YFC50-İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlaklarının 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hal.....	145
Şekil 11.5 İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali.....	147
Şekil 11.6 UK30-İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali.....	148
Şekil 11.7 YFC50-İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali.....	148
Şekil 11.8 İ50-F0 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali.....	151
Şekil 11.9 Lifsiz UK30-İ50-F0 karışımının en geniş büzülme çatlaklarının 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali.....	152
Şekil 11.10 Lifsiz YFC50-İ50-F0 karışımının en geniş büzülme çatlaklarının 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali.....	153
Şekil 11.11 İ50-F0 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki.....	155
Şekil 11.12 UK30-İ50-F0 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali.....	155

Şekil 11.13 YFC 50 - İ50-F0 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 D-Ç çevriminden önceki ve sonraki hali..... 156



TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1 Kullanılan çimentonun fiziksel kimyasal ve mekanik özellikleri.....	61
Tablo 5.2 Bu çalışmada kullanılan uçucu külün fiziksel kimyasal ve mekanik özellikleri	62
Tablo 5.3 Kullanılan mikro silisin teknik özellikleri	62
Tablo 5.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (YFC) kimyasal analizi	63
Tablo 5.5 Kuvars agregasının kimyasal analizi	64
Tablo 5.6 Karışım Oranları lifliler - (F2)	67
Tablo 5.7 Karışım oranları (lifsizler) - F0.....	68
Tablo 11.1 Lifli RPB'lerin 28 gün ve 500 DÇ çevrimi sonrası çatlak uzunlukları ve ortalama açıklıkları	141
Tablo 11.2 Lifsiz RPB'lerin 28 gün ve 500 DÇ çevrimi sonrası çatlak uzunlukları ve ortalama açıklıkları.....	150

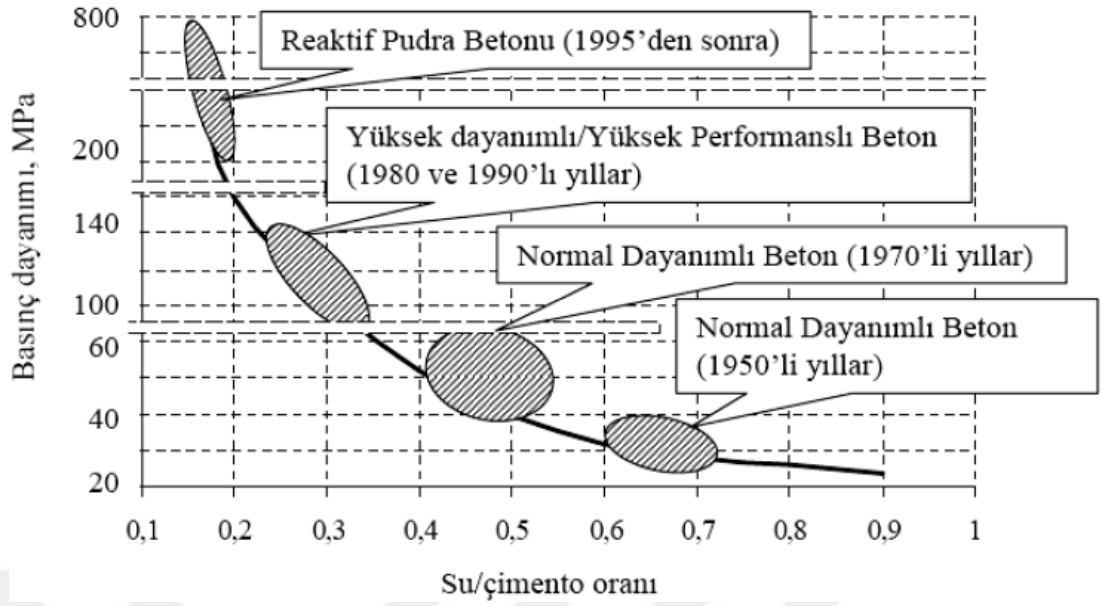
BÖLÜM BİR

TEMEL YÖNLERİYLE REAKTİF PUDRA BETON

1.1 Yüksek Performanslı Betonlar

Yapı malzemesi olarak beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin kullanılmasıyla üretilen kompozit bir malzemedir. Üretim sürecinin kolaylığı, istenilen şekline verilebilmesi, yüksek basınç dayanımı ve ekonomik olması nedeniyle beton; günümüzde vazgeçilmez bir yapı malzemesi konumundadır. Hem betonarme hem de çelik yapı sistemlerinde betonun kullanılmadığı alan neredeyse yoktur. Beton teknolojisi ise bu yoğun talep karşısında sürekli bir gelişim içerisinde. Geçmişte 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15-25 MPa arasında iken 1970'li yıllarda yüksek katlı yapılarda 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. Betondaki dayanım artışına paralel olarak zaman içerisinde su/çimento oranında da düşüş gerçekleşmiştir.

1950'li yıllarda su/çimento oranı 0,60-0,70 aralığında değişirken 1970'li yıllarda akışkanlaştırıcıların devreye girmesi ile bu aralık 0,40-0,55'ye düşmüş, 1980 ve 1990'lı yıllarda ise süper akışkanlaştırıcılar sayesinde söz konusu su/çimento oranı 0,25-0,35 aralığına inmiştir. Tüm bunlarla birlikte 1980'li yıllardan sonra ultra ince mineral katkı olan silis dumanının beton içerisinde kullanımının yaygınlaşması ile dayanımlarda çok yüksek artışlar sağlanmıştır. Daha sonra su/çimento oranının 0,20 nin altına düşürülmesi ile yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar, kısa kesilmiş yüksek dayanımlı çelik teller, sıcak su kürü ve basınçlı su buharı kullanarak beton basınç dayanımları 200 MPa'nın üzerine çıkarılmıştır (Şekil 1.1) (Topçu ve Karakurt, 2005).



Şekil 1.1 Betonun evrimi kapsamında Basınç Dayanımı-Su/Çimento İlişkisi (Karabulut, 2006).

1.2 Reaktif Pudra Betonun Tanımı ve Tarihçesi

Dayanımı artırılmış beton veya bilinen ismiyle yüksek dayanımlı betonlar günümüzdeki kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu betonların dayanımının yanı sıra geçirimsiz olması sebebiyle durabilite yönünden de olumlu özelliklere sahiptir. Ancak bu betonlarda, dayanım arttıkça ortaya çıkan önemli bir olgu gevreklik sorunu olmuştur. Normal betonun çekme dayanımı, çatlak direnci, aşınma ve darbe dayanım, tokluk gibi mekanik özelliklerini geliştirmek için içerisine çelik, cam ve polipropilen lifler katılmaktadır (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Reaktif Pudra Betonu genel kavram olarak mikroyapı mühendisliği yaklaşımıyla geliştirilmiş bir malzemedir. Normal çimento içerikli kompozitler ile karşılaştırıldığında RPB aşağıdaki dört ana prensibin uygulanması sayesinde elde edilir. Bunlar ;

- Bütün iri agregaların karışımdan çıkarılması ile malzeme homojenliğinin artırılması
- Tane çapı düzenlemesi ve iyi bir sıkıştırma ile boşluksuz bir beton elde edilmesi

- Sıcaklık kürü ile mikro yapının geliştirilmesi
- Karışıma çelik lif ilavesiyle malzeme sünekliğinin artırılması (Bonneau ve diğer., 1997).

RPB'nin düşük porozitesi boyutları 1-500 µm arasında değişen tane boyutuna sahip agregası ile sağlanmaktadır. Genelde agrega olarak kırılmış kuvars kumu kullanılmaktadır. RPB'lerde kullanılan agregaların boyutları çimentonunkine yakındır. Bu, hidrate olmamış çimento tanelerinin de tane iskeletine uygun olması ve malzemenin dayanımına katkıda bulunması demektir. RPB'de su-çimento oranı çok düşük olup 0.15 seviyesindedir. İşlenebilme fazla miktarda kullanılan yeni kuşak bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlanmaktadır. İstenilen dayanımlara erişmek için, hem bileşen malzemelerin özellikleri hem de bunları mikserde karıştırma sırasının ve süresinin önemli olduğunu akılda tutmak gerekir. Bağlayıcı madde olarak ise ASTM Tip II yada V cinsi çimento ve silis dumanı kullanılmaktadır. Burada silis dumanı kullanılması ile mikro boşlukların azaltılması hedeflenmektedir (Roux ve diğer., 1996).

RPB kalıba yerleştirildikten hemen sonra bir dizi kür işleminin uygulanması gerekmektedir. Kompozitin sıklığı taze betona priz sırasında etkiyen basınç kuvveti ile artırılmaktadır. Uygulanan yükü betonun karıştırılması sırasında bünyesine aldığı hava kabarcıkları ve hidrasyon için gerekli su miktarından fazla olan su dışarı atıldığından hem karışımın s-ç oranı hem de porozite azalmaktadır. Sıkıştırma işlemi ile betonun birim ağırlığı da %5 oranında artmaktadır. Çimento esaslı malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde sıcaklık kürü uygulanması bilinen en klasik yöntemdir. Sıcaklığın en büyük etkisi hidrasyon ürünü malzemelerin daha iyi kristalleşmesi ve silis içerikli filler malzemelerin puzolanik reaksiyonunun başlaması şeklindedir. Bunun tam olarak nasıl gerçekleştiği henüz tam olarak açıklanamamış olsa da çoğunlukla sıcaklık uygulaması yararlı olmaktadır. Hidrotermal koşullarda kirecin silisle reaksiyona girmesi sonucu 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda tobermorit, daha üstü sıcaklıklarda da karışımdaki CaO/SiO₂ oranına bağlı olarak truskotit, gyrolit, zonolit ve hillerbrandit oluşmaktadır. RPB'ye 90°C'de uygulanan

düşük buhar basıncı kürü ile priz sonrası silis dumanının puzolanik etkisi hızlanarak güçlü hidrat yapının oluşmasına yardımcı olur. Priz sonrası sıcaklık kürü uygulanan RPB'lerde uygulanmayanlara oranla %60-70 daha fazla dayanım elde edilmektedir. Günümüzde prefabrike olarak 200 MPa dayanıma sahip beton elemanlar kolaylıkla üretilebilmektedir. Ancak laboratuvar koşullarında uygulanan 400°C sıcaklık ve 50 MPa'lık basınç kürü ile RPB den 500 MPa basınç dayanım elde edilmiştir (Topçu ve Karakurt, 2005).

1.3 RPB'Nin Üretim Amaçları ve Avantajları

RPB'nin üretim amaçlarını ve avantajlarını aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür :

- 1.Yapısal olarak çelik malzemesiyle yarışabilecek güce sahiptir. Böylelikle narin prefabrik elemanların üretimine imkan tanımaktadır. Çok yüksek basınç, çekme ve kesme mukavemetleri sergiler. İnce kabukların ve plakların üretimine uygundur.
2. Çelik liflerle iyi aderansı sayesinde yüksek süneklik ve enerji yutma kapasitesine sahiptir. Böylelikle deprem etkileri altında yapıların performansını arttırmak için kullanılabilme potansiyeli mevcuttur.
3. Uzun yıllar hizmet verebilecek bir malzemedir. Çok düşük su/çimento oranı ($\approx 0,20$), ve çok düşük boşluk miktarı ile yapı elemanına su ve zararlı iyonlar içeren kimyasalların girişini kısıtlamaktadır. Böylelikle donma-çözülme, ıslanma-kuruma gibi olumsuz yıpratıcı etkilere karşı kalıcılığı yüksektir. Ayrıca RPB'ler nükleer atıkların depolandığı alanlarda da kullanıma uygundur.
4. Lif takviyesi ile sünek davranış sergilemektedir. Ana çekme gerilmeleri dışındaki gerilmelere karşı mukavimdir. Bu açıdan ikincil donatıların azaltılması mümkündür (Richard ve Cheyrezy, 1995).

1.5 Reaktif Pudra Betonunun Kullanım Alanları

Türkiyede RPB üzerine yapılan uygulamalı çalışmalardan biri, İstanbul Teknik Üniversitesi – İSTON firması ortak çalışması olan yağmur suyu ızgarası ve rögar kapaklarıdır (Şekil 1.2). Bu seriden üretilen prefabrike elemanların İTÜ inşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'ndaki deney sonucu bulunan zımbalama yükü değerlerinin ortalaması 46 ton' dur. İstanbul'daki İSTON firmasında üretilen rögar kapağının zımbalama yükü ise ortalama 57,8 ton'dur. Taksim-Elmadağ'da deneme amaçlı olarak RPB'den yapılan yağmur suyu ızgara takımları yerleştirilmiştir (Taşdemir ve diğer., 2005). Bu proje sayesinde çelik kapak elemanların çalınması sorununun önüne geçilebilmekte, kalıcı ve taşıt yüklerine mukavim elemanlar üretilmektedir.



Şekil 1.2 RPB'den üretilmiş rögar kapağı ve yağmur suyu ızgarası (Taşdemir ve diğer., 2005).

Yurtdışındaki RPB uygulamalarından biri Kanada'daki Sherbrooke yaya köprüsüdür (Şekil 1.3). Köprü, RPB 200'den yapılmış uzay kafes şeklindedir. 60 metre açıklığın geçildiği köprüde alt ve üst başlıklarda RPB'den yapılmış elemanlar kullanılırken diyagonal ve örgü çubuklarında çelik kullanılmıştır (Blais ve Couture, 1999).



Şekil 1.3 Sherbrooke yaya köprüsü – Kanada (Blais ve Couture , 1999).

1.6 RPB’de Kullanılan Malzemeler

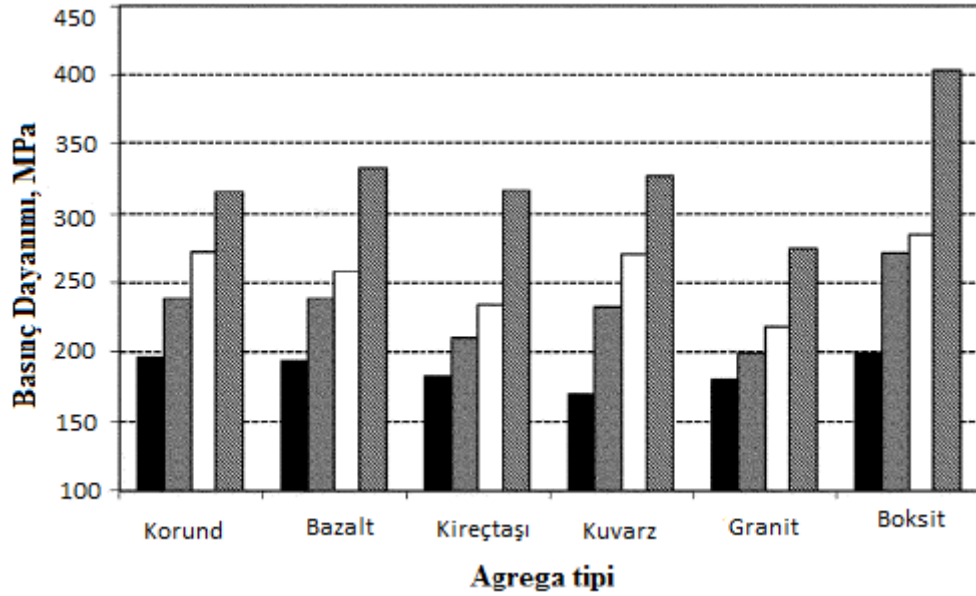
1.6.1 Çimento Seçimi

RPB üretiminde genellikle 800-1000 kg/m³ çimento kullanılmaktadır. RPB’nin yüksek oranda bağlayıcı içermesi, su/bağlayıcı oranının genellikle 0.14-0.25 aralığı gibi düşük değerlerde olması, yüksek oranda SD içermesi nedeniyle bünyesel büzülme mertebeleri, kuruma büzülmesi kadar risk oluşturabilmektedir (Yalçinkaya ve Yazıcı, 2011). Aynı zamanda maliyetleri arttırdığı, çimento üretiminin doğaya verdiği zararlar göz önüne alındığında çevreci olmadığı da düşünülebilir. Ancak hem çimentonun hidrasyon ısısının azaltılması hem de ekonomik nedenlerden dolayı çimentonun bir bölümü yerine mineral katkı kullanılması ile çevreci bir yapı malzemesi haline gelmesini sağlamaktadır. Bu açıdan atık malzemelerin bu kompozit içerisinde değerlendirilmesi geleneksel betondan daha çok gerek duyulan ve daha yüksek potansiyele sahip olan bir seçenektir. Normal betonda olduğu gibi RPB’de de hamur fazının azaltılması ile oluşacak büzülme etkisi azaltılabilir. Sabit su/bağlayıcı oranında üretilen RPB içerisindeki agrega hacminin arttırılmasıyla, diğer bir ifadeyle bağlayıcı miktarının azalmasıyla ilk 28 günlük büzülme değeri fark edilir derecede azalmıştır (Yalçinkaya ve Yazıcı , 2011).

1.6.2.RPB İçin Su Seçimi

RPB’de suyun en önemli etkisi işlenebilirlik ve betonda oluşan kılcal boşluklar olarak açıklanabilir. Su/çimento oranı düşürülerek işlenirliğin azalmamasını sağlamak ana amaçtır. RPB gibi çimentonun yanı sıra bağlayıcı olarak mineral veya puzolanik katkıların kullanıldığı çimentolu malzemelerde su/çimento oranı yerine genellikle su/bağlayıcı (s/b) oranını vermek daha uygun olmaktadır. Şekil 1.4’te bağıl yoğunluğun s/b ile değişimi görülmektedir (Karbulut , 2006) .

olarak, yüzeyi pürüzlü ve sert malzemelerin kullanılmasıyla daha yüksek dayanımlı RPB'ler üretilebilmektedir. Ucuz olması ve kolay temin edilebilmesi açısından birçok RPB üretiminde kuvarz da kullanılabilir (Aydın ve diğer., 2010).



Şekil 1.5 Agregat tipinin RPB dayanımına etkisi (Aydın ve diğer., 2010).

1.6.4 Silis Dumanı

RPB'de mineral katkı kullanımının en büyük amacı ince taneli agregalar arasındaki mikro boşlukların doldurulmasıdır. Dolayısıyla mineral katkıların RPB'deki boşlukları doldurma işlevleri, betondaki puzolanik aktiviteden daha önemlidir (Coppola ve diğer., 1996). Mineral katkılarda erken yaşta dayanım kazanma hızı yavaştır. Fakat ilerleyen yaşlarda oldukça etkilidir. RPB üretiminde mikro boşlukların doldurulmasında, çok ince tane boyutuna sahip olan SD en çok tercih edilen mineral katkıdır. SD hızlı reaksiyona girer ve fakat karışımın su gereksinimini artırır. Ancak kimyasal katkı kullanımı ile bu problem çözümlenebilmektedir. SD ayrıca puzolanik özeliği sayesinde ortamda bulunan CH'ları da bağlayarak yeni CSH jellerinin oluşumunu sağlamaktadır. Böylece çimento hamuru ve agregat arasındaki zayıf olan bölge SD vasıtasıyla güçlenmektedir (Rougeau ve Borys, 2004).

1.6.5 Uçucu Kül

Mineral katkı özelliğine sahip olan uçucu küllerin (UK) tek başlarına bağlayıcı özellikleri yoktur. Ancak, uygun ortam, sıcaklık ve nemde betondaki hidrasyon ürünlerinden kalsiyum hidroksitle (CH) reaksiyona girerek yeni kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) jeli oluşumunu sağlarlar. UK'lar betonda, su gereksinimini ve hacim değişimini etkilemektedirler.

1.6.6 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Büyük miktarda silis ve alümin içeren ve amorf yapıya sahip olan granüle yüksek fırın cürufları, öğütülerek çok ince taneli duruma getirilmeleri durumunda, puzolanik ve mineral özellikler göstermektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı olarak görev yaptıkları değişik kullanım tarzları mevcuttur.

Bu madde normal ve yüksek performanslı betonların üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılabilir (Binici, 2002). Yüksek fırın cürufu (YFC) ise, bir miktar bağlayıcı madde ile reaksiyona girerse, önemli ölçüde bağlama özelliği kazanmaktadır. RPB'de süper akışkanlaştırıcı kullanımı da betonun işlenebilirliğini artırır. Mikro düzeydeki yapıyı güçlendirir ve mineral katkı kullanımından kaynaklanan olumsuz etkileri önlemektedir.

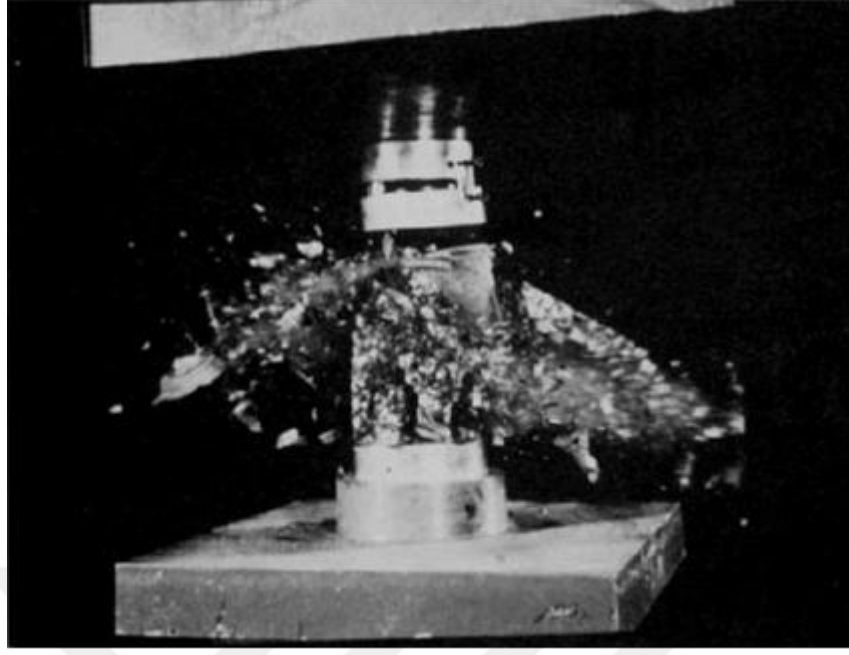
BÖLÜM İKİ

ÇELİK LİFLİ BETONLAR VE ÇELİK LİF İÇEREN REAKTİF PUDRA BETONLAR

Mühendislik malzemelerinin karakteristiği gereği, her malzemenin her üretimde aranan şartlara uygun olmayan yönleri mevcuttur. Çimentolu kompozit malzemelerden olan beton, yapı sektörünün bugün için en çok kullanılan ve gelecekte de en çok kullanılması beklenen malzemesidir. Betonun gevrek davranışı sebebiyle betonarme binalarda çelik donatılar kullanılarak çekme gerilmeleri karşılanmaktadır. Ancak çeşitli lif takviyeleriyle beton kompozitine kendine ait ve önemli mertebelerde çekme dayanımı sağlanması bilim insanlarının çalışmalarına konu olmuştur.

Kimyasal katkıları ile yüksek akıcılıkta betonların su kullanılmadan yapılabilmesi beton dayanım sınıflarını da önemli derecede arttırmıştır. Giderek gelişen akışkanlaştırıcı teknolojisiyle su/çimento oranı 0,7'lerden günümüzde 0,15'lere kadar indirilmiştir. Dolayısıyla çok yüksek dayanımlı ve performanslı beton ürünleri üretilmektedir.

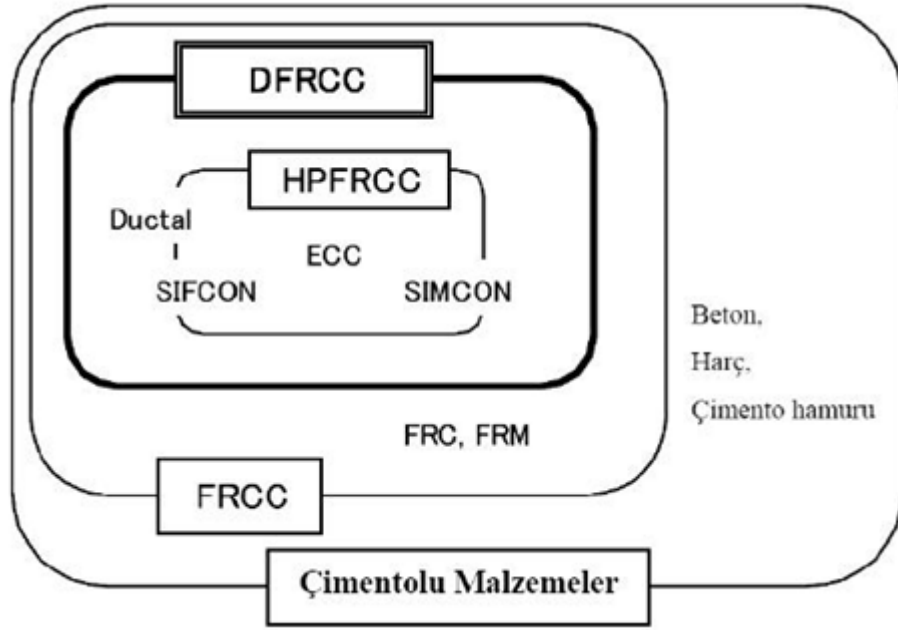
Artan su kesme oranlarında beton basınç dayanımlarının da çok yüksek mertebelere çıktığı görülmektedir. Ancak ultra yüksek dayanımlara çıkıldıkça beton malzemesinin gevrekliği de artmaktadır. 100 MPa'ya kadar basınç dayanımına sahip betonların gerilme birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinden dayanım artışı ile birlikte maksimum yükte okunan birim deformasyon artmaktadır. Ancak numune dayanımı aşıldığında daha keskin gerilme düşüşleri görülmektedir (Jansen ve diğer., 1995). Taşdemir ve diğer., (1998) de benzer biçimde dayanım sınıflarının çok üst düzeylere erişmesi halinde gevreklik probleminin arttığını vurgulamışlardır. Beton teknolojisinin ilerlemesine rağmen artan dayanımlar beraberinde artan gevreklik problemini de getirdiğinden dolayı çimentolu kompozitlerin sünek liflerle donatılması uygulama ve literatürde hala güncel yerini korumaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Yüksek dayanımlı bir silindirin basınç deneyi esnasında gevrek kırılması (Taşdemir ve diğer.,1998)

Japon Beton Enstitüsü (JCI) çimentolu malzemeleri Şekil 2.2'deki gibi sınıflandırmıştır. Burada beton, harç ve hamur çatısı altında lifli betonlar (FRCC) sınıfı mevcuttur. Daha özele inildiğinde sünek lif donatılı çimentolu kompozitlerden (DFRCC) söz edilmektedir. Yüksek performanslı lif takviyeli çimentolu kompozitler (HPFRCC) ailesi en içte görülmektedir.

Çimento bulamacı emdirilmiş çelik lifli beton (SIFCON) ve ağ şeklinde lif içeren çimentolu kompozit (SIMCON) son dönem araştırmacılarının hala ilgisini çeken beton türleridir ve çok yüksek süneklik değerlerine sahiptir. Yüksek basınç dayanımlarına ulaşmada en etkin beton türü olarak görülen reaktif pudra betonu şematikte ticari ismi “ductal” şeklinde isimlendirilmiştir. Tasarlanmış çimentolu kompozitler (ECC) gelecekte beton üreticisinden istenilecek özelliklerin artacağına simgesidir. Bu özellikler: tokluk,süneklik, durabilite sınıfının net ifadesi, kırılma parametreleriyle ilgili olabilecektir.



Şekil 2.2 Japon Beton Enstitüsüne göre çimentolu kompozitlerin sınıflandırılması (JCI, DFRCC Committee, 2003).

2.2 Çimentolu Kompozitlerde Kullanılan Lif Türleri

Çimentolu kompozitlerin çeşitli özelliklerini geliştirmek için metalik, cam, doğal ve sentetik lifler kullanılabilir. Bu liflerin karakteristik özelliği dikkate alınarak ihtiyaca yönelik tasarım yapılırken uygun lif türü seçilmektedir. Lif türlerinin mekanik iyileşmelere etkisi olduğu gibi kimi durumlarda bazı özelliklerde düşüşler olabilmektedir. Lif türlerinin mekanik özellikleri geliştirici etkisi yanı sıra durabilite zorlamalarındaki hasarların önlenmesi için kullanımı halen araştırma konusudur.

Çelik lifler değişik narinlik, geometrik şekil ve uç tasarımlarında üretilmektedir. Karbon içeriğine bağlı olarak 1100 MPa (düşük karbonlu) veya 2200 MPa (yüksek karbonlu) olarak farklı dayanımlarda üretilmektedirler.

Son yıllarda sentetik liflerin kullanımı hız kazanmaktadır. Sentetik liflerden sık kullanılanları polietilen, polipropilen, polivinil alkol, karbon ve akrilik lifler olarak verilebilir. Sentetik liflerin yüzey dokuları çeşitli yöntemlerle değiştirilerek çatlak

yaymaya yönelik çalışmalar ve eğilebilir beton adı altında yüksek süneklikli beton tasarımları (ECC) günümüzde yeni bir konudur.

Yüksek alkali ortamda liflerin kimyasal bozulmalardan korunması, yalın haldeki performanslarına yaklaşabilmeleri için iyi bir aderans sağlanması, homojen halde kalıba dağılarak betonun tüm bölgelerinde iş görebilir halde olması çimentolu matrisin taze ve sertleşmiş haldeki vazifelerindedir.

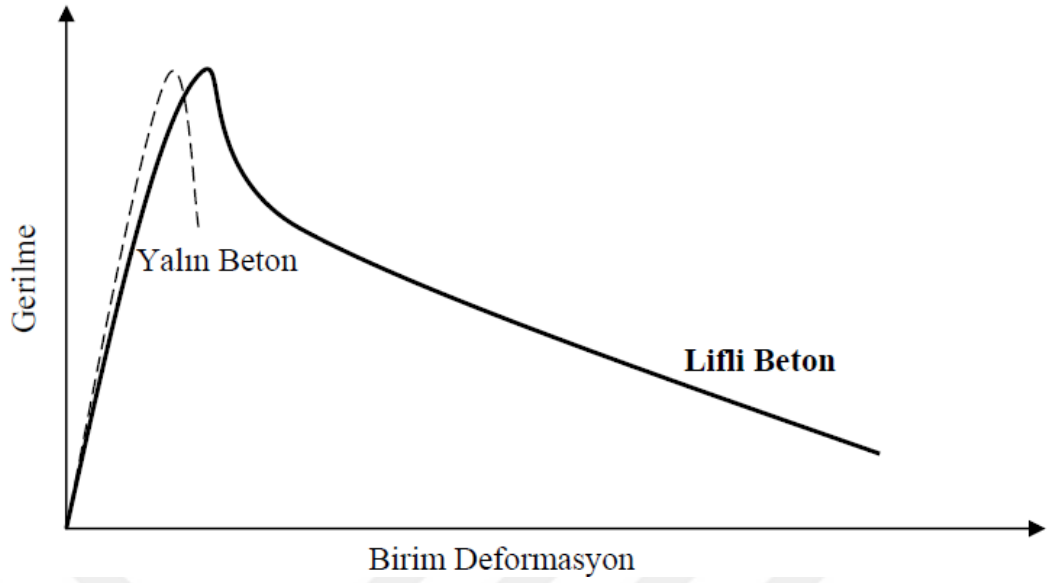
Çimentolu matrislerde kullanılan liflerin bazıları çatlak genişliğinin sınırlandırılması ve tokluk arttırmak için (makro ve mikro boyuttaki çelik lifler ve yüksek performanslı PVA lifler gibi) bazıları ise plastik rötre çatlaklarının azaltılması ve yüksek sıcaklık etkisi altında patlamaları engellemek için (polipropilen lifler gibi) kullanılabilir (Yardımcı, 2008).

2.3 Çelik Lifli Betonlar

Çelik lifli betonlar (ÇLB), çimentolu matris içinde kısa kesilmiş çelik teller şeklinde üretilen betonlardır. Agrega kullanılmadan ya da yalnızca iri veya ince agregalar kullanılarak çeşitli yeni kompozitler günümüzde üretilmektedir. Genel itibariyle çelik lifli betonarme betonlarının geleneksel betondan farkı nispeten daha çok hamur içermesi ve daha az iri agrega barındırmasıdır.

2.3.1 Çelik Lifli Betonların Mekanik Davranışı

Betona eklenen çelik lifler basınç dayanımının artışından ziyade çökme mekanizmasındaki sünekliği arttırmaktadırlar. Bu şekilde, dayanım yükü aşılana beton işaret vererek, yüksek oranda deformasyon yaparak dağılmaktadır. Bu da yapıların göçme anında enerji sönümlenmesi ve belki de yıkılmadan ayakta kalarak can kaybının azaltılması gibi olumlu etkiler yapabilecektir. Bu açıdan basınç davranışı açısından lifler dayanım anlamına gelmemeli, daha ziyade göçme mekanizmasını uzatıcı bir malzeme olarak değerlendirilmelidir (Yalçınkaya, 2009) (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Maksimum basınç yükü aşıldıktan sonra lifli betonun uzayan kuyruk bölgesi (Yalçınkaya, 2009)

Heterojen bir malzeme olan betonun içinde birçok ara yüzey bölgesi mevcuttur. Bu ara yüzeylerden en zayıf olanı agrega çimentolu matris ara yüzeyidir. Betondaki termal genişleme ve büzülme veya otojen büzülme kaynaklı mikro çatlaklar her betonda mevcuttur ve betonun göçme mekanizmasını hızlandırıcı ve dayanımı düşürücü etkiye sahiptir. En çok mikro çatlak agrega – matris ara yüzeyinde belirmektedir. Yükleme sırasında agrega ile matris arasındaki rijitlik farkı ve büzülme ile genişleme sırasında agregaların matrisi kısıtlayıcı etki yapması sebebiyle agrega çevresinde mikro çatlak yoğunluğunun arttığı söylenebilir.

Mikro çatlak oluşturan etmenler arasında şüphesiz durabilite zorlamaları da bulunmaktadır. Alkali – silika veya alkali – karbonat reaksiyonları, donma – çözülme hasarları, gecikmiş etrenjit oluşumu gibi gevrek matris içerisinde genişleme yaratan etkiler, betonun mikro çatlak sayısını arttırmaktadır.

Çimentolu malzemelerin genel karakteri olan gevrek davranış, çeşitli özelliklerde lifler eklenerek sünek davranışa doğru iyileştirilebilir. Burada vurgulanması gereken önemli bir ayrıntı, liflerin birincil etkisinin malzemenin dayanımının geliştirilmesinden daha çok, çatlak oluşuktan ve genişledikten sonra kompozitte

gerilme transferinin devam etmesi ve tokluğunun artırılmasıdır (Bentur ve Mindess,1990; Shah, 1991; Li ve Maalej, 1996; Yardımcı, 2008).

Çimentolu kompozitlerde liflerin donatı etkisi matris çatladıktan sonra belirginleşmektedir. Lif donatılı çimentolu kompozitlerde liflerle birlikte agregalar ve boşluklar da bulunmaktadır ve lifli kompozitte bunların da birbirleri ile etkileşimi söz konusudur ve bu nedenle davranış karmaşıktır. Bunun yanında, çimentolu kompozitte kullanılan liflerin performansı lif – matris aderansı ve lif – matris arası geçiş bölgesinin mikro yapısına büyük ölçüde bağlıdır (Yardımcı, 2008).

Lif – matris aderansı da tıpkı agrega – matris aderansı gibi kompozitin genel yapısına tesir etmektedir. Agregalar, boşluklu matris ve ara yüzey gibi birbirini etkileyen birçok yapı sebebiyle betonda çatlak gelişimi karmaşık bir konudur.

Agregalarla çimentolu matris arasında var olan geçiş bölgesi (Neville, 1995) gibi lif ile onu saran çimentolu matris arasında da kalsiyum hidroksitçe zengin, boşluklu yapıda bir geçiş bölgesi bulunmaktadır (Bentur ve Diamond, 1985).

Kötü beton tasarımı sonucu oluşacak kabul edilemez derecedeki terleme sonucu ayı agregalarda olduğu gibi liflerin de altında su dolu yapıların oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu yüzden lif – matris aderans bölgesi boşluklu ve hidrasyon ürünlerince fakir olabilmektedir. Yardımcı (2008) bu konuyu çalışmasında vurgulamış ve diğer araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalardan uçucu kül veya mikro silika gibi puzolanların bu ara yüzey bölgesini güçlendirdiğine ve lifin matristen sıyrılma yükünü arttırdığına değinmiştir. Ayrıca mikro çatlaklı bölgelerin azaltılması ve daha sünek bir yapı için mikro liflerin kullanımı faydalı olmaktadır.

Lifler çatlakları önlemede çok etkilidir. Cook ve Gordon'un 1964 yılında geliştirdiği liflerin çatlak önleme mekanizması incelendiğinde Şekil 2.4'deki durum anlatılmaktadır. Çatlağı oluşturan ve ilerlemesine sebep olan çekme gerilmelerine dik doğrultuda yani çatlağın ilerlediği düzlem boyunca oluşan maksimum gerilme hemen çatlak ucunda değil de bir miktar ilerde oluşmaktadır. Bu sayede çatlak ilerlemesi

Aslında beton içerisinde lif kullanımı yoluyla eğilme dayanımının çok yüksek oranlarda arttırılmaya çalışılması pahalı bir uygulamadır. Ancak liflerden beklenen asıl performans ilk çatlak yükünün arttırılmasından ziyade, çatlak ilerleme zonunda beklenmelidir. Lifler gerilmelerin bir kısmını üzerinde tutarken bir yandan da çatlağı köprüleyerek çatlağın iki yanındaki sağlam kesitlere yük aktarıcı vazifesi görmektedir. Gerilme köprülenmesi adı verilen bu olay lifli betonun geleneksel betona göre eğilme altındaki davranışını tamamen değiştiren bir yetidir.

Çatlak açıldıkça çatlağı köprüleyen lifler üzerinden gerilmelerin geçtiği gerilme köprücükleri olarak görev yaparlar. Bu süreçte, yeterince uzun ve rijit olan lifler (örneğin, mezo ve makro boyutta çelik lifler) matristen sıyrılır ve bir miktar enerji sönümlenir. Bu sıyrılmanın daha zor olmasını sağlamak amacıyla çelik liflerin kendi geometrisi, yüzey yapısı ve uç geometrilerinde değişiklikler yapılmaktadır (Yardımcı, 2008).

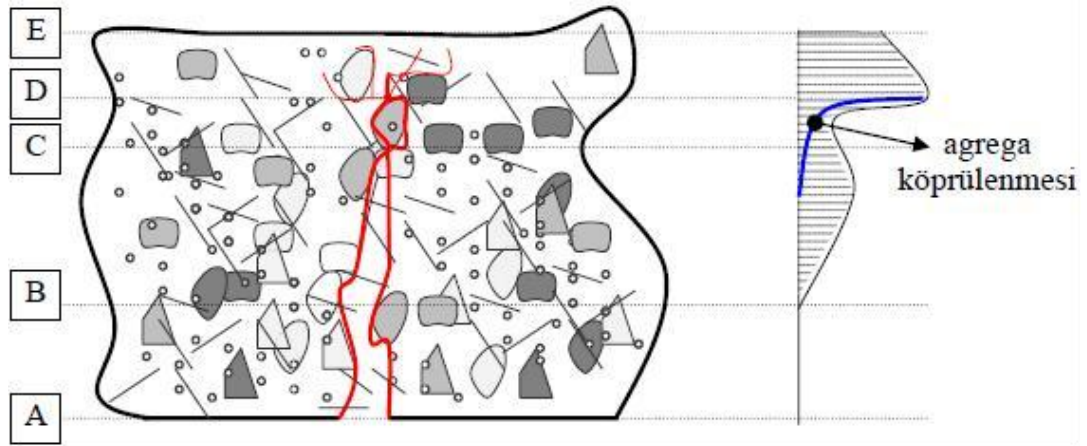
Lif gövde ve uç şeklinin enerji yutma farklarının araştırıldığı bir çalışmada uç şekilleri değişen çelik liflerin eğilme etkisinde daha başarılı olduğu saptanmıştır. Bantia ve Trottier (1995) tarafından yapılan çalışmada ucu kancalı, genişleyen uçlu, dalgalı gövdeli ve zikzak gövdeli liflerin performansı incelenmiştir. Tüm lifler benzer değerler eğilme dayanımları verse de uç geometrileri değişen liflerin matristen sıyrılması sırasında daha çok enerji yuttuğu ve tokluk değerlerinin daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durumun sebebi lif çekme deneyi üzerine yapılan bir çalışmayla daha iyi biçimde anlaşılabilir. Löfgren (2005)'in yaptığı çalışmada düz ve kancalı uçlu lifler çimentolu matristen çekilmiştir. Kanca ucu deformasyonu sıyrılma başlangıcından sonra dahi yükün artışına sebep olmuştur.

Tekil liflerin matristen sıyrılmasını liflerin yükleme doğrultusuna göre yaptığı açı etkilemektedir. Tekil lifin sıyrılması üzerine Bartos ve Duris (1994) tarafından yapılan bir çalışmada yük doğrultusuna göre açılı olan liflerin matristen çıkması sürecinde gereken enerji, yükle aynı doğrultulu liflere göre daha fazla olduğu saptanmıştır. Ancak gerçek matris içinde liflerin davranışının daha farklı olduğu bazı

araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır. Bunun sebebi kancalı uçlu liflerin sıyrılırken matrise verdiği zarar gibi etkilerin lif miktarı ve birbirleri arasındaki mesafeye göre sergileyebileceği davranıştır. Yapılan bir çalışmada kompozit içerisinde lif miktarının artmasıyla sıyrılma direncinin azaldığı, yükleme doğrultusu ile açı yapan liflerde bu azalmanın daha fazla olduğu görülmüştür (Naaman ve Shah, 1976).

2.4.3.1 Agregalar ve Liflerin atlak İlerleme Bölgesine Etkisi

Çatlak açılması ilerlerken agregaların lifler kadar olmasa da bir miktar köprüleme özelliği mevcuttur. Çekme etkisi altında bir çatlak şematize edilecek olursa üç farklı bölgeden söz etmek mümkündür. Bunlardan ilki liflerin ve agregaların matristen tamamen sıyrılarak yk kprlemedikleri ayrık bölge, diğerleri lif ve agregaların matristen sıyrılmaya çalıştıkları ve bu sırada gerilme kprledikleri köprüleme bölgesi ve son olarak makro çatlakların ve çatlağın en uç kısmında mikro çatlakların olduğu çatlak ilerleme bölgesidir (şekil 2.6).



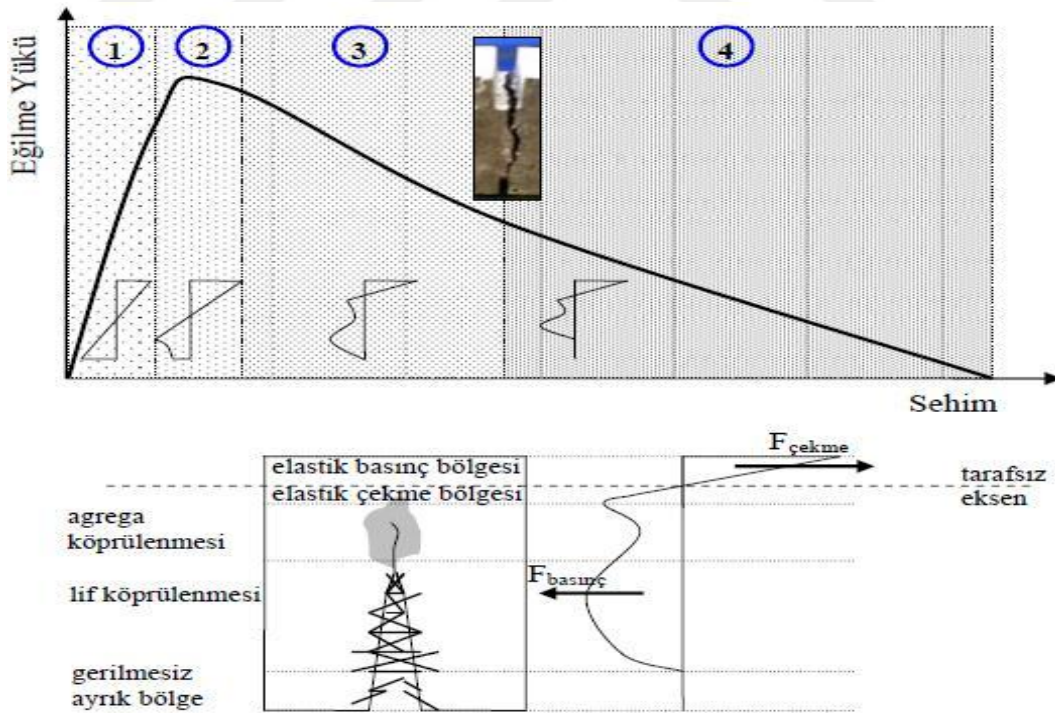
şekil 2.6 Tek eksenli çekme altında kırılma zonu ve liflerin etkisi (Lfgrn2005'ten esinlenerek çizilmiştir).

şekilden görüldüğü gibi A – B arası lif ve agregaların matristen sıyrıldığı gerilmesiz bölgedir. B – C arası ayrık matrisin iki tarafına saplı olan liflerin ve az da olsa agregaların gerilme kprlediği bölgedir. Bu aşamada lif boyutları, tipi, miktarı ve agregalar özellikleri çok etkilidir. Özellikle kancalı uçların kullanımında bu bölgede

yük tekrar artabilmektedir (Löfgren, 2005). Yük – deformasyon eğrisi liflerin sıyrılma etkisiyle azalan bir eğimle yavaşça aşağı iner ve sıfırlanır. B – D bölgesi arasında köprülenme ve çatlak dallanması görülmektedir. C – D makro çatlak bölgesidir ve matrisin en büyük gerilmesine ulaşılır. Yük – deformasyon eğrisinde ani düşüşün yaşandığı bölgedir. D – E bölgesi belirli bir yükten sonra matriste mikro çatlaklaşmanın olduğu bölgedir. Bu oluşum matrisin ilk hasar gördüğü noktadır. Bu açıdan durabilite yahut büzülme ve genleşme etkileri ile oluşmuş mikro çatlakların, davranışı kötü etkilemesi beklenebilir.

Çelik lifli betonun eğilmede çekme etkisi altındaki davranışı incelendiğinde eğilme yükü – sehim eğrisini aşağıdaki gibi dört bölgeye ayırmak mümkündür:

1. Lineer elastik davranış bölgesi
2. Mikro çatlak oluşumu ve pik yüke ulaşılması
3. Makro çatlaklar ve gerilme köprülenmesi
4. Makro çatlakların alt kesitlerdeki lifleri sıyrarak yüksüzleştirilmesi (Şekil 2.7)



Şekil 2.7 Çelik lifli kiriş numunelerinde eğilme yükü – deplasman eğrisi (üst) ve gerilmesiz ayrık bölgenin şematik hali (alt) (Robins ve diğer., 2001'den esinlenerek çizilmiştir).

Şekil 2.7'den görüldüğü üzere 1. bölge lineer elastik davranışın olduğu yani henüz matriste çatlak bulunmadığı bölgedir. Bu aşamada yük kaldırılırsa numunenin kalıcı deplasman yapmadığı fark edilir. 2. bölgede zorlanan matris içerisindeki zayıf ara yüzeylerden mikro boyutta çatlaklar oluşmaktadır. Bu bölgede matris taşıyabileceği maksimum yüke erişmiştir ve ardında yükte düşme sürerken çatlak açılması büyümektedir. 3. bölgede mikro çatlaklar birleşerek ve genişleyerek makro çatlaklar oluşmaktadır ve keskin bir yük düşüşü gözlemlenebilmektedir. Bu aşamada lifli betonlar için en önemli aşamadır. Lifler ayrılmaya başlayan matrisin iki tarafına gerilme aktarmaktadır. Bu süreçte liflerin sıyrılması, eğer uç geometrileri farklıysa (çengelli uçlu çelik lifler gibi) bu uçların düzleşmesi malzemeye yüksek tokluk katmaktadır. Bu aşamada liflerin matrisle kenetlenme durumuna göre deformasyon sertleşmesi gözlemlenebilmekte ve taşınan yük artabilmektedir. Hatta aderansın sağladığı yük aktarımı sonucu yük, ilk çatlak yükünün dahi üzerine çıkarak yüksek performans sergileyebilmektedir. Son olarak 4. bölgede artık çatlakların en alt kısmında liflerin tamamen sıyrıldığı ve yük taşımadıkları bir kısım oluşmuştur. Makro çatlaklar büyümektedir. Bu safhada az da olsa agregalar gerilmenin köprülenmesine yardımcı olur. Tarafsız eksenin ayırdığı basınç ve çekme kısmının dengesini liflerin ayrık matrisi kenetleme etkisi sağlamaktadır (Robins ve diğer., 2001).

Çimentolu matris içerisinde büzülme yahut genişleme etkisinden, durabilite zorlamalarından, yüklemekten kaynaklı mikro çatlaklar dökümden sonra oluşmaya başlamaktadır. Eğilme etkisinde bu mikro çatlakların matris içerisinde zayıf kesitler oluşturduğu, birleşerek makro çatlaklara dönüştüğü göz önüne alınacak olursa yüklemeye sırasında mikro çatlak ilerlemesinin erken durdurulması kırılma parametrelerini iyileştirecektir.

Lif boyutları küçüldükçe belirli bir hacimde daha büyük boyutlu liflere göre en kesitte daha fazla lif bulunmaktadır. Böylece mikro lifler kullanıldığında lifler arasındaki mesafe azalır. Bu durumda mikro çatlakların, mikro lifler tarafından karşılanma olasılığı da artmaktadır. Ancak, mikro liflerin etkili olabilmesi için görünüm oranı yüksek olmalı ve yeterli rijitlikte olmaları gerekir (Yardımcı,

2008). Mikro liflerin diğeri bir avantajı aynı uzunluklu ancak daha düşük narinlikli liflerle aynı dozajda kullanıldıklarında, birim kesitte daha çok ve birbirine daha yakın dağılım sağlamalarıdır. Böylelikle sık lifli kesit içerisinde çatlakların aniden atlaması durumu gerçekleşmez ve çatlak ilerlerken sık sık bir engelle karşılaşır.

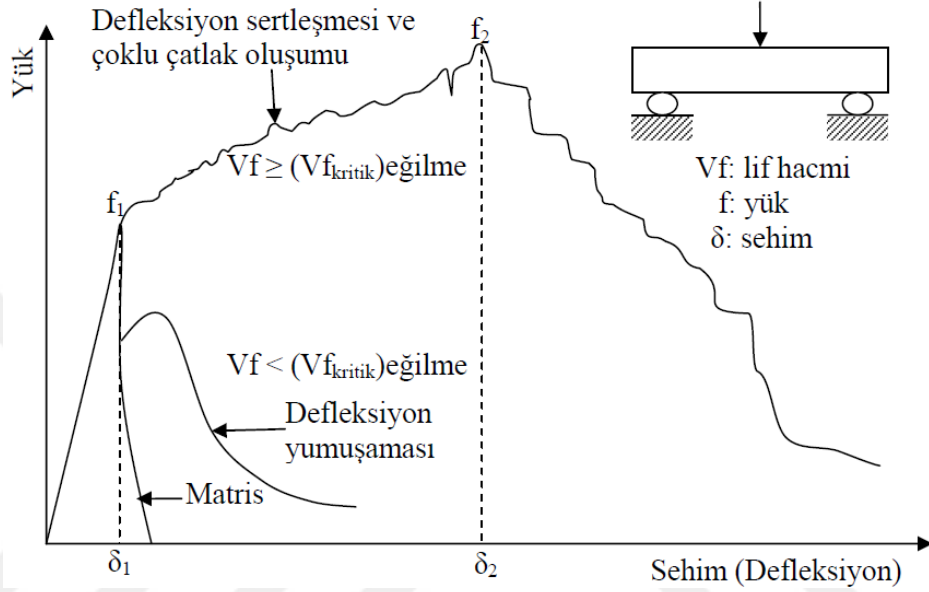
Mikro liflerin uzunlukları diğeri uzun liflere (mezo ve makro) kıyasla azdır. Bu açıdan daha düşük sehim değerlerinde matrizen sıyrılmakta ve köprüleme özelliklerini nispeten daha erken yitirmektedirler. Lif hacmi artıp, çapı azaldıkça maksimum yükün arttığı ancak bunun bu parametrelerden bağımsız olarak lifler arası mesafeyle alakalı olduğunu söylenmektedir (Betterman ve diğeri., 1995). Kısa boylu ve yüksek narinlikli lifler dayanım geliştirmede daha etkindir. Ancak bu mikro liflerin yeterli narinlikte olmasıyla alakalıdır.

Lawler ve diğeri., (2003), mikro liflerin varlığının maksimum yükten önce mikro çatlak genişliğini sınırladığını ve mikro çatlakların birleşerek tekil büyük çatlığa dönüşmesi sürecini geciktirdiğini belirtmişler; böylece kompozitte çoklu çatlak yapısının geliştiğini ve dolayısıyla malzemenin deformasyon kapasitesinin arttığını ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca bu araştırmacılar, mikro ve makro liflerin bir arada kullanılmasının en iyi mekanik performansı sağladığını ortaya koymuşlardır (Yardımcı, 2008).

Mikro liflerin mikro çatlak oluşum aşamasında aynı hacimde diğeri büyük lif türlerine göre daha çok çatlak gelişimini sınırlaması ve birleşerek makro boyuta erişmesini engellemeleri, donma – çözülme hasarı gibi mikro çatlak boyutundan ilerleyen mekanizmalara karşı daha iyi bir performans (eğilme deneylerinde) göstermelerini sağlayabilir.

Lif içeriği, yoğunluğu ve dağılımına bağlı olarak yapısal bir elemanda farklı tepkiler görülebilir. Genel olarak liflerin deformasyon kabiliyeti ve sünekliği arttırdığı bilinmektedir. Bu artış gerilme – birim şekil değiştirme veya yük – sehim eğrilerinde ön – pik ya da gecikmiş – pik bölgelerinde olabilmektedir. İlk çatlaktan sonra yük artıyorsa “sertleşme” terimi kullanılır. Lif değişkenlerine bağlı olarak bu

davranış için doğrudan çekme etkisinde oluyorsa “deformasyon sertleşmesi”, eğilmede çekme etkisinde oluyorsa “defleksiyon ya da sehim sertleşmesi” terimleri kullanılır (Şekil 2.8). Eğilme etkisinde bu davranış düşük lif içeriklerinde sağlanabilirken, doğrudan çekme etkisinde yüksek lif içerikleri gerekmektedir (Lappa, 2007).



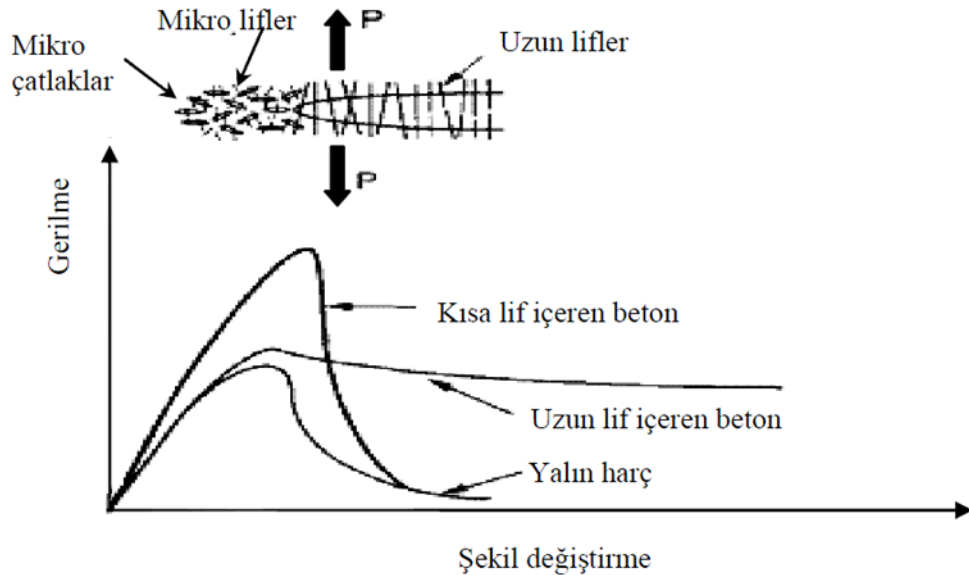
Şekil 2.8 Lifli çimentolu kompozitlerde eğilme etkisi altında lif hacmine bağlı olarak sergilenebilecek davranışlar (Şekil Naaman and Reinhardt, 2005'ten esinlenerek çizilmiştir).

Şekil 2.8'dan görüleceği üzere matrisin kırılmasına sebep olan ilk çatlak yükünden (f_1) sonra deformasyon sertleşmesi oluşması için gereken kritik lif hacmi ($V_{f_{kritik}}$)eğilme, beton bünyesinde mevcut olmalıdır. Deformasyon sertleşmesi ile taşınan yük f_1 değerini geçerek f_2 gibi yüksek bir seviyeye çıkacaktır. Ardından yük aşamalı olarak azalmaktadır. Eğer “($V_{f_{kritik}}$)eğilme” değerinin altında bir lif hacmi ile çalışılıyorsa, matrisin kırılmasının ardından taşınan yük azalacak ve sonra bir miktar artma eğilimi göstererek ya da göstermeyerek sıfıra doğru gidecektir. Matrisin kırılmasından sonra f_1 değerini aşmadan aşamalı yük düşüşü davranışına verilen isim “defleksiyon yumuşaması” olmaktadır. Burada gerekli kritik lif hacmi; lifin narinlik, boy, geometrik yapı ve ham maddesi gibi her türlü değişkeni ile matris içyapısının etkileşimine bağlıdır. Ayrıca bu aşamada az da olsa agrega köprülenmesinin etkisi vardır ve bu etkinin lif dozajı arttıkça daha da azalacağını söylemek yanlış olmaz. Lappa (2007), doğrudan çekme altındaki deformasyon sertleşmesi kavramının

malzeme özelliklerini tanımlamada eğilme altındaki deformasyon sertleşmesi kavramına göre daha güvenilir olduğunu vurgulamıştır.

2.4 RPB’de Lif Kullanımı

RPB betonlarında, dayanım arttıkça önemli bir problem ortaya çıkar ve o problemde gevrekliktir. Normal betonun çekme ve eğilme dayanımı, çatlak direnci, aşınma direnci ve darbe dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklerini iyileştirmek için içerisine çelik, cam ve polipropilen lifler katılmaktadır. RPB’de mikro ve makro boyutta olan iki değişik boyutta lifler kullanılabilir. Mikro lifler, betonda oluşabilecek özellikle büzülme (rötre) çatlaklarını önler ve matrisin dayanımını artırır. Makro çelik lifler ise RPB’nin çekme ve eğilme dayanımlarını arttırmaktadır. Şekil 2.9’da (Karabulut, 2006) RPB’de kullanılan çelik liflerin etkileri görülmektedir. Ayrıca, mikro boyutta olan çelik lifler makro liflere göre beton içerisinde daha homojen dağıldıklarından basınç dayanım ve eğilme (çekme) dayanımının artırılmasına da katkıda bulunmaktadır. Makro liflerde ise topraklanma riskinden dolayı gerilmelerden çok betonun daha fazla deformasyon yapabilme özelliklerini arttırmaktadırlar.



Şekil 2.9 RPB’de mikro ve makro lif kullanımı (Karabulut, 2006)

BÖLÜM ÜÇ

BETON ÇATLAKLARI

3.1 Taze Beton Çatlakları

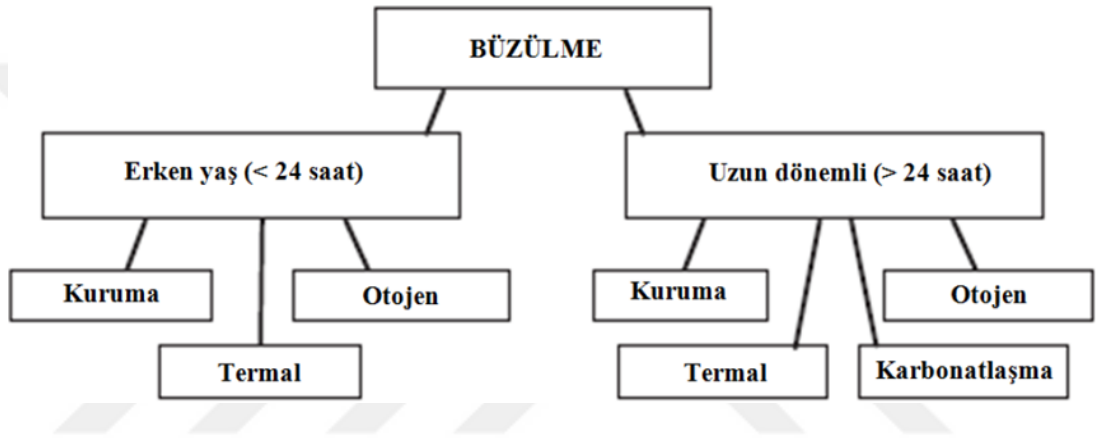
- Plastik büzülme
- Plastik oturma
- Kalıp ve zemin hareketleri
- Donma -çözülme

3.2 Sertleşmiş Beton Çatlakları

- Çeşitli Rötne olayları
- Termal etkiler
- Kimyasal –fiziksel biyolojik nedenlerle çatlama
- Donma - Çözülme
- ASR
- ACR
- Boy ve hacim değişimleri
- Islanma kuruma
- Yüksek sıcaklık ve yangın
- Donatı korozyonu
- Sülfat etkisi
- DEF
- Karbonatlaşma
- Yapısal nedenlerle çatlama
- Aşırı yükleme
- Mesnet çökmesi
- Sünme
- Zemin problemleri (Baradan ve diğer., 2010)

- Kuruma Büzülmesi (Hidrolik Büzülme)
- Termik Büzülme
- Karbonatlaşma Büzülmesi

Teorik olarak böyle bir gruplandırma yapılsa da, çimento bazlı kompozitlerin büzülmesi sırasında zamana bağlı olarak birkaç mekanizma birlikte etkili olabilmektedir. Holt (2005), büzülme ilk 24 saatte ve sonrasında Şekil 3.2'deki gibi gruplandırmıştır.



Şekil 3.2 İlk 24 saatte ve sonrasında etkili olan büzülme mekanizmalarının gruplandırılması (Holt, 2005).

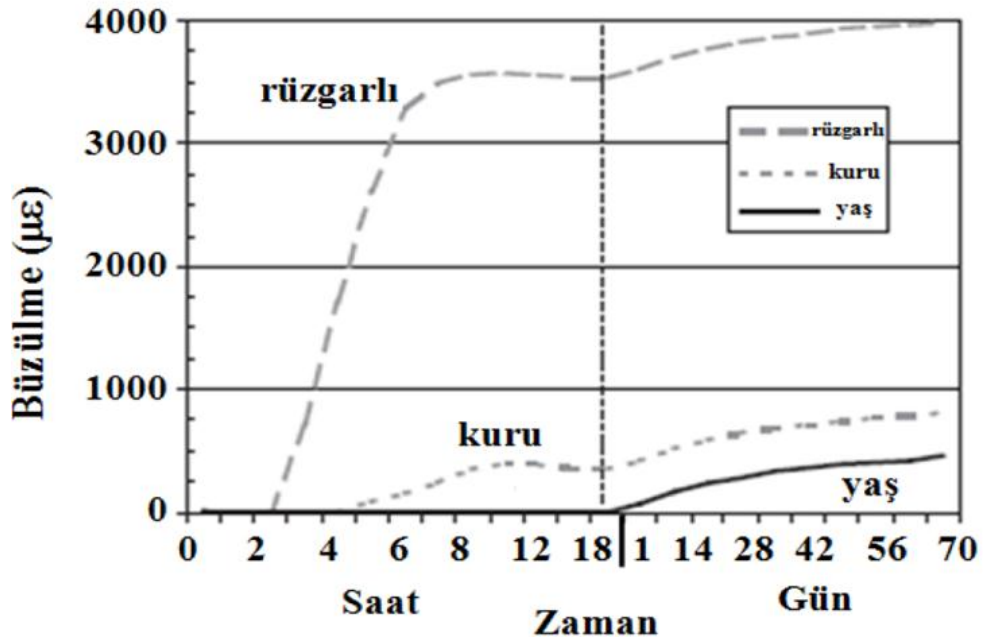
3.3.1 Büzülme Mekanizmaları

3.3.1.1 Plastik Büzülme

Plastik büzülme, çimento bazlı kompozitlerde, erken yaşta ortaya çıkan fiziksel kökenli bir büzülme mekanizmasıdır. Yapı elemanının bulunduğu ortamın nem ve sıcaklık koşulları, rüzgâr etkisi gibi parametreler, yüzeyden kaybedilen su miktarını arttırsa plastik büzülme riski artar. Plastik büzülmenin meydana gelmesi için buharlaşan su miktarının, terleme yoluyla yüzeye çıkan su miktarını aşması gerekir. Betonun dış yüzeyindeki kuruma, yüzeyde çekme gerilmeleri yaratarak yüzeysel çatlaklara neden olur. Kompozit açısından terleme hızını etkileyen temel faktör taze betonun kompasitesidir. Düşük S/Ç oranlı ve kaliteli betonların kompasitesi yüksek olduğundan, bünye suyunun yüzeye çıkma olasılığı azalır. Bu nedenle, uygun kür

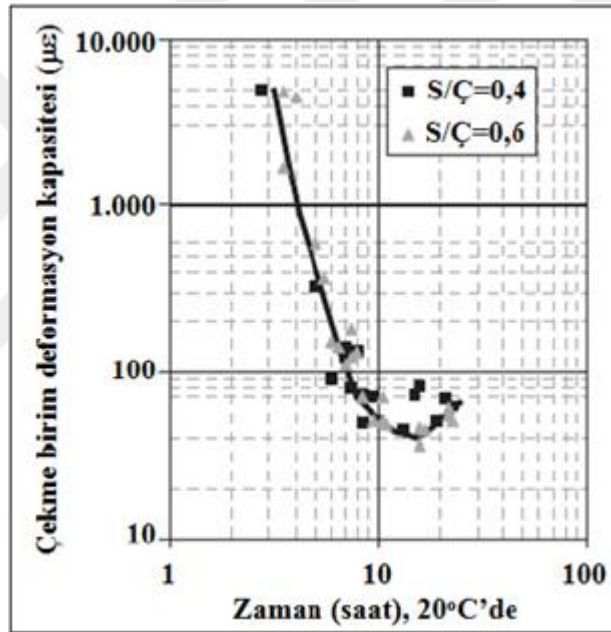
koşulları sağlanamadığı takdirde, kalitesi yüksek betonlarda plastik büzülme olayına S/Ç oranı yüksek olan betonlara kıyasla daha sık rastlanır. Plastik büzülme, tanımı gereği dış ortam koşullarının zorlaması ile meydana gelen bir büzülme tipidir. Ancak ilk 24 saatteki hidratasyon reaksiyonlarının yarattığı hacimsel değişiklikler de ister istemez plastik büzülme değerine ilave olmaktadır.

Erken yaşlarda yüksek sıcaklık, düşük nem, güneş ışığı veya rüzgar gibi olumsuz etkilere maruz kalan bir beton için ilk saatlerdeki büzülme çok yüksek mertebelere ulaşabilir. Şekil 3.3'te erken yaşlarda %40 bağıl nem etkisinde kurutulan, 2 m/s'lik rüzgar etkisinde kalan ve ıslak kürle korunan üç farklı örneğin serbest büzülme değerleri görülmektedir (Holt, 2005).Büzülme gelişimi hem erken yaşlarda hem de uzun vadede sunulmuştur. Plastik büzülmenin etkisi ile rüzgar etkisi altındaki beton ilk 18 saatte $3500 \cdot 10^{-6}$ büzülürken, kür edilen betonda büzülme gözlenmemektedir. İlk günden sonra tüm örnekler havada bekletilmiştir. Bu sürede yapılan ölçümlerde tüm örneklerin eşit miktarda büzüldüğü görülmüştür. Elde edilen sonuçlar erken yaşlarda kürün önemini göstermektedir.



Şekil 3.3 Farklı kür koşullarında erken yaşlarda ve uzun vadede büzülme, rüzgar: 2 m/s, kuruma: bağıl nem %40, yaş kür: bağıl nem %100 (Holt, 2005).

Büzülmenin taze betona en büyük zararı kısıtlı durumda çatlamaya yol açmasıdır. Büzülen betonun kısıtlı durumda erken yaşlarda çatlak hassasiyetini inceleyen araştırmacılar, betonun çekme birim deformasyon kapasitesinin zamana bağlı değişimini Şekil 3.4'teki gibi belirlemiştir (Holt ve Leivo, 2004). Bu grafikten S/Ç oranı 0,4-0,6 arasında olan betonların, çatlamaya en hassas olduğu zamanın dökümden sonraki 10-20 saat arası olduğu görülmektedir. Daha öncesinde beton henüz plastik kıvamda olduğu için, daha sonrasında da yeterli rijitliğe ulaştığı için çekme birim deformasyon kapasitesi yükselmektedir. Çimento bazlı kompozitlerin çekme etkilerine karşı en zayıf oldukları bu esnada onları korumak, gerekli tedbirleri almak gerekir.



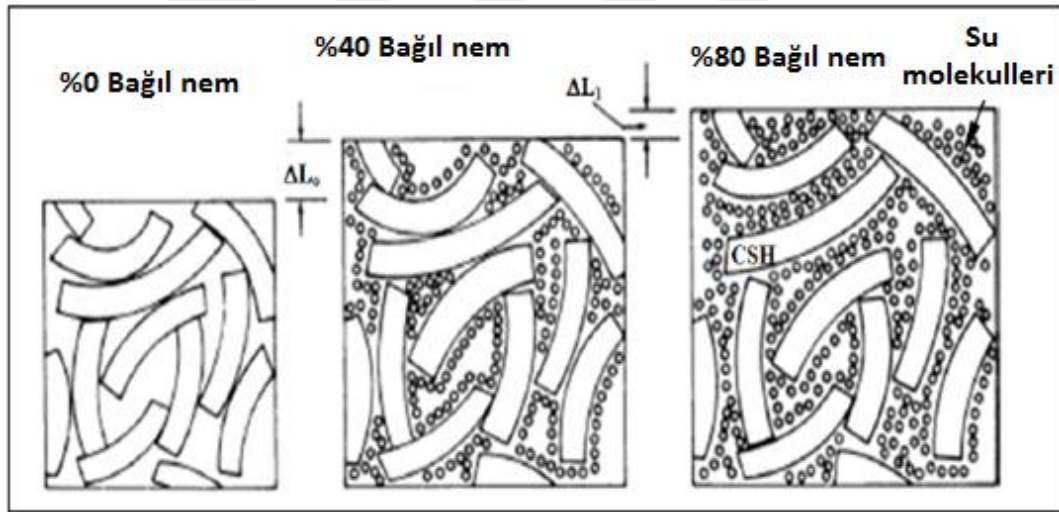
Şekil 3.4 Taze betonun çekme birim deformasyon kapasitesinin zamana bağlı değişimi (Holt ve Leivo, 2004).

3.3.1.2 Kuruma Büzülmesi (Hidrolik Büzülme)

Kuruma büzülmesi, betondan nem kaybı nedeniyle gerçekleşen büzülme olarak tanımlanmaktadır (ACI 116R). Geçmiş yıllarda kuruma büzülmesi terimi hem bünyesel hem de kuruma büzülmesi için birlikte kullanılmaktaydı. Bunun en önemli nedeni geçmişte yüksek dayanımlı ve düşük S/Ç oranlı betonların sıklıkla kullanılmamasıdır. Kullanılan betonlarda bünyesel büzülme ihmal edilebilecek kadar

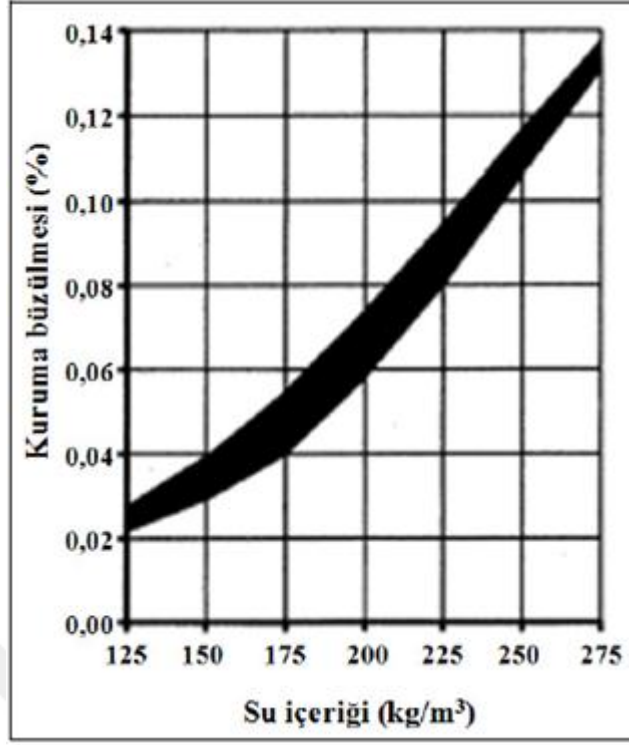
düşük mertebelerdedir. Geleneksel beton açısından, büzülme mekanizmalarından en önemlisi kuruma büzülmesidir.

Çimentolu malzemedeki kuruma büzülmesi esas olarak, sertleşmiş çimento hamurundaki hidrate kalsiyum silikat (CSH) jelinin nemini kaybederek birbirine yaklaşması ile oluşur. Suya doymuş çimento hamuru, doygunluğunun altındaki nem oranına sahip çevre koşullarında boyutsal olarak stabil kalmaz. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, CSH jeli nem azalınca fiziksel olarak absorbe ettiği suyu kaybeder ve bu durum büzülmeye yol açar (Kovler ve Zhutovsky, 2006). Çimento hamurunun kuruması sonucu, önce kılcal boşluklardaki su buharlaşmakta, bu boşluklara jel suyu akımı başlamakta ve daha sonra bu su da kısmen buharlaşmaktadır. Sonuçta absorbe su tabakası incelenerek ve taneler yaklaşarak hacim büzülmeaktadır. Farklı bağıl nem derecelerinde farklı kuruma mekanizmaları kuruma büzülmesinin gelişiminde rol oynar (Ramyar, 2002).



Şekil 3.5 Hidrate kalsiyum silikat (CSH) jelinin farklı nem koşullarında nemini kaybederek birbirine yaklaşması ile büzülme (Kovler ve Zhutovsky, 2006).

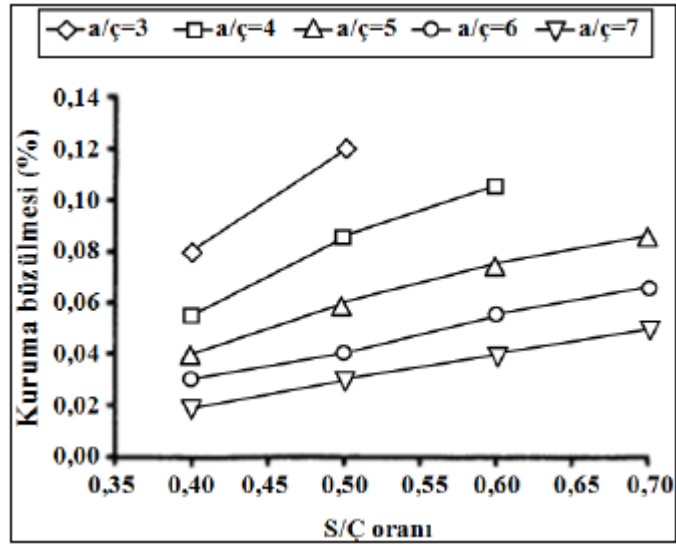
Kuruma büzülmesinde en etkili malzeme parametreleri S/Ç oranı, karışım suyu miktarı ve karışımdaki agrega oranıdır. Şekil 3.6 ve 3.7'de verilen deney sonuçlarından görüldüğü gibi, S/Ç oranı ve karışım suyu miktarı arttıkça kapiler boşluk oranı artacağı için kuruma büzülmesi de artar (DSouza, 2000).



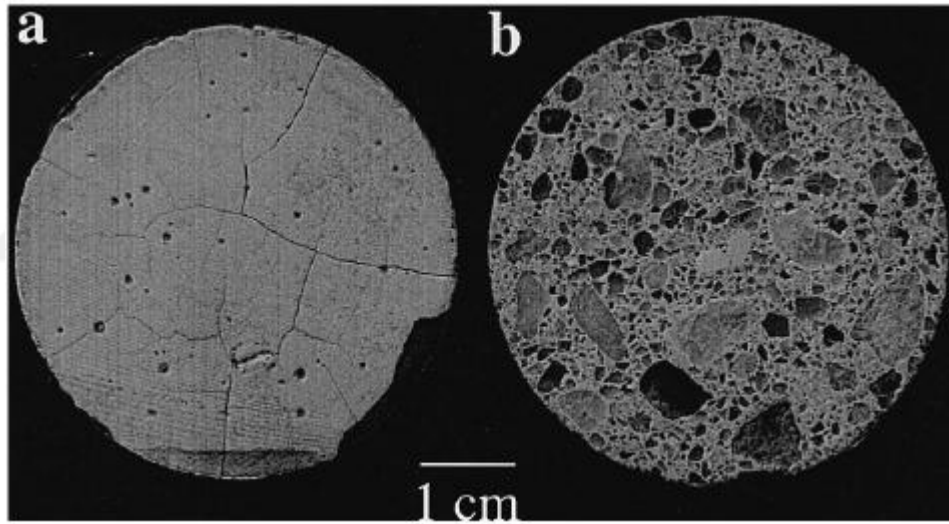
Şekil 3.6 Karışım suyu miktarının kuruma büzülmesine etkisi (DSouza, 2000).

Agreganın büzülmei kısıtlayıcı etkisi, farklı S/Ç oranındaki betonlar için Şekil 3.7'de verilmiştir (D'Souza, 2000, Banthia ve Gupta, baskıda). Agreganın miktarını arttırmak hem kısıtlayıcı etkisi, hem de çimento hamuru hacmini azaltıcı etkisi nedeniyle kuruma büzülmesini büyük ölçüde azaltır (Eguchi ve Teranishi, 2005).

Kısıtlı durumdaki betonda ise, agreganın çatlak ilerlemesini önler ve hem yüzeyde hem de derinlik boyunca çatlak yayıcı vazife görerek kuruma büzülmesi çatlaklarını engellemekte etkilidir (Shiotani, Bisschop ve Van-Mier, 2003). Şekil 3.8'de söz konusu çalışmada elde edilen sonuçları görsel olarak açıklayan bir örnek verilmiştir.

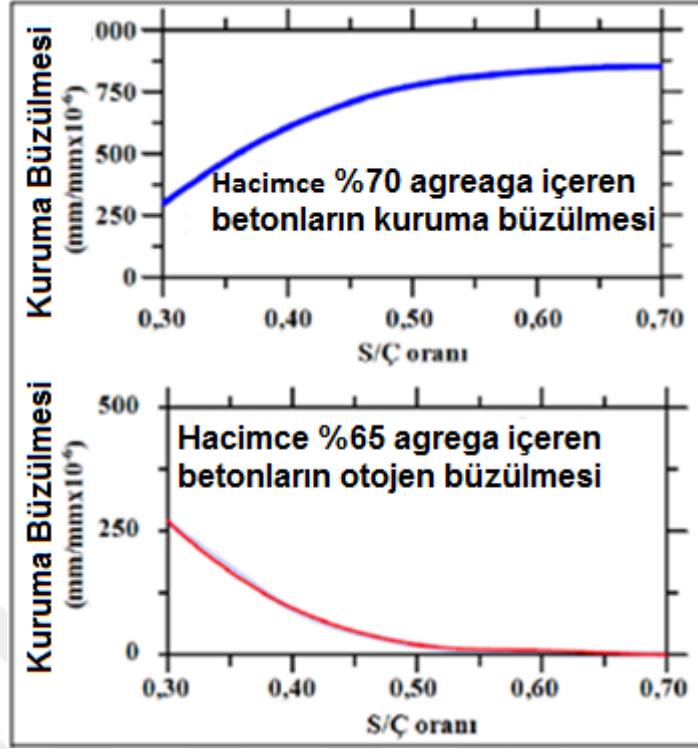


Şekil 3.7 S/Ç oranı ve agrega miktarının kuruma büzülmesine etkisi (D'Souza, 2000).



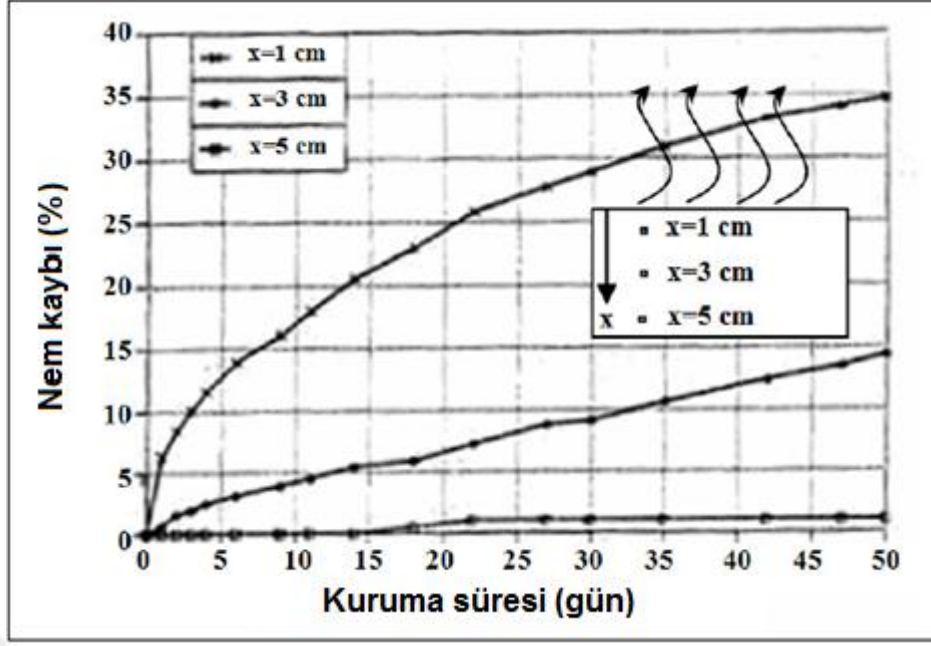
Şekil 3.8 Altı ay boyunca kurutulmuş çimento hamuru ve 14 mm en büyük tane boyutlu agrega ile hazırlanan beton (Shitani, Bisschop ve Van-Mier, 2003).

Şekil 3.9'da verilen grafiklerde benzer ince agrega/iri agrega oranına sahip karışımların, S/Ç oranı değişimi ile kuruma büzülmesi ve bünyesel büzülme değerlerinin değişimi görülmektedir. Kuruma büzülmesi S/Ç oranının artışı ile artarken, bünyesel büzülme azalmaktadır. Toplam büzülme dikkate alındığında, en uygun S/Ç oranının 0,50-0,55 olduğu görülmektedir (Pease, 2005).



Şekil 3.9 Benzer ince agrega/iri agrega oranına sahip karışımların S/Ç oranı değişimi ile kuruma büzülmesi ve bünyesel büzülme değerleri (Pease, 2005).

Kuruma büzülmesinin şiddetini etkileyen diğer bir parametre de çimento bazlı kompozit elemanın boyut ve şekil özellikleridir. Elemanın yüzey alanı/hacim oranının fazlalığı, malzemedeki su kaybını ve dolayısıyla kuruma büzülmesini hızlandırır. Büyük kütleli veya nem geçirimsizliği düşük elemanlarda ise derinlikle su kaybı azalmaktadır. Örneğin, tamir harcının nem kaybı, kuruma yüzeyine yakın bölgede hızlıdır, yüzeyden uzaklaştıkça nem kaybı yavaşlamaktadır. Asad, Baluch ve Al-Gadhib (1997)'nin çalışmasında, nem difüzyonuna uğrayan örneklerin kuruma yüzeyinden farklı derinliklerdeki (1, 3, 5 cm) zamana bağlı nem kayıpları Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10 Farklı derinliklerdeki nem kaybı - kuruma zamanı ilişkisi (Asad ve diğer, 1997).

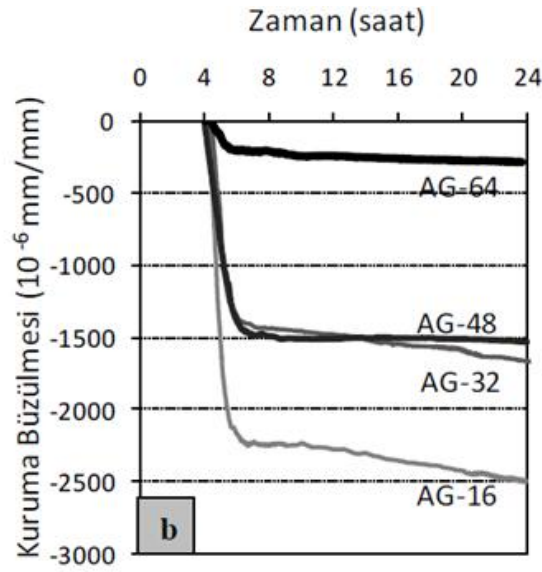
3.4 RPB’de Büzülme

RPB’nin çok yüksek bir oranda bağlayıcı madde içermesi, su/bağlayıcı oranının genellikle 0,14 – 0,25 aralığı gibi düşük değerlerde olması, yüksek oranda silika dumanı içermesi sebebiyle bünyesel büzülme mertebeleri, kuruma büzülmesi kadar risk teşkil edebilmektedir. Yüksek dayanıma sahip olan RPB’lerin hamur fazının büzülmesi kritik mertebelerde iken, oluşması muhtemel erken yaş ve uzun dönem büzülme çatlaklarının minimize edilmesinde agrega fazının etkisi büyüktür.

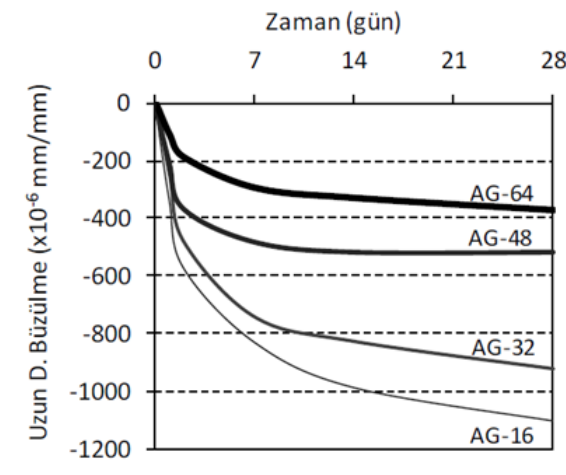
Agregaların yüksek oranda büzülen hamuru kısıtlaması yapısal olarak tutulmuş elemanlarda mikro ve makro çatlak sayıları azaltabilir. Agregaların bu özelliklerinin yanı sıra agrega – çimento pastası arayüzeyinde gelişen mikro çatlaklarının net olarak anlaşıldığı söylenemez (Grassl ve diğer., 2010)

Agregaların hamur büzülmesini kısıtlarken oluşturacağı mikro çatlakların sayısı, miktarı ve açıklığı: agrega hacmi, türü, geometrik özellikleri ve boyutları ile ilgilidir. Ayrıca RPB’nin geçirimsizliğinin ve mekanik özelliklerinin, oluşacak büzülme çatlakları ve arayüzey geçiş bölgesi (AGB) miktarı ile yakından ilişkili olduğu görülmektedir. (Grassl ve diğer., 2010)

Agrega hacmi artışı ile RPB'nin erken yaş bünyesel ve kuruma büzülmeleri, ayrıca uzun dönemli büzülmeler önemli oranda kısıtlanmaktadır. Kısıtlayıcı etki koşulların elverişsizleşmesiyle belirginleşmektedir. %16 dan %64 agreg a hacmine geçildiğinde erken yaş kuruma büzülmeleri 1/10, uzun dönem büzülmeleri 1/3, erken yaş bünyesel büzülmeleri 1/2,5 mertebesine inmiştir. RPB, özellikle erken yaşlarda hassas bir küre ihtiyaç duymaktadır. (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12) (Yalçinkaya ve Yazıcı, 2011)

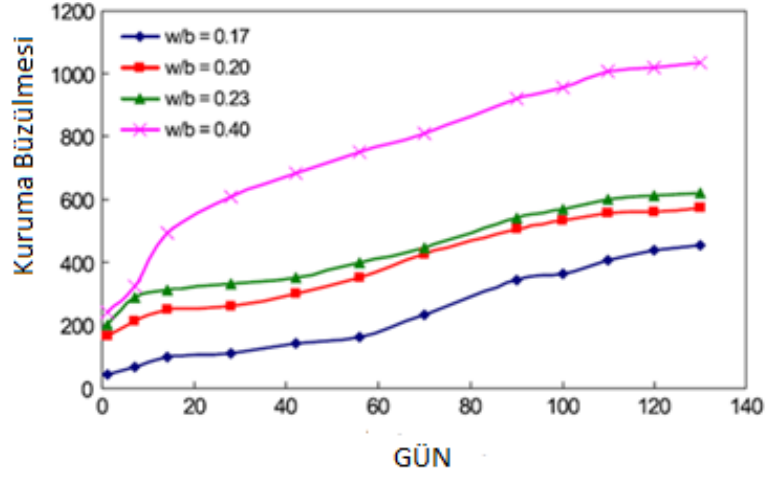


Şekil 3.11 Erken yaş kuruma büzülmeleri eğilimleri (Yalçinkaya ve Yazıcı, 2011)



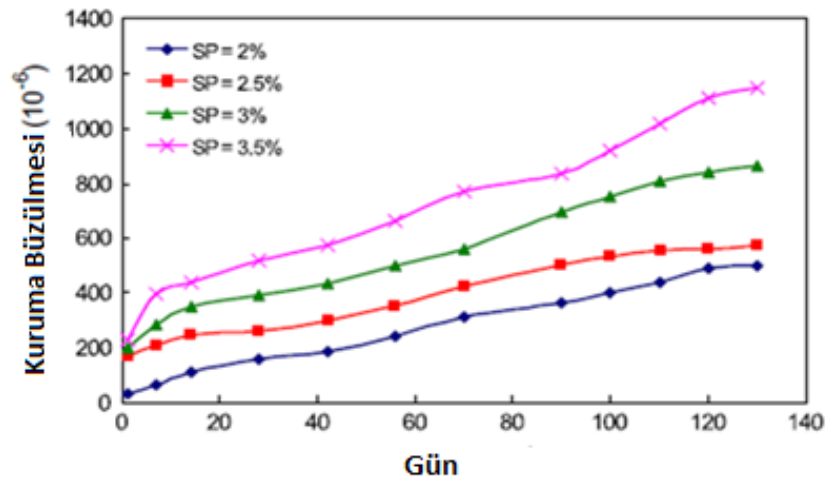
Şekil 3.12 Uzun dönemli büzülme eğilimi (Yalçinkaya ve Yazıcı, 2011).

RPC betonlarında da diğer betonlarda olduğu gibi Su/Bağlayıcı oranı ne kadar yüksek olursa, kuruma büzülmesi o kadar artar ve bu durum RPB betonlarında çatlak oluşumuna neden olabilir (Tam ve diğer., 2012) (Şekil 3.13).

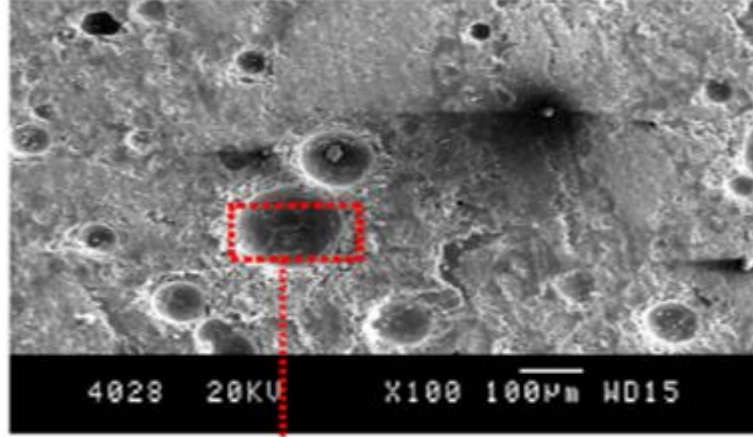


Şekil 3.13 Farklı su/bağlayıcı oranı ve farklı yaşlarda RPB'nin kuruma büzülmesi (Tam ve diğer., 2012)

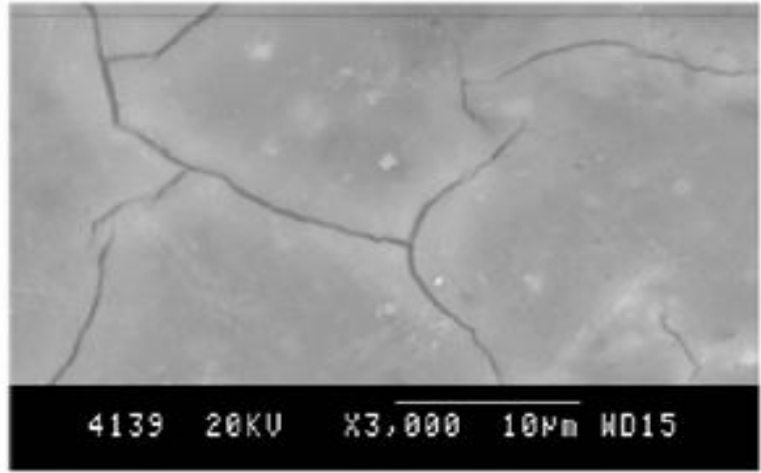
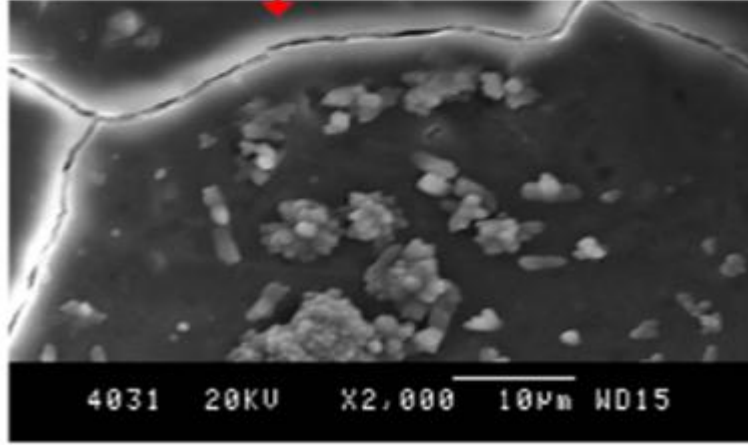
RPB betonlarında süper akışkanlaştırıcıların oranı ne kadar artarsa kuruma büzülmesinin miktarı da o kadar artar ve bu oranın artması da RPB de çatlak oluşumuna neden olabilir (Şekil 3.14). Şekil 3.15'te 14 gün boyunca büzülme ortamına maruz kalmış ve 0.4 su/b oranıyla hazırlanan RPB'nin büzülme çatlakları gösterilmiştir. (Tam ve diğer., 2012).



Şekil 3.14 Farklı süperakışkanlaştırıcı dozajı ve farklı yaşlarda RPC'nin kuruma büzülmesi. (Tam ve diğer., 2012).



(a) Düşük büyütmede gösterilmiş RPB



Şekil 3.15 Su/bağlayıcı oranı 0,4 olan RPB'de 14. günde ortaya çıkan çatlaklar (Tam ve diğer., 2012)

BÖLÜM DÖRT

BETONDA DONMA-ÇÖZÜLME OLAYI

Karasal iklim gibi sert iklim koşullarının görüldüğü yörelerde betonun kalıcılığının karşısındaki en büyük tehditlerden birisi donma-çözülme olayıdır. Donma-çözülme olgusu beton taze veya sertleşmiş haldeyken meydana gelebilmektedir.

4.1 Taze Betonda Donma-Çözülme

Henüz sertleşmemiş yani plastik halde bulunan beton içerisindeki su donmaya başladığında oluşan buz serbestçe boşluklara kaçabilmektedir. Bu olay donduğunda yaklaşık %9 hacim artışı yaratan suyun basınç yapabileceği kapalı hazne yani sertleşmiş beton boşluklarının henüz oluşmamasından kaynaklanmaktadır. Ancak buz oluşumuyla birlikte katı tanecikler taze beton matrisi içinde harekete başlar.

Taze beton donduğunda çimento harcı ile iri agregalar arasındaki yüzey bağları kütle transferi sebebiyle bozulmaya başlamaktadır. İri agregaların özgül ağırlığı betona kıyasla daha büyük olduğundan dolayı çimento harcından daha iyi ısı iletirler. Donma olayı taze betonda boy gösterdiği andan itibaren agregalar beton harcından daha çabuk soğumaya başlar. Düşük sıcaklığa sahip alanlarda bağıl basınç da daha az olduğundan su daha soğuk olan agregalara doğru hareket etmeye başlar. Böylelikle agregalar yüzeyinde donarak birikmeye başlayan su agregalar çevresinde bir buz-su filmi oluşturur. Buz filmi hacimsel olarak büyüdükçe oluşan genleşme neticesinde agregalar-çimento ara yüzeyindeki fiziksel bağı koparmaktadır. Aderansın azalmasına paralel agregalar çimento matrisinden kolayca ayrılabilir. Su emme kapasitesi yüksek boşluklu agregaların kullanımı (örneğin hafif betonda olduğu gibi) film tabakası oluşumunu azaltarak daha az hasara sebep olmaktadır (Baradan ve diğer., 2010).

Çimentonun su ile temasıyla başlayan hidrasyon egzotermik yapıda reaksiyonlar oluşturduğu için beton içerisindeki su tamamen donmamaktadır. Donmayan su varlığı hidrate olmamış çimento ile buluştuğunda açığa çıkan hidrasyon ısı sonucunda artan sıcaklık sebebiyle su daha soğuk bölgelere kayar. Sonuçta buz

kütlelerinin büyümesi devam eder. Ayrıca nispeten daha sıcak olan iç bölgelerdeki sular donmaya başlayan dış yüzeye hareket ederek ek bir kütle transferi yaratmaktadır. Priz henüz başlayan beton için dış bölgelerde donup genişleyen su, betonun ana iskeletini parçalayıcı etki yaratmaktadır.

Çimento ve diğer bağlayıcıların hidratasyonu için gereken su donduğunda prizinde durduğu gözlemlenebilir. Ani donmalarda bu olay tüm kütle için dayanım kazanmaması olarak yorumlanır. Bu nedenle -12°C 'nin altında sıcaklıklarda betonun dayanım kazanmadığı kabul edilir (Baradan ve diğer., 2010).

Hava sıcaklığı arttıkça donma etkisinde dökülen beton içerisindeki buzlar çözülmeye başlar. Böylelikle makro yapıda boşluklar dahi oluşabilmektedir. Hidrate olan çimento jelleri bu boşlukları dolduramadığından daha boşluklu, geçirimli bir beton imalatı yapılmış olur. Bu sebepten dolayı gerek mekanik özelliklerde gerek kalıcılık performansında düşmeler gözlemlenmektedir.

Tüm bu olumsuzluklara önlemek için alınması gereken önlemler sıralanacak olursa:

- Günün daha sıcak olduğu öğle saatlerinde döküm yapılması
- Uygun beton tasarımı yapılması
- Döküm araçlarının sıcak tutulması
- Priz hızlandırıcı, hava sürükleyici veya antifiriz etkisi yapan kimyasalların kullanılması
- Kullanılan çimentonun tipinin, inceliğinin ve kimyasal bileşenlerinin uygun seçilmesi
- Dona dayanıklı agregaların kullanılması
- Kimyasal katkıların çalışma sıcaklıklarının dikkate alınması (hava sürükleyiciler 0°C 'nin altında donmaya başlarken özellikle kendiliğinden yerleşen betonda sıklıkla kullanılan hiper akışkanlaştırıcılar -10°C 'ye kadar donmayabilmektedir)
- Beton dökümünden sonra kütle sıcaklığını koruyucu önlemlerin alınması

- Kür sıcaklığı, su/çimento oranı, çimento tipine bağlı olarak uygun kür süresinin seçilmesi gibi önlemler planlandıktan sonra imalata başlanmalıdır.

4.2 Sertleşmiş Betonda Donma-Çözülme

Sertleşmiş bir beton suya doygun halde don etkisinde kaldığında matris içerisindeki kapiler boşluklarda bulunan su donar ve genişir. Tekrarlı donma ve çözülme etkileri sonucu artımsal olarak bu etki yinelenir ve tek başına donma etkisinden daha olumsuz bir sonuç yaratır. Boşluk çeperlerine etkiyen gerilme sonucu kılcal çatlaklar meydana gelir. Kılcal çatlaklara çözülme sonrası serbest kalan su sızarak peşinden gerçekleşecek don sonucu tekrar gerilme etkisi yaratır. Temel olarak, donduğunda %9 mertebelerinde genişen suyun yarattığı gerilme beton çekme dayanımını aştığında harita görünümlü çatlaklar, parçalanmalar ve yüzeyde kabuk atmalar gözlemlenmektedir (Baradan ve diğer., 2010).

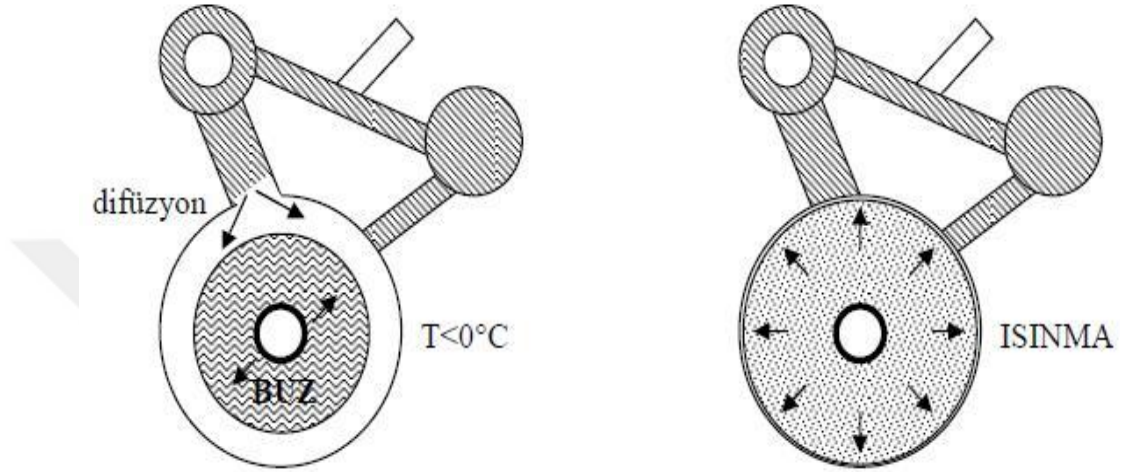
4.2.1 Donma Mekanizması

Powers (1965)'a göre yeterli su kürü uygulanmış ve yeterli havayı bünyesinde bulunduran betonda dahi tam anlamıyla donma dayanıklılığının olduğu söylenemez. Betondaki dağılmanın ana sebebi yalnızca buz basıncı değil, bu olgunun gelişmesine gerek kalmadan buz oluşurken olan genişleme ile itilen suyun yarattığı hidrolik basınçtır. Bu hipotez "hidrolik basınç hipotezi" olarak adlandırılmıştır (Çopuroğlu, 2006).

1953 yılında Powers ve Helmuth tarafından "mikroskobik buz lens büyüme teorisi" ortaya atılmıştır. Bu teori Setzer tarafından daha da ileri götürülmüştür (Setzer, 2002). Bu teoriye göre; pastanın sıcaklığı 0°C'nin altında ise kapiler boşluklardaki su jel boşluklarındaki su ile "temodinamik dengede" olarak değerlendirilir.

Diğer bir teori de donma teorisidir. Bu modele göre hasar donma sırasında değil çözülme esnasında olmaktadır (Bijen, 2003). Geniş boşluklardaki su donduğu zaman daha küçük boşluklardaki suyu hem sıvı hem de buhar formunda kendine çekmektedir. Daha küçük boşluklar daha az donmuştur yahut daha kurudur. Bu yüzden büyük boşluklardaki buzlar büyür. Bu buz lens büyüme teorisindeki tanımla

benzerdir. Peşi sıra sıcaklık yükselecektir. Buz genişleyecek ve termal genişleme katsayısı betondan 5 kat daha büyük olduğu için betonda ek gerilmeler yaratacaktır. Bu çekme kuvvetleri $0,36 \times T$ (N/mm²) şeklinde ifade edilebilir. Buradan görüleceği üzere 15°C sıcaklığına ulaşıldığında normal bir betonun çekme dayanımının aşılması anlamına gelmektedir (Şekil 4.1) (Çopuroğlu, 2006).



Şekil 4.1 Geniş boşluklarda donmuş su (sol) ve ısınma sırasında buzun genişmesi (sağ) (Çopuroğlu, 2006).

4.3 Hava Sürüklenmiş Beton

Bahsedildiği üzere beton kritik bir doygunluk oranının üstünde donma çözülmeden hasar görmektedir. Alınacak önlemlerin başında dökümü uygun mevsimde veya günün uygun sıcaklığında yapmak gelmektedir. Ancak bu önlemlere uygun olmayan yörelerde beton karışım tasarımına ve hava sürüklemeye dikkat edilmelidir.

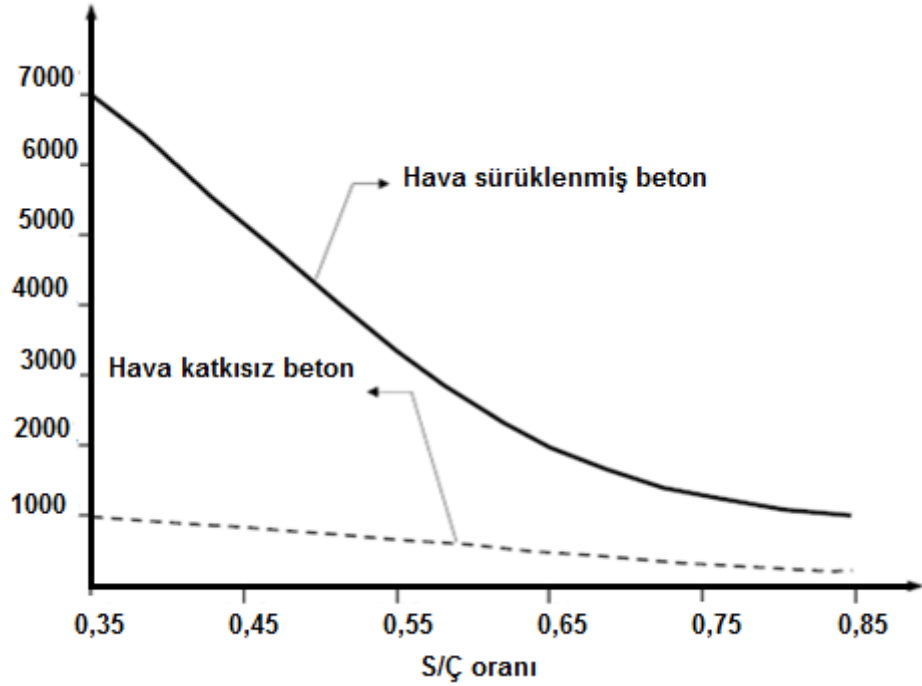
Hava sürükleme etkisi hem klinkerin hava sürükleyici malzemeler barındıran alçı taşı ile öğütülmesiyle elde edilen (hava sürükleyici çimento) çimentolarla hem de betonun üretimi sırasında doğrudan katılan kimyasallarla sağlanabilmektedir. Çimentoların kullanımı daha az tercih edilmektedir. Bunun sebebi betona koşullara göre değişebilen miktarda hava sürüklenmesine izin vermemesi ve bunun yanında hava sürükleyici ajanların doğrudan beton üretiminde kullanılmasıyla koşula uygun hava miktarının rahatça sürüklenmesidir. Her iki yolla da üretilen ve içinde

milyonlarca bağımsız kabarcık içeren bu betona “hava sürüklenmiş beton” denmektedir (Erdoğan, 1997).

Hava sürükleyicilerin çalışma prensibi beton taze halde iken hava kabarcıklarının beton içine sürüklenmesi ve beton prizini almaya başladığı zaman bu boşlukların matris içinde hapis kalması mantığına dayanmaktadır. Hava sürükleyiciler içindeki yüzey aktif ajanlar yüzey gerilimini düşürmekte ve böylelikle hava kabarcıkları daha stabil kalmaktadır (Erdoğan, 2002).

Beton içerisine hava sürüklenmesi sonucu pasta hacmi artmakta, işlenebilirlik iyileşmekte, daha az terleme ve segregasyon gözlemlenmektedir. Bunun yanında basınç dayanımında düşüş gibi negatif özellikler de getirmektedir. Hava sürükleyici olarak sentetik deterjanlar, reçine tuzları, petrol asidi tuzları, protein içeren malzeme tuzları, organik hidrakerbon tuzları gibi kimyasallar kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları sentetik deterjanlar ve reçine tuzlarıdır.

Betonun donma-çözülme dayanımına çimento dozajı, su/çimento oranı, sürüklenmiş hava doğrudan tesir etmektedir. Hava sürükleyici katkı maddesi içeren ve içermeyen beton örneklerinde %25 ağırlık kaybına yol açacak donma-çözülme devir sayısı ile su (S) / çimento (Ç) oranı arasındaki ilişki Şekil 4.2’te gösterilmiştir. Bu çalışmada örnekler 14 gün su kürüne maruz bırakılmış, 76 gün %50 bağıl nemli ortamda kür edilmişlerdir. S/Ç oranı arttıkça hava sürükleyici katkının etkinliğinin azaldığı gözlemlenmektedir. Betonda kapiler boşlukları en alt düzeye indirecek önlemler alınmalı ve bu içerikteki betona hava sürüklenmelidir (Baradan ve diğer., 2010). ACI 201R standartında donma-çözülme maruz kalacak betonların S/Ç oranınının 0,5’i aşmaması ve 24 MPa dayanıma ulaştıktan sonra bu etkiye maruz kalması önerilmektedir (Baradan ve diğer., 2010).



Şekil 4.2 Hava sürüklemenin ve S/Ç oranının donma-çözülmede ağırlık kaybına etkisi (Baradan ve diğer., 2010)

Beton içine hava sürüklemenin taze halde ve sertleşmiş halde beraberinde getirdiği olumlu ve olumsuz özellikler mevcuttur. Taze halde çimento taneleri etrafında bir bilye sistemi gibi çalışıp işlenebilirliği arttırmaktadır. Özellikle az çimento dozajlı betonlarda segregasyonu ve betonun kusmasını azaltmaktadır. Yüksek çimento dozajlı betonlarda bu etki daha hafif olmaktadır. Kendiliğinden yerleşen beton ya da Reaktif Pudra beton gibi çok akışkan betonlarda hava sürükleyici kullanılacaksa akışkanlaştırıcı dozajını bir miktar düşürmek gereklidir. Aksi takdirde segregasyon ve kuma gözlemlenebilmektedir.

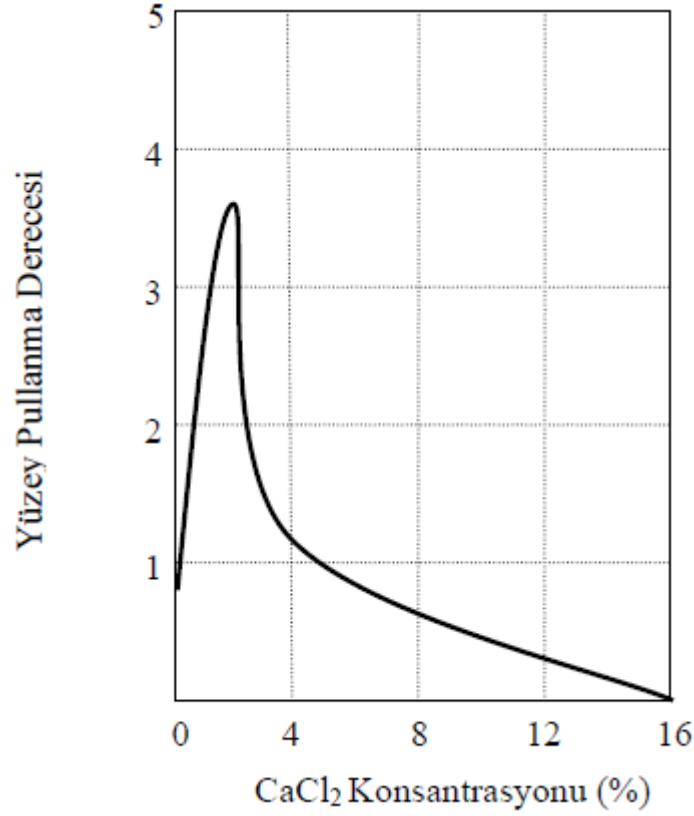
Hava sürükleyicilerin ana amacı donma - çözülme dayanıklılığını arttırmaktır. Fakat beton sertleştikten sonra matris içerisinde süreksizlikler olduğundan betonun basınç dayanımında bir miktar düşme görülmektedir. Bu değer her %1 sürüklenen hava için %5 basınç dayanımı kaybı mertebelerindedir.

4.4 Buz Çözücü Tuzların Etkisi

Kış aylarında beton kaldırım ve yollardan buz tabakasını kaldırmak için sıklıkla kullanılan tuzlar olan kalsiyum ve sodyum tuzları betona zarar vermektedir. Bu zarar tek başına donma etkisinden çok daha şiddetli olmaktadır. Bu hasar daha ziyade fiziksel bir mekanizmadan kaynaklıdır. Betonun üst tabakaları tarafından bir miktar tuz emilir. Bu da osmotik basınç oluşturarak donmanın başladığı en soğuk bölgeye su akımını yaratır. Böylelikle salt donma-çözülme hasarının etkisini oldukça arttırmaktadır. Bunun yanında buz tabakasının üzerinde bulunan tuzlar buz tabakasının erimesiyle önemli derecede termal şok etkisi yaratır. Yüzeyde ve iç bölgede oluşan sıcaklık farkından dolayı yüzey çatlakları meydana gelir. Buz konsantrasyonunun beton derinliğince farklı olması farklı zamanlarda donma-çözülme olayına sebep olur. Bu da tabaka veya kabuk halinde bozulmalara sebep olmaktadır. Betonarme donatıları keza klorür korozyonuna maruz kalmaktadır. Bu da buz çözücü tuzların donma-çözülme hasarından ayrıca bir araştırma konusudur.

Betondaki boşluk karakteristiği de tuzlu suların yarattığı hasar ile doğrudan ilişkilidir. Hava sürüklenmiş beton bağımsız ve küresel küçük boşluklar içerdiğinden bu kimyasallara karşı daha dayanıklıdır. Boşluk çaplar küçüldükçe tuzlu suların donma noktası yalın suyun donma noktasına yaklaşmaktadır. Diğer bir deyişle boşluk çapı küçüldükçe tuzların donma noktasını düşürücü etkisi azalmaktadır. Küçülen boşluk çapı ile daha geçirimsiz ve tuzlara dayanıklı bir beton dizaynının sağlanabileceği işaret edilmektedir (Baradan, 2010).

Değişik bir durum da tuz konsantrasyonunun artmasıyla belli bir değerden sonra hasarın azalmasıdır. Hava sürüklenmemiş betonda tuz konsantrasyonu ile oluşan pullanma hasarının derecesi (50 çevrim sonunda) Şekil 4.4'te gösterilmektedir. "0" değeri hasarsızlığı, "5" değeri şiddetli pullanmayı göstermektedir. S/Ç oranı 0,40'dan büyük, çimento dozajı 310 kg/m³'ten az olmayan dizaynların pullanmaya karşı dayanıklı olduğu söylenebilir. Ayrıca yüksek dayanımlı betonların da pullanma dayanıklılığının yüksek olduğu görülmektedir (Neville, 1997).



Şekil 4.4 Tuz konsantrasyonu ve pullanma hasarı (Neville, 1997).

4.5 Donma-Çözülme Hasarını Etkileyen Faktörlere Genel Bakış

Gözenekli bir malzeme olan beton servis ömrü süresince birçok donma-çözülme etkisine maruz kalabilmektedir. Bu olgu tekrarlı buz hasarı olarak da tanımlanabilir. ASTM C-666 dinamik elastisite modülündeki düşüşleri, ASTM C-671 genleşme miktarlarını, ASTM C-672 ve İsveç standardı SS 13 72 44 buz çözücü tuzların varlığında yatay yüzeyde pullanmayı ölçmeyi tarif etmektedir (Pigeon ve Pleau, 1995). D-Ç hasarı üzerinde etkisi olan sayısız malzeme ve olgu bulunmaktadır. Bunların etkisini kısaca ele almamız gerekirse;

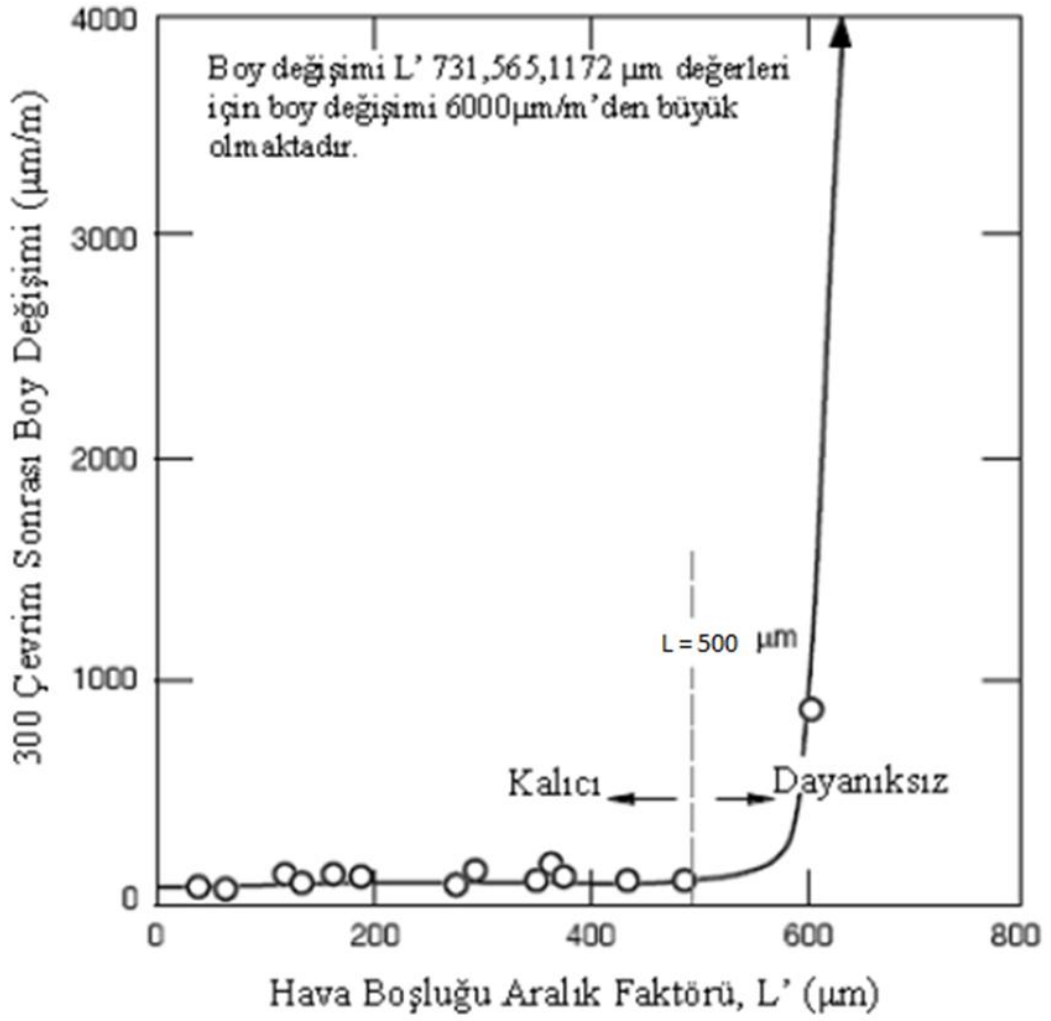
4.5.1 S/Ç Oranı

Temel faktörlerden birisi S/Ç oranıdır. S/Ç oranı yalnızca toplam kapiler boşluk miktarını etkilemez (Powers ve Brownyard, 1947) aynı zamanda boşluk boyut dağılımını da etkiler (Parrott, 1989). Düşük S/Ç oranı düşük poroziteye ve geniş

çaplı boşluklarda azalmaya sebep olur. Bununla birlikte permeabilite azalmakta ve suyun pastaya girişi güçleşmektedir. Böylelikle donma-çözülme hasarı etkili biçimde düşmektedir (Verbeck ve Landgren, 1960; Marchand ve diğer., 1995; Pigeon ve Pleau 1995; Thorpe, 1996).

S/Ç oranı aynı zamanda ikinci bir faktör olan hava kabarcıkları aralığını etkiler. Buz hasarını bastıran ya da en azından azaltan kritik hava kabarcığı aralığından (L_c) söz edilir. Bu mesafenin altında buz oluşumu hasarı düşürülebilmektedir. Örneğin farklı beton örneklerini ASTM C-666 (A) prosedürüne göre 300 D-Ç çevrimine maruz bırakmıştır. Sonuç olarak S/Ç değeri 0,4'ten küçük olduğunda L_c artmış yani D-Ç dayanıklılığı yükselmiştir (Şekil 4.5). Kobayashi vd. (1981) ve Pigeon (1989) benzer sonuçlara ulaşmışlardır.

Düşük S/Ç oranlarında ($<0,3$) beton dona karşı dayanıklılaşmıştır (Gagne, 1990). Bir diğer çalışma yine ASTM C-666 (A) prosedürüne göre yürütülmüş, 17 farklı yüksek dayanımlı betonda ses geçiş hızı ve boy değişimleri incelenmiştir. Çalışmaya göre kritik S/Ç oranı; kür süresi ve çimento inceliğine bağlı olarak bazı karışımlar için 0,3'ten büyük, diğerleri için 0,25 ve daha düşük bulunmuştur (Pigeon ve Langlois, 1991). Her iki faktör de su içeriğine bağlı olarak boşluk yapısını etkilemektedir (Schulson, 1998).



Şekil 4.6 Hava boşluğu aralığı - boy değişimi ilişkisi, kritik L' değeri (Schulson,1998).

Tüm araştırmacıların boşluk mesafesi ve buz hasarı arasında net bir ilişki olduğu fikrini kabul ettiği söylenemez (Mielenz, 1968; Gjørsv vd., 1978; Mather, 1978). Başka bir çözümleme de Litvan (1983)'ün çalışmasındaki fikir olabilir. Litvan, orta boyuttaki (0,35 ila 2 μm) yani en geniş kapiler boşluklarla eşdeğer olan bu boşlukların hava sürüklenmiş betonda yalnız betondan daha fazla olduğunu belirtmiştir.

Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde sürüklenen hava yeterli miktarda ve uygun dağılımda olsa bile içsel çatlakların oluştuğu söylenebilir. Kritik boşluk mesafesi, minimum sıcaklık ve maruz kalınan çevrim sayısına göre değişebilmektedir.

4.5.3 Doygunluk Derecesi

Laboratuvar çalışmalarında genellikle numuneler çevrime başlamadan önce tam doygun hale getirilmektedir. Arazide bu durum mevcut olmayabilir. Suyun varlığı, atmosfer nemi, su emme veya temas koşulları etkenleri mevcuttur. Kısaca pratikte beton daha az doygun bulunabilmektedir. Örneğin beton kaldırımların doygunluğu bir ülkede 0,8-0,95 arasındadır (Vanderhorst ve Jahnsen, 1990). Doygun olmayan betonlarda hava sürüklenmesi dahi buz hasarı bir problem olmaktan çıkar (MacInnis ve Beaudoin 1968; Litvan, 1972). Bu yüzden önemli faktörlerden biri de doygunluk derecesidir.

Buz hasarına dayanıklı olunan süreç su absorpsiyon ve boşluk çapları ile alakalıdır. Daha küçük boşluklar içeren betonlar daha çabuk doygun hale gelmektedir (Schulson, 1998). Absorpsiyon kinetikleri aynı zamanda mevcut suyun derişimine de bağlıdır (Fagerlund, 1977).

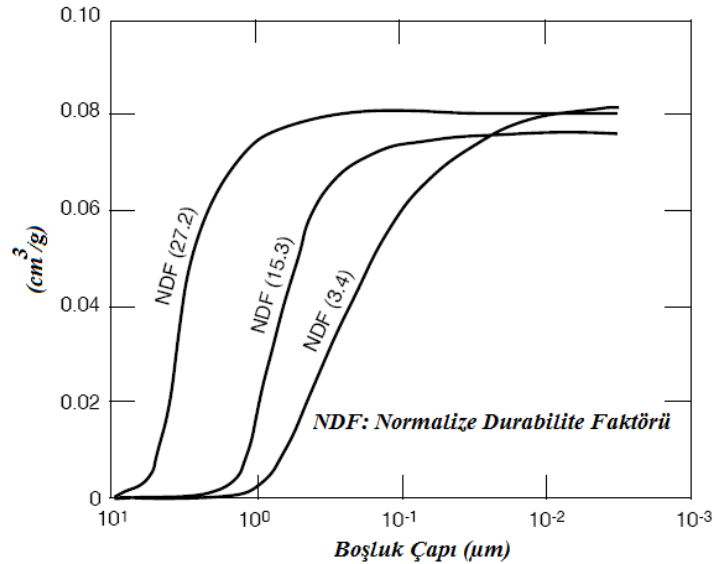
Fagerlund (1977), betonun suya doygunluk derecesinin etkisini incelemiştir. Doygunluğun derecesi "S"; donma sürecinde olan malzemenin içerdiği toplam buharlaşabilen su (jel suları dahil) ağırlığının, 50°C'de etüv kurusundan tam doygun yapılmış numunelerin vakum altında belirlenen ve koşuldan koşula sabit olan buharlaşabilir su ağırlığına bölünmesiyle elde edilir. Hava sürüklenmiş ve sürüklenmemiş numunelerde 0,4 ila 0,5 su/çimento oranında bir seri laboratuvar deneyleri incelenmiştir ve buradan Foreguland kritik doygunluk oranının (Sc) 0,80'ler mertebesinde olduğunu belirtmiştir (Schulson, 1998).

Doygunluk oranının tesirinin belirlenmesi için uygulanan metotta ön kurutma işlemi vardır. Bu işlem ilk boşluk boyutu dağılımını değiştirmektedir. Değişen bu özellik ile birlikte beton tarafından suyun absorpsiyon edilmesi sistematığı de değişecektir. Ön kurutmanın olduğu bu laboratuvar deneyi ile sahadaki betonun maruz kaldığı ön kuruma işleminin korelasyonunun yapılması sıkıntılıdır. Ayrıca ASTM C-666 'da önerilen prosedürde numune tamamen doygun halde test edilmektedir. Bu durum tekrarlı donma-çözülme hızlı test eden doğru bir yaklaşım

olsa da ön kurutma etkilerini kapsamamaktadır. Tanımlanan kritik doygunluk değerinin altında da içsel çatlakların oluştuğu normalize elastisite modüllerinden ve boy değişimlerinden anlaşılmaktadır. Bu yüzden kritik doygunluk oranı hasar oluşumu için kati sınır anlamına gelmemektedir.

4.5.4 Agregata

Agregalar boşluklu yapıda hammaddelerdir ve donma-çözölmeye maruz kalmaktadırlar. Boşluk miktarlarının fazla olması istenmemektedir. Yapılan çalışmalara bakıldığında (MacInnis ve Lau, 1971) değişik S/Ç oranlarında (0,45 ila 0,6) -18 °C'ye kadar soğutma işlemi neticesinde ince agregata kullanımının sorun yaratmadığı ve daha stabil betonlara olanak verdiği gözlemlenmiştir. Aynı çalışmalarda kaba agregata içeriğinin (10 ila 20 mm) artması boy uzamalarını arttırmıştır. Bu davranış toplam poroziteden ziyade boşluk boyut dağılımından kaynaklanmaktadır (Schulson, 1998). Buna bir kanıt olarak Kaneuji (1980)'nin 14 farklı agregata tipiyle beton hazırlayıp ASTM C-666 (A) prosedürüne göre test ettiği çalışma gösterilebilir. Bu çalışmada belirli bir agregata boşluk hacminde, agregata boşluk sistemindeki kaba boşlukların artışıyla betonların durabilitesi arttığı saptanmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Agregata ortalama boşluk boyutunun artışıyla buz hasarına karşı artan dayanıklılık (Kaneuji, 1980).

İnce boşluklar içeren ve adsorbe su miktarı yüksek agregalar donma hasarına açıktır. Agreganın ihtiva ettiği su hidrasyon ve buharlaşma ile azalmaktadır. Dışarıdan gelecek ve emilecek suyun varlığı agregaların yeniden hasara maruz kalmasına sebep olabilir. Bu da agregayı çevreleyen hamur fazının geçirimsizlik özellikleri ile doğrudan ilgilidir. Tanelerde oluşacak hidrolik basıncın zarar vermemesi için gerekli bir kritik boyut tanımlaması vardır. Minerolojik köken, agrega geçirimsizlik katsayısı ve doyma derecesinin fonksiyonu olan bu boyut genellikle 12,5mm'den büyüktür. Granit, bazalt, mermer ve kuvarsit gibi donabilir suyu az olan agregalar için kritik boy tanımlaması yapılmamaktadır (Akman, 1977).

4.5.5 Çimento Tipi

Çimento hidrasyon hızı göz önüne alındığında erken yaşlarda (28 günden önce) donma-çözölmeye maruz kalacak betonlar için hızlı dayanım kazanan çimentoların daha iyi performans sergilemesi beklenmektedir. Ayrıca yüksek klor geçirimsizliği ile cürufu çimentoların donma-çözölme ve klor etkisinin eş zamanlı olduğu bölgelerde daha iyi performans sergilemesi beklenir. Ancak kış aylarında dökülecek betonun hidrasyonunu yavaşlatıcı ve hidrasyon ısısını azaltıcı etki yaptıkları için donma-çözölme etkisine karşı hem taze halde hem sertleşmiş halde dayanıklılığın geç kazanılmasına sebep olabilirler. Yaz aylarında üretilen betonlarda rötre çatlaklarını azaltan cürufu çimentolar, ileriki mevsimlerden olan kış aylarında yapının su geçirimsizliğini artırarak geleneksel Portland çimentolarına göre daha iyi performans sergileyebilmektedirler.

Çimento tipi, S/Ç oranının 0,45'ten büyük olduğu betonlarda donma-çözölme dayanıklılığı açısından önemli bir faktör gibi gözükmemektedir (Marchand ve diğer., 1995). Ancak daha düşük S/Ç oranındaki betonlarda ince çimentoların daha iyi performans sergilediği söylenebilir (örneğin; Tip III'e karşı Tip I). Bu artış, daha geniş kritik hava aralığı faktöründen kaynaklanmaktadır (800'e karşı 250µm) (Schulson, 1998).

4.5.6 Donma Hızı

Soğutma / donma hızı bazı durumlarda etken bir faktördür. Örneğin, Pigeon vd.(1985) numuneler tamamen doymun durumdayken ($S/\dot{C}=0,5$) havada hızlı 300 adet donma - çözülme uygulamıştır (5 ila $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında). Buz hasarına direnç, donma hızının artmasıyla düşme eğilimindedir. Benzer şekilde Nischer (1976) 0,45 ve 0,75 S/\dot{C} 'ye sahip iki beton türünde soğutma hızının 2,4'ten 4,2 $^{\circ}\text{C/saat}$ 'e çıkarılması durumunda 25 donma-çözülme çevriminden sonra (-20°C 'ye kadar soğutma) tuzlardan kaynaklanan pullanmanın hızının arttığını göstermiştir. Diğer bir yandan numune tuz çözeltisinde çevrimlere tabi tutulduğunda donma hızının artmasının, bazen hasar hızını azaltabileceği söylenmiştir (Sellevold, 1988).

Fagerlund (1992), malzeme ile bulunduğu ortam arasında nem transferinin önlenmesi için sızdırmazlığının sağlandığı zaman donma hızının etkili bir faktör olmadığını ileri sürmüştür.

4.5.7 Minimum Sıcaklık

Beton içerisindeki tüm boşluk suları aynı anda donmamaktadır. Bu açıdan donma sırasında inilen minimum sıcaklık buz hasarı için önemli bir parametredir. Fakat farklı görüşler mevcuttur.

Marchand ve diğer., (1995), minimum sıcaklığın etken bir faktör olmadığını ileri sürmüştür. Diğer taraftan Pigeon ve Pleau (1995) sıcaklık düşükçe hasarın arttığını göstermiştir. Aslında bu fark çevrimin ne kadar hızlı yapıldığı ve dolayısıyla suyun donması için gerekli zamanın varlığıyla alakalıdır. Diğer bir değişle tüm kinetiklerin bu açıdan etkisi vardır.

4.5.8 Donmada Bekletilme Süresi

Bu faktör ile ilgili az çalışma mevcuttur. Bu süre uzadıkça hasarın arttığını işaret etmiştir. Bu faktör laboratuvar çalışmalarından ziyade arazide daha etkindir. Çünkü arazide daha uzun süreli ve daha yavaş bir soğuma mevcuttur. ASTM C-666 gibi hızlandırılmış testler arazi durumunu yansıtmadıkları için bu etkenden bağımsızlardır.

4.5.9 Kür Sıcaklığı

Kür sıcaklığı, yüksek performanslı ve nispeten düşük S/Ç oranına sahip betonlarda önemli bir etkidir. Bu tip betonlarda hidrasyonun erken safhalarında sıcaklık 80-90 °C'ye çıkabilmektedir (Sellevold ve diğer., 1994). Yapılan çalışmalara bakıldığında yüksek kür sıcaklığının daha düşük donma-çözülme dayanıklılığına sebep olduğu görülmektedir (Schulson, 1998). Örneğin suya doygun harçların (S/Ç=0,5) soğutma aşamasında (3,3 °C/saat hızda, -11°C minimum sıcaklığına kadar) 3 gün 50°C'de kurutulan örnekler göre 5 kat daha az buz oluşumuna izin verdikleri kalorimetre ile belirlenmiştir. Buna paralel olarak yine ön kurutma ve ardından tekrar doyurma işlemi uygulanan harçların 56 çevrim sonucunda kontrol harcına göre yaklaşık 18 kat fazla pullanmaya maruz kaldığı saptanmıştır. Yüzey pullanmasıyla ilgili benzer bir çalışmada 6 numunenin ortalama pullanmasına bakılmıştır (ASTM C-672'ye göre). 28 çevrim sonunda 65°C suda bir gün kür edilen betonun, geleneksel su küründe iki gün bekletilen betona göre 5 kat fazla pullanma yaptığı ($\approx 5 \text{ kg/m}^2$) gözlemlenmiştir. Cıva porozimetresi ile yapılan araştırmalarda sıcak su kürünün genel manada boşluk boyut dağılımında bir ufalmaya sebebiyet verdiği bilirse de bu hasar etkileri boşluk yapısındaki genişlemeye bağlanmıştır (Sellevold ve diğer., 1994; Schulson 1998).

4.5.10 Süperakışkanlaştırıcılar

Süperakışkanlaştırıcılar eklendikleri betonda işlenebilirliği ve su kesilmesine imkan tanıyarak dayanımı arttırmak için kullanılmaktadır. Genellikle sülfonat melamin formaldehit veya sülfonat naftalin formaldehit esaslıdır.

Donma - çözülme hasarına etkileri az gibi görünmektedir. Örneğin Pigeon ve Langlois (1991) ASTM C-666'ya göre yaptıkları deneylerde S/Ç oranı 0,5 olan silika dumanı içeren ve içermeyen iki farklı betonda süperakışkanlaştırıcıların kritik hava aralığı değerleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını görmüşlerdir. Thorpe vd.(1996) ise 60 farklı beton karışımı üzerine yaptığı benzer testlerde süperakışkanlaştırıcıların, iyi yerleşmiş hava kabarcığı sisteminden daha etkili olmadığı gözlemlenmiştir.

4.5.11 Mikrolifler

Buz hasarının doğrudan mikro-lif kullanılarak engellenmesi düşünülmeyen bir konudur (Pigeoun ve Pleau, 1995). Daha ziyade bu liflerin dayanım ve tokluk kandırma etkilerinden söz etmek lazımdır (Ouyang ve Shah, 1992; Banthia, 1992; Tjiptobroto ve Hansen, 1993; Mindess, 1994). Lifler hem yük taşıyıcı hem de gerilme köprüleyici özellik taşımaktadırlar. Yeterince ince olduklarında C-S-H matrisinin çatlak toleransını dahi arttırabilmektedirler (Schulson, 1998).

Mikro-lif olarak kullanıma aday malzemeler olan çelik ve karbon, araştırmalarda sıklıkla incelenmektedir. Maliyet açısından daha elverişli olarak doğal halde bulunan vollastonit (örneğin β -CaO-SiO₂) kullanılabilir. Bu Malzeme dış dolgusunda kullanılmakta olan fosfat çimentosunun gelişiminde kullanılmıştır (Bathnia ve Sheng, 1990). Low vd. (1992,1993,1994) mikro liflerin (%2-21 hacimde, 25 çap x 50-650 μ m) neredeyse Portland çimentosu (S/Ç=0,35) betonunun eğilme dayanımı ikiye katladığını ve tokluğunu önemli derecede arttırdığını rapor etmiştir. Silika dumanı ile kullanımda (çimento ağırlığının %10'u) vollastonit bu değerleri üç kattan fazlaya taşımıştır. Durabilitenin lif kullanılarak arttırılmasında lif boyunun çatlak boyutuyla ilintili olduğu belirtilmiştir. Kısa çatlaklar için uzun lifler, kısa liflere göre muazzam dayanım artışlarına fakat düşük tokluklara sebep olmaktadır (Budiansky ve Cui, 1995).

Pigeon (1996) tarafından çelik ve karbon mikro-lifli harçların donma dayanıklılığını incelemiştir. Çelik liflerin ve kısmen karbon liflerin donma-çözülme dayanıklılığını arttırdığı ve buz çözücü tuz etkisinde pullanmayı azalttıkları rapor edilmiştir. Mikro-liflerin bu etkisi hava sürüklenme davranışlarına dayandırılmıştır. Ancak hasar tam olarak engellenememiştir.

Mikro-lifler matris içinde donma sonucu oluşan parazit çekme gerilmelerine paralel konuşlanmaktadır. İlerleyen çevrimlerde şişmeyi kısıtlayıcı etki yarattıkları ve dağılmayı geciktirdikleri bilinmektedir (Atış ve Karahan, 2007; Nawy, 2001)

4.5.12 Genel Değerlendirme

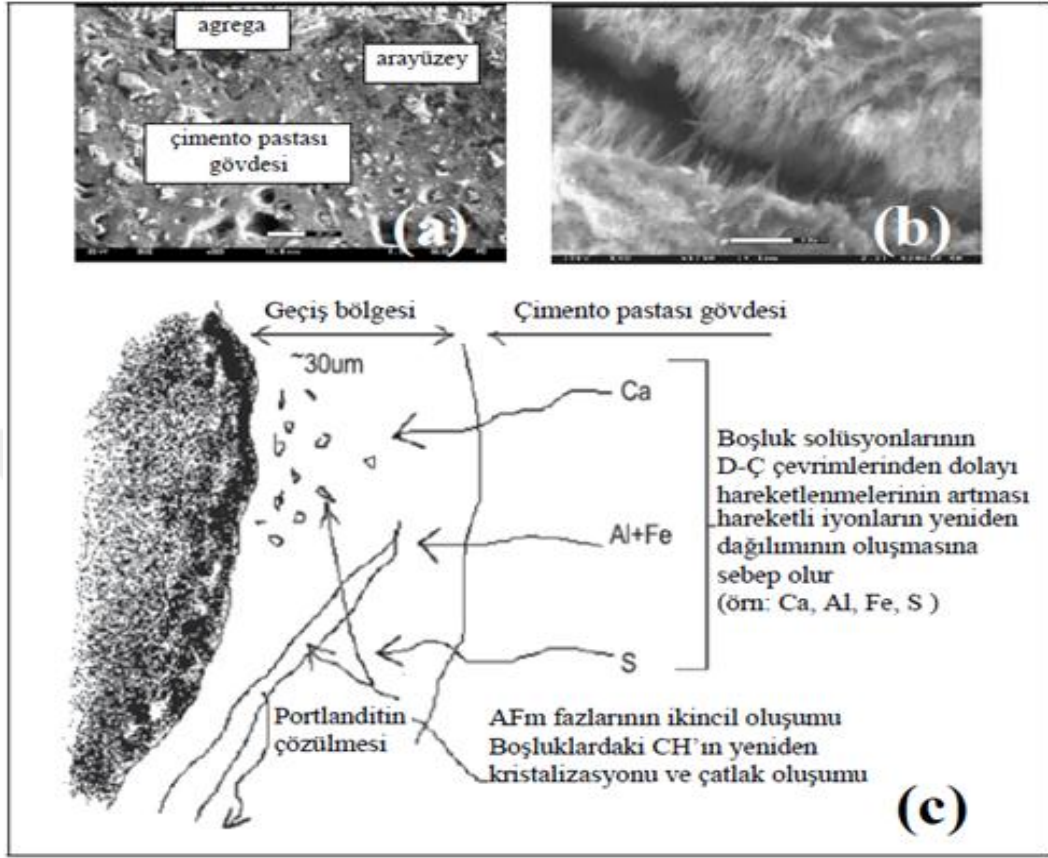
Birçok faktörün etkilediği D-Ç dayanıklılığı genel manada geçirimsizlik ve uygun hava boşluğu yapısı ile doğrudan ilintilidir. Buz hasarının tesirli olması için kritik doygunluk derecesi muhakkak bulunmalıdır. Kullanılan malzemelerin (örneğin agrega) dona dayanıklılığı matrisin geçirimsizliğine de bağlı olarak etkilidir. Mikro-lif halinde kullanılan çelik veya karbon lifler dağılmayı geciktirici etki yapmaktadırlar. Hava sürüklemenin etkisi ise halen kaçınılmaz gözükmektedir. Deneysel değişkenler (donma hızı, minimum sıcaklık, donma süresi vb.) saha betonunu değerlendirilmesinde çok önemli parametrelerdir. Uygulanan yüklerle beraber D-Ç hasarı daha fazla incelenmesi gereken bir konu gibi gözükmektedir. Lateks katkısının etkileri de incelenmesi gereken diğer bir konudur. Ayrıca donma süresi ve hızı, ayrıntılı biçimde incelenebilecek bir konudur.

4.6 Donma Hasarının İçyapı Etkileri

Elektron mikroskobu incelemeleri, civa porozimetresi incelemeleri, termal deneyler gibi kimya ve metalurji alanında sıklıkla kullanılan araştırma türleri beton endüstrisinde de yer buldukça karmaşık reaksiyonlar içeren ve heterojen yapıda olan bu mühendislik malzemesinin gizemleri çözülmeye başlamıştır. D-Ç hasarının oluşturduğu mikro çatlak gelişiminin sadece dayanıma olan etkisi değil, içyapıda yarattığı gerçek hasar net biçimde ortaya konulabilmektedir.

Cwirzen ve Pentalla (2004) çimento pastası – agrega ara yüzeyinin, yüksek performanslı silika dumanı betonunun donma dayanıklılığı üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada hava sürüklenmemiş sekiz adet (su/bağlayıcı oranları 0,3,0,35 ve 0,42 olan) değişik silika dumanı içeriklerinde betonları test etmişlerdir. Çalışmada ESEM-BSE, ESEM-EDX, civa porozimetresi analizleri yapılmıştır. Sonuçlar ara yüzey bölgesinin D-Ç hasar mekanizmasını başlattığı ve boşluk çözültisinin hareketi ile daha da hızlandığını göstermektedir. Ara yüzey bölgesinde öncelikle etrenjit dolu çatlakların olduğu saptanmıştır. İyi D-Ç performansı sergileyen betonların dar bir ara yüzey bölgesine sahip olduğu ve bu bölgedeki Ca/Si atomik oranının çimento pastası gövdesine göre daha düşük olduğu

saptanmıştır. Ortalama miktarda silika dumanının ikamesinin ara yüzey bölgesinin mikro yapısını sıkılaştırdığı görülmüştür (Şekil 4.8).



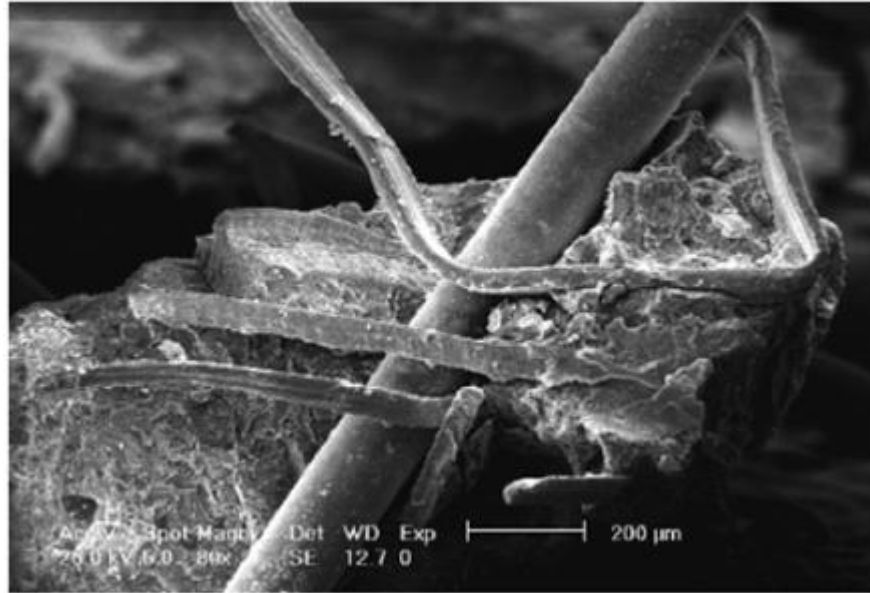
Şekil 4.8 Kapiler porozitenin yüksek olduğu 30 µm genişliğindeki çimento pastası – agrega arayüzeyi (a), 56 D-Ç çevrimi ve buz çözücü tuzların etkisindeki çatlağın iğnemi etrenjit yapısıyla dolması (b), geçiş bölgesinde D-Ç süresince oluşan hareketlilik (c) (Cwirzen ve Pentalla, 2004).

Jacobsen (1993)'in yaptığı bir çalışmada D-Ç etkisinde mikro yapıda çatlak oluşumu ve kendiliğinden iyileşme olgusu araştırılmıştır. Hava sürüklenmemiş, 0,40 su/bağlayıcı oranında %5 silika dumanlı beton ve kontrol betonu incelenmiştir. Rezonans frekansı ve basınç dayanımlarındaki değişimler gözlemlenmiştir. Dondurucu ortamdan çıkarılan beton kirişler üç ay su kürüne alınmışlardır. Bu süreçte rezonans frekansı değerlerinin büyük oranda toparlandığı ve basınç dayanımlarının az oranda iyileştiği görülmüştür. Kırık yüzey üzerinde SEI (Secendory Elecktron Images) fotoğraflarında, C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) türü hidratasyon ürünlerinin çeşitli yönlerden çatlağa transfer olduğu ve kendiliğinden

iyileşmeye sebep olduğu saptanmıştır. BSEI (Back Scattered Electron Images) fotoğrafları D-Ç çatlaklarının 1 – 10µm genişliğinde olduğunu göstermiştir.

Çatlaklar pastadan ilerleyip en geniş agregaların ara yüzeyini takip etmişlerdir. Araştırmacılar BSEI fotoğraflarıyla 5 µm'den dar çatlakların kendiliğinden iyileşme sonucu kapandığını saptamışlardır. Bu durumun en açık biçimde SEI'den BSEI moda geçildiğinde görüldüğünü ve çatlakların SEI modundan daha geniş görüldüğünü rapor etmişlerdir.

Parant vd. (2006)'nın geniş ölçekte lif takviyeli çimentolu kompozitlerin agresif çevresel etkiler ve servis yükü altındaki davranışını araştırdıkları çalışmada üç farklı uzunlukta çelik lif kullanılmış ve döşemelerin eğilme altında çoklu çatlak oluşumu ile sertleşme davranışı incelenmiştir. Beton döşemelere %5 sodyum klorür çözeltisi içerisinde 30 haftalık ıslanma – kuruma çevrimi yapılmıştır. Klorür etkisi ve servis yükleri altında lif kullanımıyla eğilme rijitliğinde yarı yarıya iyileşmenin mümkün olduğu, bu durumun yalancı elastik (pseudo-elastik) davranışın artışından kaynaklandığı belirtilmiştir. İyi bir matris – mikro lif sinerjisi ile mikro çatlakların yayılması bu durumu açıklamaktadır (Şekil 4,9).



Şekil 4.9 Yüksek performanslı çelik lifli çimentolu kompozitte makro çelik lifin, mikro lifler arasına gömülerek yarattığı sinerji (Parant ve diğer., 2006).

Bassuoni ve Nehdi (2008)'nin KYB'de sülfat etkisinin çevrimsel çevresel etkiler ve eğilme yüklemesi altındaki durabilite davranışını araştırdıkları çalışmada birçok SEM fotoğrafı çekilmiştir. Hava sürüklemenin, çelik (30 kg/m³) ve polipropilen (10 kg/m³) liflerin, sülfat saldırısı ve bunla birlikte D-Ç etkisine olan etkileri araştırılmış ve birçok puzolanlı beton kombinasyonu sınanmıştır. Araştırma sonuçlarında tüm KYB (30 – 55 MPa) örneklerinin çok sert çevresel etkiler altında kullanılabilir olduğu söylenmiştir. Ayrıca sodyum sülfat etkisinin eğilme altında oluşan çatlaklarla arttığı saptanmıştır. Bu durumun çözeltinin beton bünyesi içerisine daha kolay sızmasından kaynaklandığı rapor edilmiştir. Hava sürüklemenin donma – çözülme etkisi altında vazgeçilmez bir önlem olduğu vurgulanmıştır. İçyapı fotoğraflarında sürüklenmiş hava boşluğunun sülfat saldırısı ve tuz kristalizasyonu sonucu oluşan ürünlerin gelişimine ev sahipliği yaptığı yani iğnemi ya da yapraksı yapıların bu boşluklara dolduğu görülmüştür. Böylelikle hasarın düşürüldüğü belirtilmiştir. Çelik ve karbon liflerin harmanlanarak.

Yapılan çalışmalar değerlendirilecek olursa hava boşluklarının donma hasarını azalttığı, reaksiyon ürünleri yaratan sülfat ve tuz saldırısı gibi etkileri kristaller için kaçış alanı yaratarak sönmülediği söylenebilir. Ayrıca iri agrega – matris ara yüzeyindeki boşluklu yapının donma hasarına karşı zayıf olduğu ve çatlakların bu yüzden iri agregaların çevresini takip ettiği anlaşılmaktadır. Oluşan mikro çatlakların 1 – 10µm genişliğinde olduğu, çatlakların su kürü altında belirli bir kendiliğinden iyileşme kabiliyetinin olduğu ve 5µm kadar olan çatlakların kapanabildiği gözlemlenmiştir. Agrega – matris ara yüzeyine D-Ç çevrimleri sırasında boşluk suyundaki mobil iyonların taşındığı görülmüştür. Çelik liflerin gerek büzülme gerek D-Ç genleşmeleri sırasında oluşan çatlak ilerlemesinin azaltılması için uygun olduğu söylenebilir. Ancak korozyon etkisi eğilme performansını azaltıcı etki yapabilmektedir.

İçyapı incelemeleri büyük deneyim isteyen çok teknik incelemelerdir. D-Ç hasarı gibi net reaksiyon ürünleri yaratmayan bir durabilite sorununun elektron mikroskobu altında incelenmesi, numune hazırlanmasından alınacak fotoğraf karelerinin seçimine kadar tecrübe isteyen zor bir olaydır. Ancak görüldüğü üzere çatlak dağılımlarının ve hava boşluklarının incelenmesi bu hasar mekanizması hakkında büyük fikir vericidir.

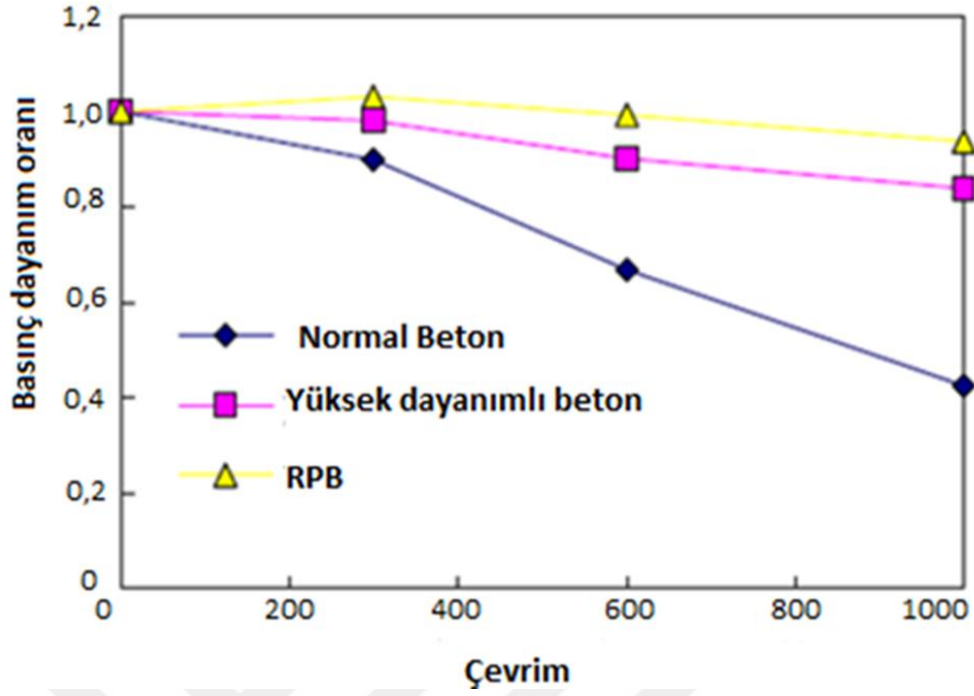
4.7 Reaktif Pudra Betonun D-Ç Dayanıklılığı

Reaktif pudra betonlar (RPB), tasarım felsefelerinde yüksek akıcılıktaki hamurun akışkanlaştırıcılar kullanılarak düşük su içeriklerinde üretilmesini barındırırlar. Bu durum normal betona göre D-Ç hasarına karşı bir avantajdır. Ayrıca vibrasyon ve yerleştirme işçiliklerinden kaynaklanan boşluklu yapının olmaması, daha sıkı ve homojen mikro yapıyı beraberinde getirmektedir. Ayrıca normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre RPB'nin limitli iri agrega içermesi, D-Ç hasarının agrega – matris ara yüzeyinde gelişmesi ihtimalini düşürmektedir. Tüm bu özellikleriyle RPB'den normal ve yüksek dayanımlı betonlarla kıyasla daha iyi D-Ç dayanıklılığı beklenebilir.

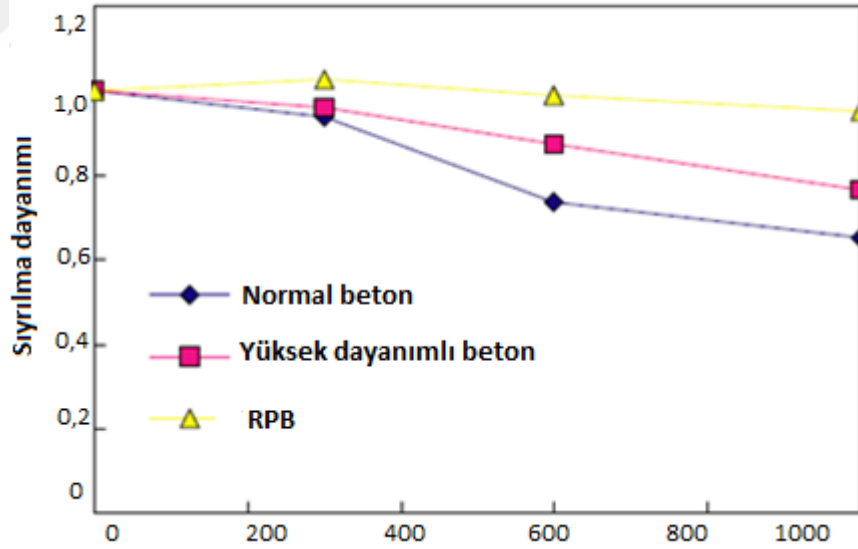
RPB'nin boşluksuz sıkı yapısı kimyasal ve çevresel etkilere karşı çok iyi bir performans göstermesine neden olmaktadır. Normal (RC) ve Yüksek dayanımlı betonlarla (HSC) karşılaştırıldığında RPB'nin D-Ç dayanıklılığı her koşulda üstün olmaktadır. Şekil 4.10'da RPB'ler Normal ve Yüksek dayanımlı betonlarla donma-çözülme özellikleri açısından karşılaştırılmıştır (Lee, 2007).

Yüksek dayanımlı betonların D-Ç etkisi altındaki dayanımlarının normal betonlara göre daha yüksek olduğu literatürden bilinmektedir. Bunun nedeni de Yüksek dayanımlı betonlardaki boşluk miktarının normal betona göre daha az olması ve yanı sıra daha geçirimsiz bir yapıya sahip olmasıdır.

RPB'de de D-Ç etkisi altında normal ve yüksek dayanımlı betonlara benzer davranış gözlenmiştir. D-Ç çevrim sayısının artmasıyla dayanımında düşüş görülmüştür. 300 çevrim sayısından sonra RPB'de de tıpkı normal ve yüksek dayanımlı betonda olduğu gibi dayanım kaybı görülmüştür. Ancak RPB'de, 600 ve 1000 çevrim deki dayanım kaybı normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre çok daha azdır. Diğer bir ifadeyle RPB'ler normal ve yüksek dayanımlı betonlara göre donma-çözülme etkisine karşı daha dayanıklıdır. Ayrıca RPB'lerin D-Ç etkisi altında olan bu davranış pull-out deneyi içinde geçerlidir (Şekil 4.11).



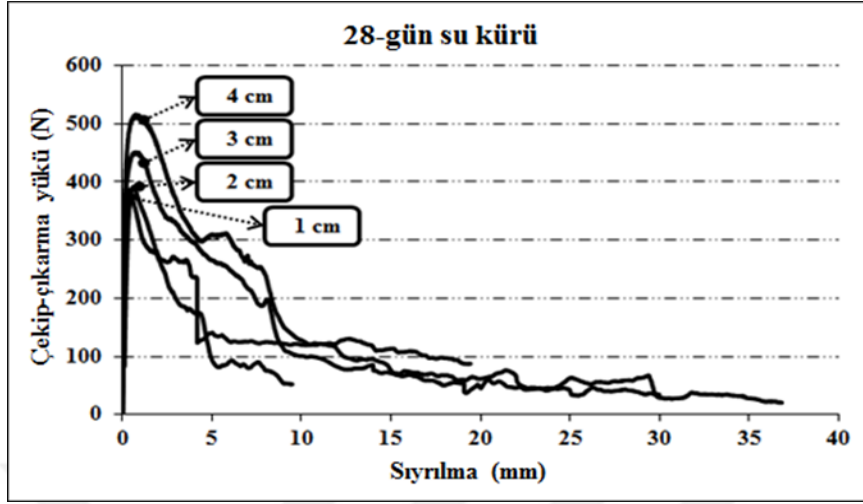
Şekil 4.10 Donma-çözülme çevrimi sonrası RPB'nin basınç dayanımının Normal beton ve Yüksek dayanımlı beton ile kıyaslanması (Lee, 2007)



Şekil 4.11 RPB ile çelik arasındaki aderansın HSM ve RC ile karşılaştırılması (Lee, 2007)

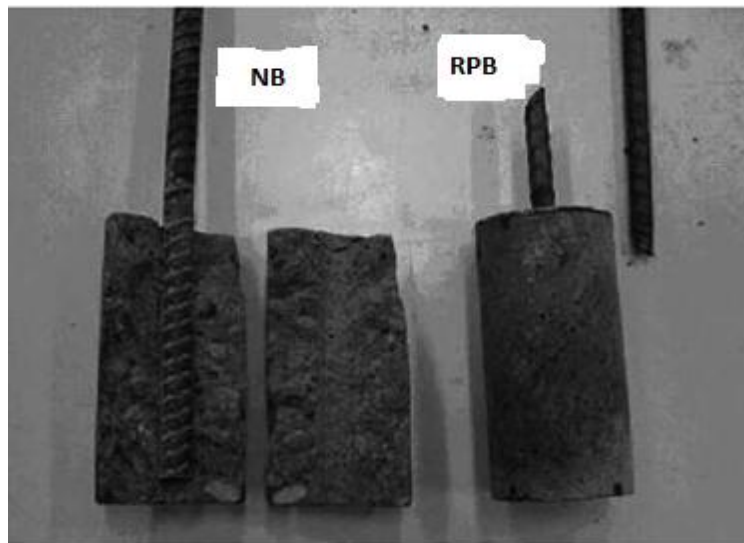
RPB matrisine gömülü liflerin aderansı normal harç karışımına göre daha üstün özelliklere sahiptir. . Düşük S/B, rijit iç yapı ve üstün mekanik özellikler daha güçlü lif-matris aderansına sebep olmaktadır. Ayrıca, silis dumanının varlığı diğer bir

olumlu etkendir. Şekil 4.12’de RPB karışımına değişik boylarda gömülü kancalı çelik liflerin yük-sıyırılma eğrileri yer almaktadır (Beglarigale, 2013).



Şekil 4.12 RPB karışımına farklı boylarda gömülü kancalı lifin yük-sıyırılma eğrileri (Beglarigale, 2013).

Şekil 4.13’ te yapılan toplam 1000 çevrim donma-çözölmeye maruz kalmış RPB ile Normal beton (NB) arasındaki Pull-Out (betonla donatı arasındaki aderansı göstermek amacıyla yapılan deney) deney sonucuna ilişkin görseller verilmiştir. Bu kıyaslamaların sonucunda, pull-out deneyine maruz kalan normal beton hasar görmüş fakat RPB üzerine yapılan pull-out deneyinde, betonda herhangi bir hasar meydana gelmemiş, çekilen donatı iki parçaya ayrılmıştır (Lee, 2007).



Şekil 4.13 RPB ile çelik arasındaki aderansın NB ve RPB ile karşılaştırılması (Lee, 2007)

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMA

Reaktif pudra betonu, bazı değişik malzemelerin kullanımı ve yeni üretim tekniklerin uygulanmasıyla geliştirilmiş yüksek dayanıklılık özelliklerine sahip olan özel bir beton türüdür. Değişik türdeki yapılarda kullanılmakta olan reaktif Pudra betonu, hizmet süresi boyunca, bünyesinde yıpranmaya yol açabilecek birçok kimyasal veya fiziksel etkenle karşılaşmaktadır. Bu etkenler, doğa koşullarından, veya betonun kullandığı ortamdan kaynaklanmaktadır. Büzülme ve donma-çözülme gibi olaylar RPB'nin yıpranmasına yol açacak nitelikteki fiziksel olaylardır.

Bu deneysel çalışmada hiper akışkanlaştırıcı katkı, çimento, uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, silis dumanı, çelik lifler ve kuvars agregalar kullanılmıştır. Bu dökümlerde kullanılan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

5.1 Amaç

Bu çalışma 110M691 numaralı ve "Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Boyutsal Kararlılığının İncelenmesi Ve Boyutsal Kararlılığın Durabilite Özelliklerine Etkisinin Araştırılması" başlıklı TÜBİTAK 1001 araştırma projesinin bir bölümü olup, proje çalışmalarında çok sayıda deneysel çalışma yapılmış, seçilen karışımların donma-çözülme dayanıklılığı bu tez kapsamında incelenmiştir. Tezin amacı; yerel kaynaklarla üretilecek 100 MPa'dan yüksek hamur fazı basınç dayanımına sahip, liflerle birlikte 150 – 200 MPa dayanım sınıfında üretilecek Reaktif Pudra Betonunun (RPB) mekanik özelliklerinin ve büzülme ile oluşan çatlakların donma-çözülme koşullarına dayanıklılığına etkisinin araştırılmasıdır.

Performansa dayalı tasarım kapsamında bu tezde literatürden farklı olarak mekanik ve durabilite özelliklerinin ikisinin bir arada ve etkileşimli olarak

araştırılması planlanmıştır. Böylelikle büzülme çatlaklarının RPB’de mekanik özelliklere ve durabiliteye etkisi tespit edilmiş olacaktır.

5.2 RPB Karışımlarında Kullanılan Malzemeler

5.2.1 Çimento

Çalışmada Denizli Çimento ticari markasına ait CEM-I 42,5 R tipi hızlı dayanım kazanan normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Kullanılan çimentonun fiziksel kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal özellikler		Fiziksel özellikler	
SiO ₂ (%)	19,1	Özgül yüzey (Blaine) (m ² /kg)	369
Al ₂ O ₃ (%)	4,40	Priz başlangıcı (dk)	110
Fe ₂ O ₃ (%)	3,96	Priz sona ermesi (dk)	166
CaO (%)	61,85	Hacim Genleşmesi (mm)	1,00
MgO (%)	2,05		
Na ₂ O (%)	0,27		
K ₂ O (%)	0,70	Basınç Dayanımı	
SO ₃ (%)	3,72	2 günlük (MPa)	27,1
Cl (%)	0,0004	7 günlük (MPa)	43,3
Kızdırma kaybı (%)	1,82	28 günlük (MPa)	56,0

5.2.2 Uçucu Kül

Bu çalışmada çimento yerine %30 miktarında ikame edilen uçucu küller Soma B Termik Santralinden temin edilmiş C sınıfı uçucu küllerdir. Bu küllerin temin edildiği firmadan alınan kimyasal analizler Tablo 5.2’de verilmiştir. Karışıma katılmadan, uçucu küller 0,25 mm’lik elekten yeniden elenmiş, içinde değişkenlik oluşturacak taş parçası, toprak ve bitkisel artıklardan temizlenmiştir.

Tablo 5.2 Bu çalışmada kullanılan uçucu külün fiziksel kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO ₂	47,15
Al ₂ O ₃	20,42
Fe ₂ O ₃	4,15
CaO	20,47
MgO	1,51
Na ₂ O	0,59
K ₂ O	1,36
SO ₃	2,08
SO ₄	-
Cl-	0,015
Serbest CaO	1,2
Özgül yüzey cm ² /g	2922
28. gün puz. aktivite	83

5.2.3 Silis Dumanı

Çalışmada BASF ticari markasına ait MEYCO MS 610 adlı silis dumanı kullanılmıştır ve kimyasal özellikleri Tablo 5.3 'te verilmiştir.

Tablo 5.3 Kullanılan mikro silisin teknik özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO ₂	85
SO ₃	2
CaO	1
Cl-	0,1
İncelik	15000 (m ² /kg)
Özgül yüzey cm ² /g	2300
28. gün puz. aktivite	95
Malzemenin Yapısı	Yoğunlaştırılmış Mikrosilika
Birim hacim ağırlık	0,55 – 0,70 kg/litre
Renk	Gri

5.2.4 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Bu çalışmada %50 çimento yerine ikame edilen öğütülmüş yüksek fırın cürufu Adana Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Kullanılan cürufun üretici firma tarafından temin edilen kimyasal analizleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (YFC) kimyasal analizi

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO ₂	39,32
Al ₂ O ₃	9,36
Fe ₂ O ₃	0,90
CaO	36,61
MgO	6,38
Na ₂ O	-
K ₂ O	-
SO ₃	0,16
SO ₄	0,19
Cl-	0,013
Özgül yüzey m ² /kg	5990

5.2.5 Agregası

Agregası içerisinde bulunan zararlı iyonlar (klor ve sülfat iyonları), kil toprakları, organik maddeler, beton dayanımını ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkilediğinden bu çalışmada kullanılan agregalar temiz şekilde paketlerde temin edilmiş, yabancı maddelerden ve nemden korunmuş, laboratuvar koşullarında özel olarak saklanmıştır.

Bu çalışmada, dört (4) farklı granülometride (0– 400 µm ; 0,60 mm - 1,2 mm; 1mm – 3mm ; 5 mm- 8mm) paketlenmiş kuvars agregası kullanılmıştır. Kuvars Pomza Export firmasının kuvars tesislerinden temin edilmiştir.

Bu deneysel çalışmada kullanılan kuvars agregasının, Pomza Export firmasından alınan teknik özellikleri ve kimyasal analiz değerleri Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.5 Kuvars agregasının kimyasal analizi

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO ₂	99,79
Al ₂ O ₃	0,06
Fe ₂ O ₃	0,02
CaO	0,02
MgO	0,01
Na ₂ O	0,02
K ₂ O	0,01
SO ₃	-
Cl-	-

5.2.6 Hiperakışkanlaştırıcı Katkı

Bu çalışmada BASF firmasının Polikarboksilat bazlı Glenium- ACE30 ticari isimli bir hiperakışkanlaştırıcı katkısı kullanılmıştır. Kullanılan katkı, polikarboksilik eter esaslı ve yüksek oranda su azaltan beton katkı malzemesidir. Bu katkıların bazı özellikleri Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6 Glenium ACE 30 katkısının teknik özellikleri

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,045-1,085 kg/litre
Klor içeriği %(EN480-10)	<0,1
Alkali içeriği %(EN 480-12)	<3

5.2.7 Karışım Suyu

Bu çalışmada Karışım suyu olarak içilebilir nitelikteki İzmir'in Buca ilçesi şebeke suyu kullanılmıştır (TS EN 1008'e uygun).

5.2.8 Mikro Lifler

RPB'nin mekanik özelliklerine, taze hal ve büzülme özelliklerine lif hacminin etkisini araştırmak için bu tür kompozitlerde sıklıkla kullanılan, %2 hacminde mikro çelik lif takviyesi yapılmıştır. Bekaert İzmit A.Ş.'den temin edilen mikro çelik lifler 6 mm uzunluğa, 0,16 mm çapa sahip pirinç kaplı liflerdir. Liflerin narinliği (boy/çap oranı) 37,5'tir. Çekme dayanımları 2000 MPa, özgül ağırlıkları 7,17'dir.

5.3 Karışım Oranları –Taze Hal Özellikleri

Karıştırma için düşey eksenli, yüksek hızda karıştırma yapabilen bir karıştırıcı kullanılmıştır (Hobart Mikser) . Karıştırıcıda önce kuru malzemeler katılmakta, ardından su ile katkının 1/4'ü katılmakta, tamamen ıslanan taneler oluşunca kalan katkı ilave edilmektedir. Karıştırma süreci geleneksel harçlara göre uzun olup, 15 dakikayı aşmaktadır. Kimyasal katkının etkinliğinden maksimum faydalanabilmek için uzun süreli karıştırma süreleri gerektiği görülmektedir. Kullanılan karıştırıcı Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Karıştırıcı (Hobart Mikser)

5.3.1 Puzolan İkamesinin Araştırılması

Bu çalışmada kullanılan karışım oranları seçilmiş karışımları göstermekte olup karışımlarla ilgili çok sayıda çalışma 110M691 numaralı ve "Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Boyutsal Kararlılığının İncelenmesi Ve Boyutsal Kararlılığın Durabilite Özelliklerine Etkisinin Araştırılması" başlıklı proje çalışmalarında belirlenmiştir. Seçilen karışımlar bu çalışmada kullanılmıştır.

DeneySEL çalışmada %2 lif içeren İ50-F2 karışımına %50 öğütölmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ve %30 uçucu kül (UK) ikamesi yapılarak elde edilen 3 karışım üzerinde işlenebilirlik, donma-çözölme ve mekanik özellik deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadaki amaç YFC ve UK ikamesinin nihai RPB ürünlerindeki D-Ç davranışının belirlenmesidir. UK ve YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri hamur taramasının yapıldığı önceki bölümlerde sunulmuştur. Tablo 5.6'de karışım oranları verilmektedir. Çalışmaya konu olan karışımlar, seçilmiş irileştirilmiş gradasyona sahip (maksimum dane çapı 8 mm olan), hacimce %45 agrega (%55 hamur) ve %2 mikro çelik lif içeren, toplam bağlayıcı ağırlığına %20 Silis Dumanı ikamesi yapılmış olan karışımlardır. Lifsiz karışımların oranlarıda Tablo 5.7'de sunulmaktadır.

Tablo 5.6 Karışım oranları lifliler - (F2)

Bileşen (kg/m ³)	Karışımlar		
	İ50-F2	YFC50-İ50-F2	UK30-İ50-F2
Su	182	183	171
Çimento	729	365	480
Silis dumanı	182	183	171
Yüksek fırın cürufu	-	365	-
Uçucu kül	-	-	206
5 – 8 mm kuvars	230	230	230
1 – 3 mm kuvars	230	230	230
0,5 – 1 mm kuvars	380	380	380
0 – 0,4 mm kuvars	310	310	310
Mikro çelik lif	143,4	143,4	143,4
Akışkanlaştırıcı (ACE30)	27	17	33
Tasarım Özellikleri			
Mikro çelik lif hacmi (%)	2	2	2
Agrega hacmi (%)*	45	45	45
Hamur hacmi (%)	55	55	55
Su /Çimento	0,25	0,50	0,36
Su / Çimento**	0,27	0,52	0,39
Su/Bağlayıcı	0,20	0,20	0,20
Su/Bağlayıcı**	0,22	0,21	0,22

*Lifler agrega hacmine dahil edilmiştir. ** Katkıdan gelen su ile.

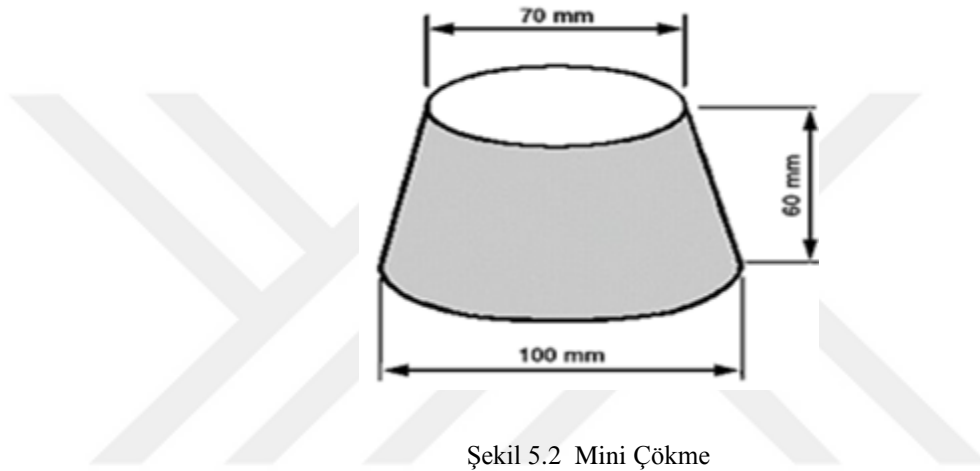
Tablo 5.7 Karışım oranları (lifsizler) –(F0)

Bileşen (kg/m ³)	Karışımlar		
	İ50-F0	YFC50-İ50-F0	UK30-İ50-F0
Su	182	183	171
Çimento	729	365	480
Silis dumanı	182	183	171
Yüksek fırın cürufu	-	365	-
Uçucu kül	-	-	206
5 – 8 mm kuvars	241	241	241
1 – 3 mm kuvars	241	241	241
0,5 – 1 mm kuvars	397	397	397
0 – 0,4 mm kuvars	324	324	324
Mikro çelik lif	0	0	0
Akışkanlaştırıcı (ACE30)	27	17	33
Tasarım Özellikleri			
Mikro çelik lif hacmi (%)	0	0	0
Agrega hacmi (%)*	45	45	45
Hamur hacmi (%)	55	55	55
Su /Çimento	0,25	0,50	0,36
Su / Çimento**	0,27	0,52	0,39
Su/Bağlayıcı	0,20	0,20	0,20
Su/Bağlayıcı**	0,22	0,21	0,22

5.4 Taze Hal

5.4.1 Karıştırma Prosedürü ve İşlenebilirlik deneyleri

Taze hamurun ve döküm ortamının sıcaklığı not edildikten sonra kendiliğinden yayılma çapı tespit edilmiştir (Şekil 5.2). Şekil 5.3'te kendiliğinden yerleşen hamur görüntüsü ve yayılma şekli sunulmaktadır.

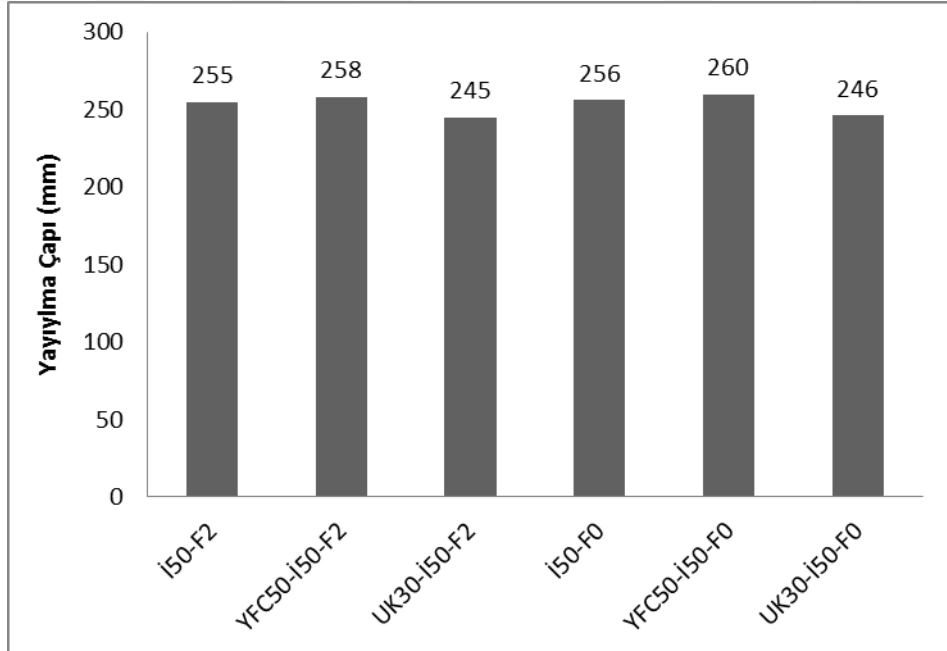


Şekil 5.2 Mini Çökme

Şekil 5.4'da karışımların kendiliğinden yayılma çapı değerleri sunulmaktadır. Hamur fazı aynı yayılma çapına sahip hamurlara agrega ilavesi ve lif takviyesi sonucu yayılma çapları az da olsa değişmiştir. YFC ikamesi hamur deneylerinde katkı ihtiyacını önemli oranda düşürürken, UK ikamesi arttırmıştır. RPB kullanımında ise aynı yayılma çaplı, farklı viskoziteye sahip bu karışımlardan viskozitesi yüksek olan UK30 karışımının yayılma çapını 10 mm düşürdüğü, YFC50 karışımının ise 3 mm arttırdığı görülmektedir. Viskozitesi artan karışımda agregalar – lif – akıcı hamur arasındaki etkileşimin arttığı söylenebilir. Genel bir değerlendirme olarak tüm karışımlar kendiliğinden yerleşirken ayrılmaya uğramamışlardır. Ancak UK içeren karışımın yüksek katkı ihtiyacının yanında ayrışma direncinin de yüksek olduğu söylenebilir. Tüm karışımlar sıkışık havanın atılması adına kalıplara yerleştirilirken 10 saniye vibre edilmiştir.



Şekil 5.3 Kendiliğinden yerleşen RPB hamur görüntüsü



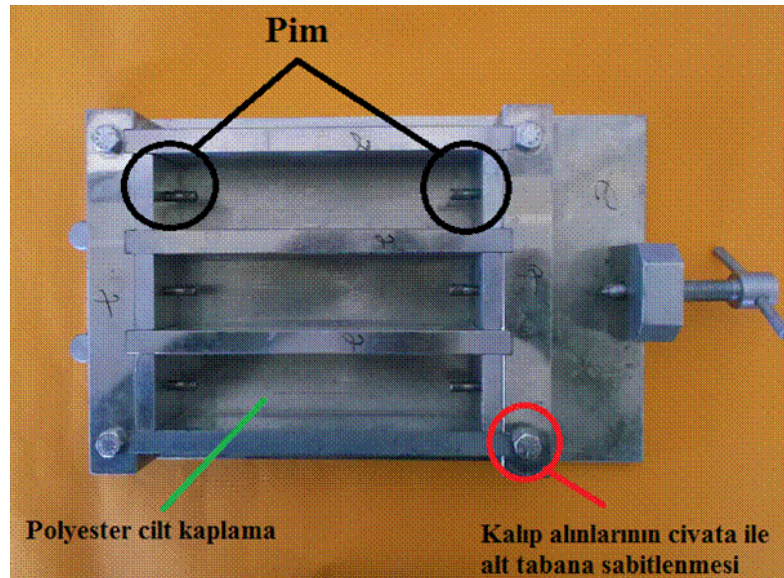
Şekil 5.4 UK ve YFC ikamesinin yayılma çapına etkisi

5.6 Kısıtlanmış Durumda Çatlak Oluşturma Denemeleri ve Durabilite Çalışmaları

Tez kapsamında seçilmiş agrega fazına, lif içeriğine ve puzolan ikame oranına sahip 6 ana karışımda (İ50-F2, UK30-İ50-F2, YFC50-İ50-F2 , İ50-F0, UK30-İ50-F0, YFC50-İ50-F0) kısıtlanmış büzülme çatlakları oluşturulması planlanmıştır. Erken dönem kuruma koşullarında (30 °C, %50 BN) kısıtlanmış halde oluşacak büzülme kaynaklı çatlakların durabiliteye muhtemel etkisinin araştırılması için bir dizi deneme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

5.6.1 Kısıtlayıcı Kalıp Sistemi

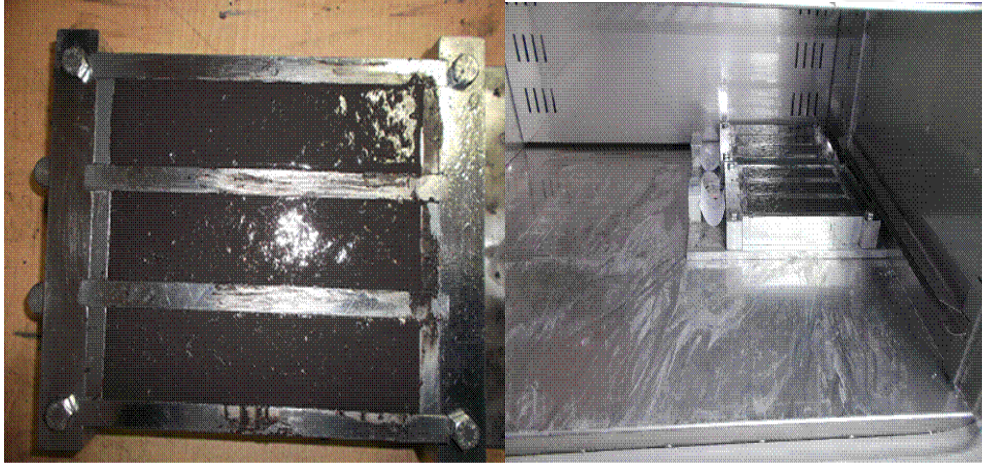
Kısıtlayıcı kalıp sistemi 40x40x170 mm iç hacimli, aksel yönde numuneyi kısıtlamaya çalışan bir tasarıma sahiptir (Şekil 5.5). Kalıplarda kısıtlama etkisinin yalnızca aksel yönde oluşması için kalıp iç yüzeyleri polyester cilt ile kaplanmış ve yağlanmıştır. Kalıp alın parçalarının alt tabana civatalar ile sabitlenmesiyle çekme etkisinde hareket etmemesi sağlanmıştır. Kalıp alınlarının merkezinde büzülme kısıtlayıcı etki yaratmak üzere vidalı pimler mevcuttur. Nem sıcaklığı kontrol etmek için iklim kabini kullanılmıştır (Şekil 5.6). Numuneler 40x170 mm'lik üst yüzeyden döküm anından itibaren iklim kabini içinde kurumaya maruz bırakılmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.5 Büzülme kısıtlayıcı kalıp



Şekil 5.6 İklim kabini (Nem ve sıcaklık kontrollü)



Şekil 5.7 Taze RPB'nin iklim kabinine yerleştirilmesi

5.6.2 Durabilite Çalışmaları

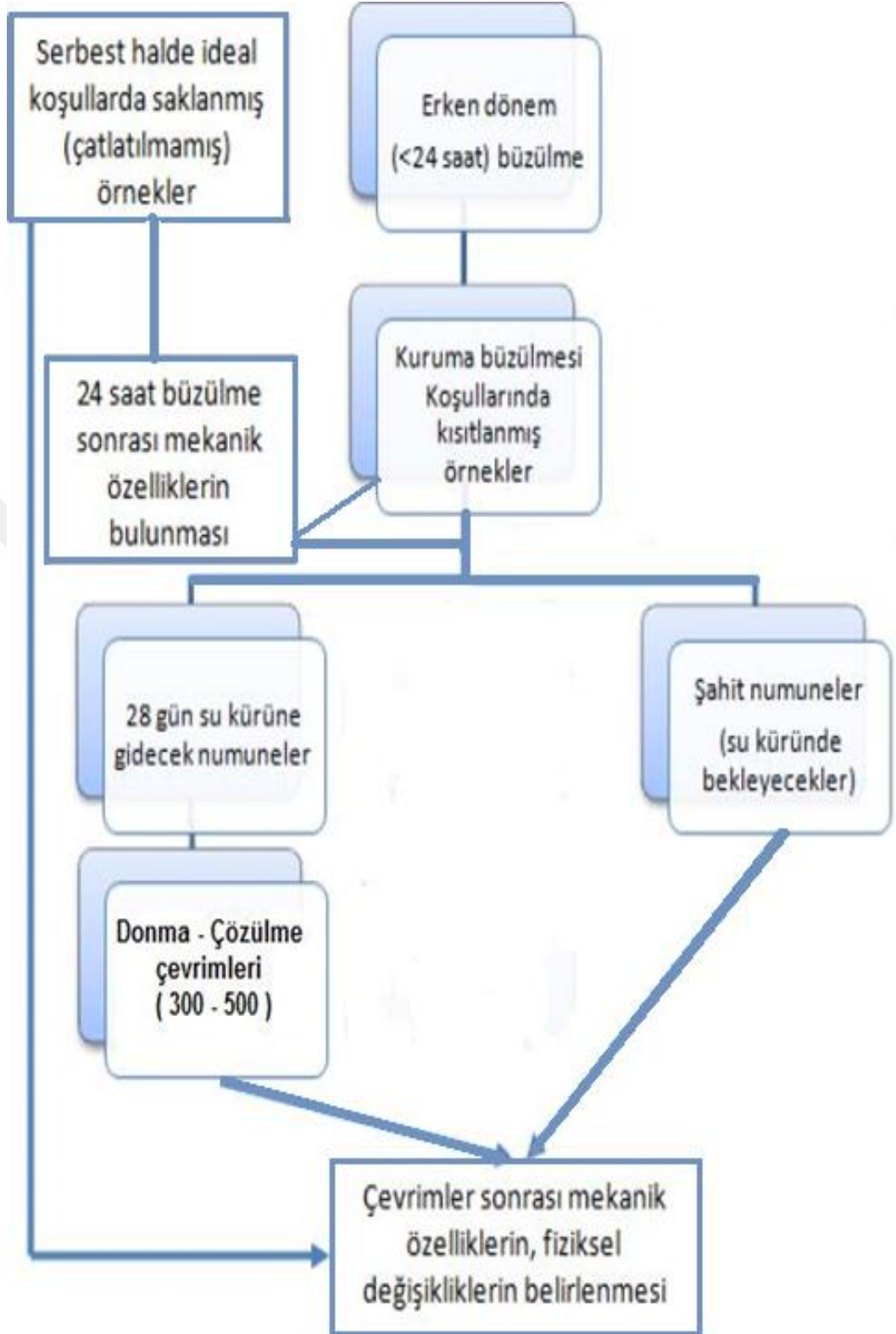
Durabilite araştırmasındaki amaç büzülme çatlaklarının RPB'ler üzerindeki etkisini anlamaktır. Büyük ölçekli iklimlendirilmiş kabinlerde büzülmeye maruz bırakılan numuneler ile kontrol numuneleri çevresel sert koşul çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Örneğin ilk 24 saatte oluşan kuruma/otojen büzülme çatlaklarının donma-çözülme etkisi tespit edilmiştir.

Kıyaslama için serbest kalıplarda dökülmüş olan (S), 40x40x160 mm prizmatik numunelerden her bir karışım için ikişer adet alınmış, ilk 24 saat neme doygun ve $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklığı olan ortamda kalıp içinde bekletilmiştir. Dökümden 24 saat sonra kalıp alınarak 28 gün boyunca su kürü uygulanmıştır.

Kısıtlanmış kalıplarda dökülmüş olan (K), 40x40x170 mm prizmatik numuneler, ilk 24 saat iklim kabininde $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve $\%60\pm 5$ bağıl nemli (BN) büzülme ortamına bırakılmışlardır. Dökümden 24 saat sonra kalıp alınarak 28 gün boyunca su kürü uygulanmıştır.

5.7 Donma-Çözülme Etkisinin Araştırılması

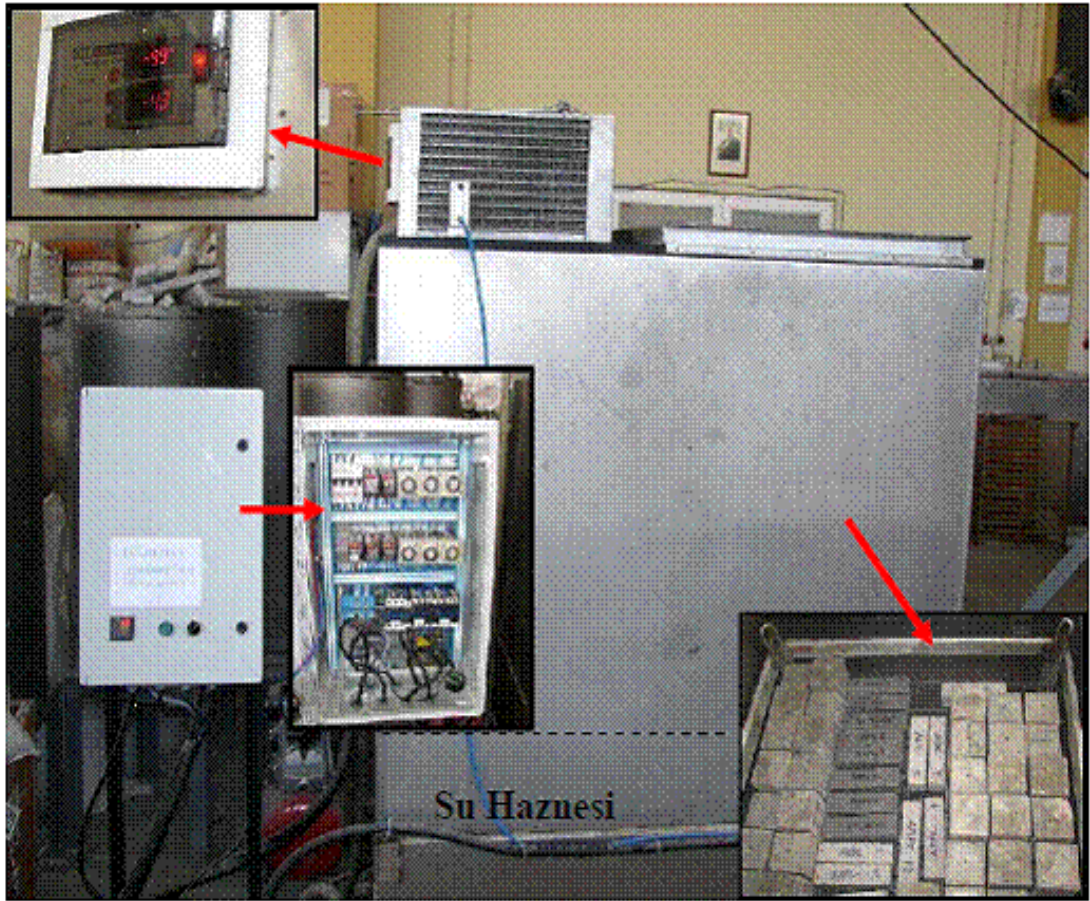
Bu aşamada seçilen RPB-F0 ve RPB-F2 karışımlarda kısıtlanmış büzülme etkisi sonucu oluşan çatlakların donma-çözülme dayanıklılıkları ve mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. Büzülme açısından risk teşkil eden ve deneylerden elde edilen bilgiler ışığında seçilmiş RPB karışımlarının performans farkının araştırılması düşünülmektedir. UK ve YFC katkılı numunelerin salt çimentolu karışımlardan farkı ortaya konulmuştur. Bu aşamada kısıtlanmış halde büzülme ortamında bekletilmiş örnekler donma-çözülmeye maruz bırakılmıştır. Ayrıca eşlenik numuneler olmak üzere bir kısım büzülme geçirmiş örnekler su kürüne bırakılacaklardır. Çevrimler sonrası donma-çözülme çevrimlerinin etkileri çevrim geçirmemiş numuneler ile kıyaslamalı olarak araştırılmıştır. Anlatılan çalışmanın ön görülen akış şeması aşağıda sunulmaktadır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 D-Ç çalışmanın ön görülen akış şeması

Kısıtlanmış ve serbest numuneler tez önerisinde belirtilen koşullardan geçtikten sonra donma – çözülme (D-Ç) çevrimlerine sokulmuştur. Bunların kontrol grupları olarak ideal koşullarda kür edilmiş numunelerin sözü edilen koşullara dayanıklılığı araştırılmıştır.

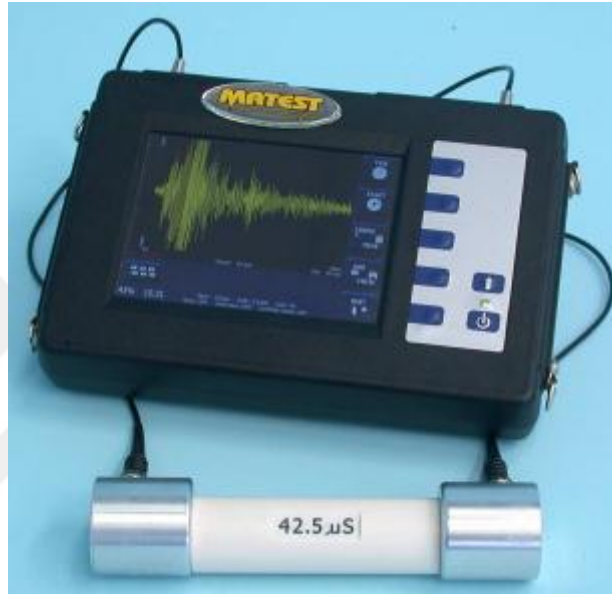
Şekil 5.9’da D-Ç kabini gösterilmektedir. Tez kapsamında havada dondurma, suda çözme yaklaşımı kullanılmıştır. Büzülme çatlakları içeren numunelerde hasar oluşup oluşmayacağı, oluşan hasarın büzülme çatlaklarıyla olan ilişkisinin araştırılması yapılmıştır (Deneyler ASTM’ C-666 'e uygun).



Şekil 5.9 Donma – çözülme kabini

Bu bölümde Serbest (S) ve Kısıtlanmış (K) örneklerine uygulanan 300 ve 500 donma – çözülme (D-Ç) çevrimi sonrası mekanik özelliklerdeki değişimler incelenmektedir.

Örneklere D-Ç çevrimine kadar 28 gün su kürü uygulanmıştır. Su kürünün ardından çevrimler başlamıştır. Çevrimlere giriş dayanımları, kırılma enerjileri ve elastisite modülleri ile çevrim sonrası değerleri bulunmuştur. Deney uygulama metotları çevrim sayısına bağlı mekanik incelemelerde kullanılanlardır. Çevrimler sürerken ultrases geçiş hızları (UPV) takip edilmiştir. Şekil 5.10'da ultrases test cihazı gösterilmektedir.



Şekil 5.10 Ultrases test cihazı

300 çevrimler 80 gün ve 500 çevrim 120 gün sonra tamamlanmıştır. Ardından bu güne kadar suda bekleyen eşlenik numuneler ve 300 ila 500 çevrim geçirmiş numuneler mekanik performans açısından kıyaslanmıştır.

5.8 Deney Metotları

Tüm karışımlara su kürü uygulanmıştır. Üç noktalı eğilme yüklemesi altında lifli kompozitlerin yük – sehim eğrileri elde edilmiştir. Yükleme hızı lifli numuneler için 0,2 mm/dakika, lifsiz numuneler için 0,02 mm/dakikadır.

Mesnet açıklığı 130 mm'dir. Eğilme sonrası çıkan iki parçaya 240 kgf/saniye hızla basınç deneyi yapılmıştır. Deneylerde 40x40x160 mm (Serbest) ve 40x40x170 mm(Kısıtlanmış) prizmatik numuneler kullanılmıştır.

Deney cihazı Şekil 5.11'de gösterilmektedir. Yükleme 10 ton kapasiteli yük hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında numune alt yüzü ortasına yerleştirilmiş kodlayıcıdan alınan sehim değerleri ve yükler anlık olarak bilgisayara kaydedilmiştir. Lifli numuneler için yük 0 – 5 kg'a inene dek, lifsiz numuneler içinse kırılma anına kadar yükleme yapılmıştır. Lifsiz numuneler tepe yükü sonrası kuyruk oluşumu sergilememiş, gevrek ve ani kırılmıştır.

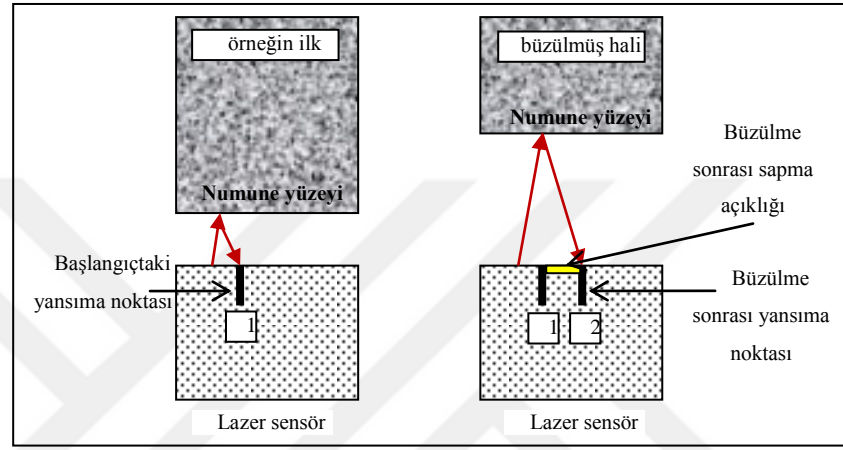


Şekil 5.11 Deplasman kontrollü kapalı devre eğilme test cihazı

BÖLÜM ALTI

RPB'NİN ERKEN YAŞ BÜZÜLME DAVRANIŞI

Çimentolu matrislerin erken yaş büzülme ölçümlerinde kullanılan yöntem lazer ölçüm sistemidir. Henüz erken dönemde plastik halde bulunan matrise dışarıdan deforme edici bir kuvvet uygulamadan ölçmek için lazer ile mesafe ölçümü mantığı kullanılabilir (Şekil 6.1).

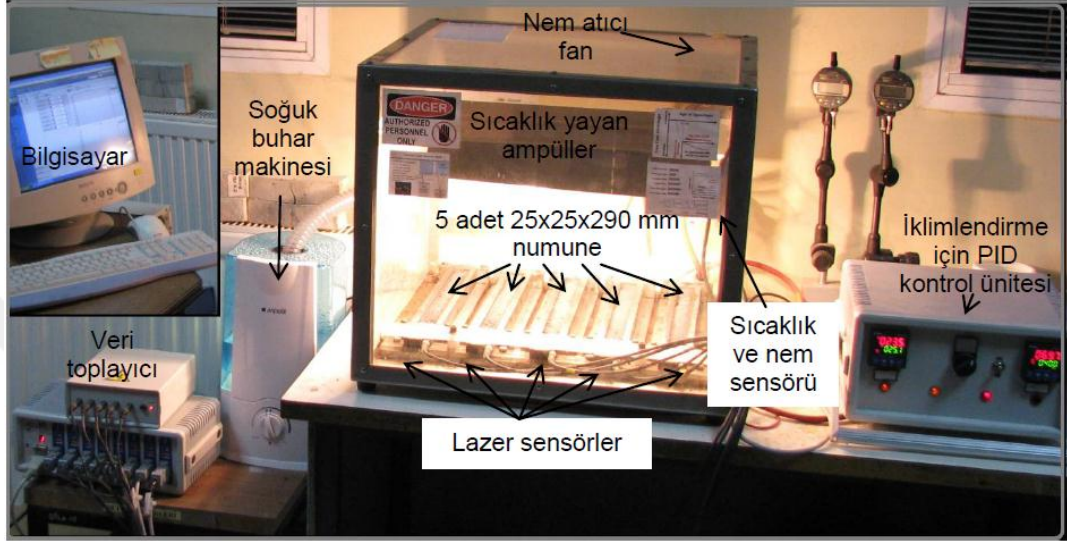


Şekil 6.1 Lazer sensör ile büzülme ölçümünün mantığı

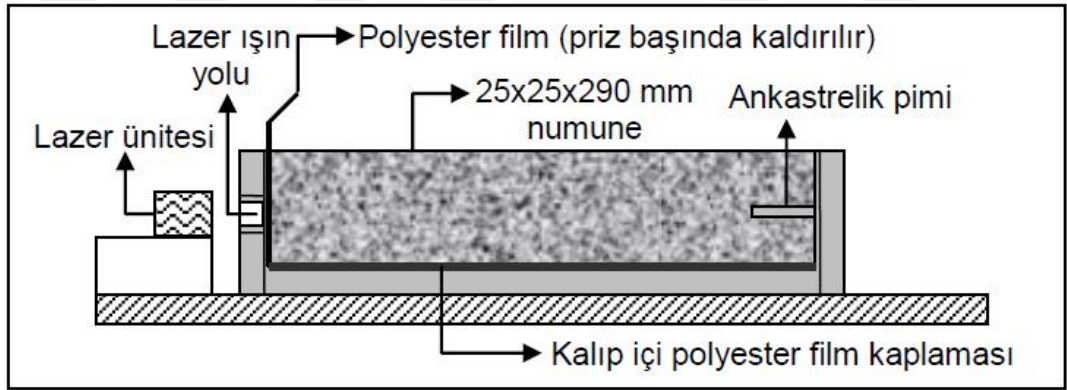
Deney düzeneğinde Baumer marka lazer ölçüm sensörleri kullanılmıştır. Sistemin bulunduğu kapalı kabin içerisinde bulunan koşulları kaydetmek üzere bağıl nem ve sıcaklık ölçerler bulunmaktadır. Elverişsiz yüksek sıcaklık ve düşük nem koşullarını sağlamak amacı ile ısı yayan ampuller, soğuk buhar ünitesi ve nem atıcı fan sistemi bulunmaktadır. Veri toplayıcı ile eş zamanlı bilgisayara kayıt yapılmıştır. PID kontrol ünitesi ile kabin içerisinde istenilen iklim koşulları elde edilebilmektedir.

Çalışmalarda kullanılan erken yaş büzülme ölçüm kabininde aynı anda 5 adet numune (25x25x290 mm) test edilmiş, değerlendirmeler beş numunenin ortalama büzülme eğrileri kullanılarak yapılmıştır. Tek yönden ölçüm yapılmıştır. Bir ucu bir pim ile ankastrelenmiş numuneler kullanılmıştır. Böylelikle diferansiyel değişimlerin elimine edilip toplam bir büzülme değeri elde edilmesi amaçlanmıştır. Çelik kalıpların lazere bakan yüzünde lazer ışınlarının numune yüzeyine çarpıp geri dönebileceği kadar bir boşluk bırakılmıştır. Bu boşluk plastik bir kapı vasıtasıyla döküm esnasında kapatılmıştır. Plastik film, numunenin priz başlangıcında

kaldırılmıştır ve ölçümler bu andan itibaren alınmıştır. Ayrıca çelik kalıpların içi, büzülme sırasında sürtünme derecesini azaltmak üzere pürüzsüz polyester film tabakası ile kaplanmış ve kalıp yağı ile yağlanmıştır. Kullanılan sistem ve büzülme kalıpları Şekil 6.2’de, büzülme kalıplarının ayrıntıları Şekil 6.3’te gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Erken yaş büzülme test kabini



Şekil 6.3 Erken yaş büzülme kalıbı

Erken yaş bünyesel büzülme deneylerinde kabin iklim koşulları $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ ve $\%98\pm 2$ bağıl nemdir (BN). Karıştırma sonrası Şekil 6’daki kalıplara kendiliğinden yerleşen hamur vibrasyon gerekmeksizin doldurulmuştur. Kabin içindeki koşullara ilaveten numunelerin üzerine naylon poşet örtülmüştür. Erken yaş kuruma büzülmesi deneylerinde ise kabin içi koşullar $30\pm 1^{\circ}\text{C}$ ve $\%50\pm 2$ BN’dir. Bu koşullarda numunenin üst yüzeyi kuruma ortamına açıktır. Bu iklim koşulları, karıştırmadan ve

gerekli işçilikten hemen sonra yani numunenin karıştırma sırasında su ile temasından yaklaşık 40 dakika sonra taze hamur ile buluşmaktadır. Karıştırma sonrası lazer kalıplarının doldurulması ile birlikte otomatik vicat cihazı ile priz başlangıcı ölçümleri de başlamıştır. Priz başlangıcı anında Şekil 6'daki lazer ışın yolunu kapatan engel kaldırılmış, ölçümler numune üzerinden gelen datalarla kaydedilmeye başlanmıştır. Priz başlangıcı ile ölçümlerin başlatılmasının iki sebebi vardır: numunenin kalıp formunu yitirerek lazer ışın yoluna yıkılmasının (yalancı genleşme) engellenmesi ve kısıtlı durumda çatlakların oluşabileceği yarı rijit formdan (priz başlangıcından) itibaren efektif büzülmelerin kaydedilmesi.

Priz başlangıçları numune su banyosu içinde bünyesel büzülme için $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'de, kuruma büzülmesi için $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de tespit edilmiştir. İğne ucunun kalıp tabanından 4 mm uzaklıkta olması halinde priz başlangıcı, iğne 2,5 mm battığı zaman ise priz sonu olarak not edilmiştir (TS EN 480-2). Su banyosu içerisinde priz süresi tayininin iki avantajı olmuştur: birincisi, çok düşük S/Ç oranlı hamurların yüzeyi ortam koşullarına açık olduğunda sert bir kabuk tutmaktadır ve ölçümler alınamamaktadır, ikincisi, su banyosu ile istenilen sıcaklıkta priz başlangıcı tespiti yapmak mümkün olmuştur.

Böylelikle 30°C 'de 20°C 'ye göre kısalan priz başlangıcı anında, çok erken safhadaki büzülme okumalarında kayıplar yaşanmadan, lazer ölçümleri başlatılabilmektedir. Vicat su haznesi içerisine test için istenilen sıcaklıkta su koyulmuş, suyun soğumasının engellenmesi için şırınga yardımı ile düzenli olarak sıcak su takviyesi yapılmıştır. Priz sürelerinin ölçüldüğü otomatik Vicat cihazı Şekil 6.4'de gösterilmektedir.



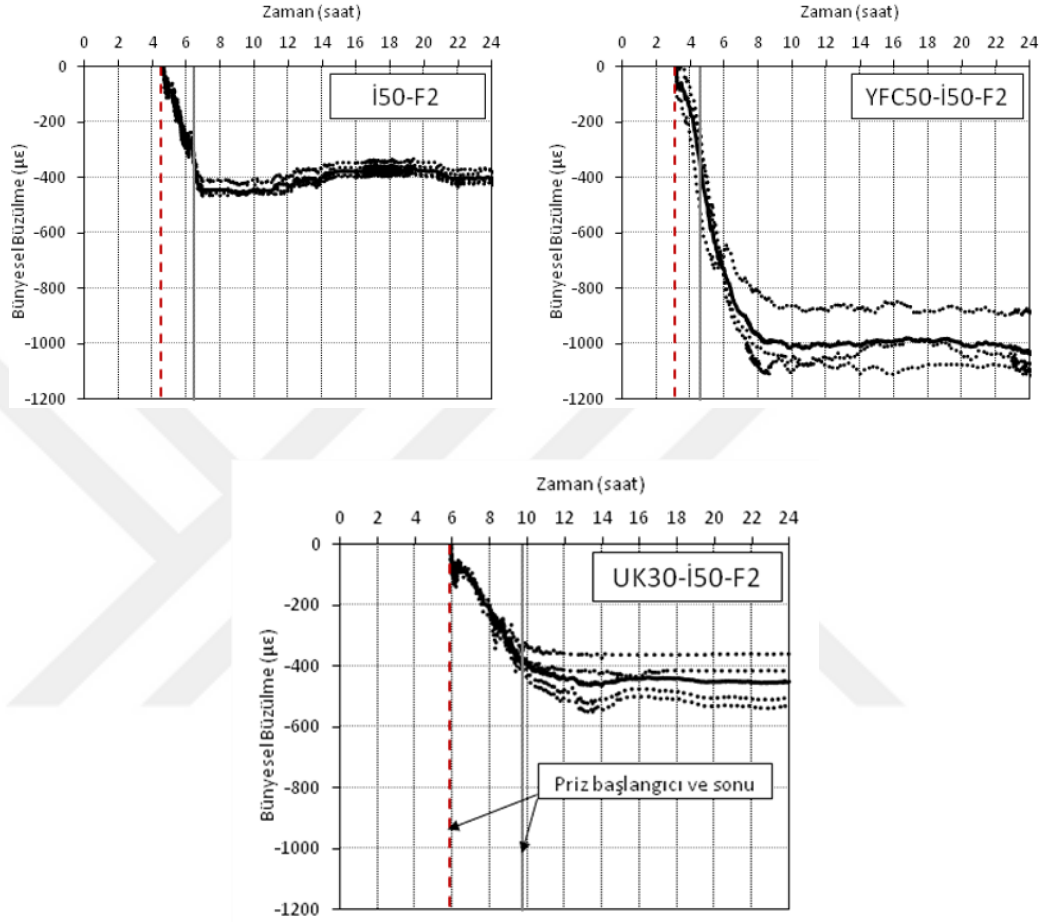
Şekil 6.4 Otomatik Vicat cihazı ile priz sürelerinin tayini

6.1 Erken Yaş Büzülme Davranışı

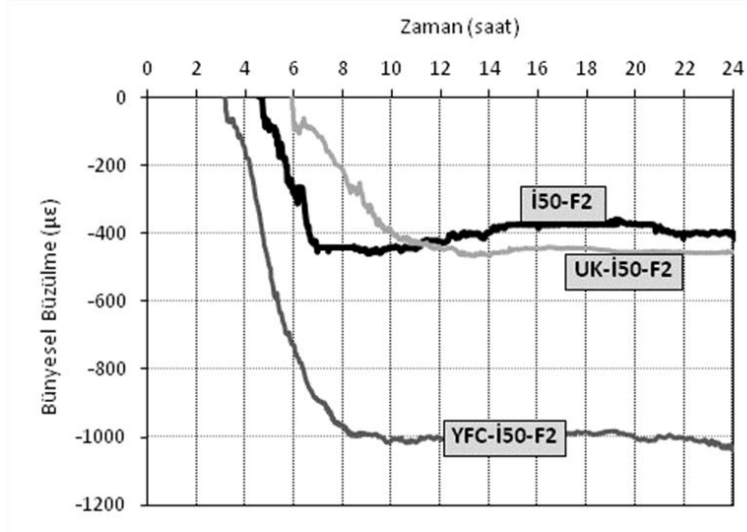
Karışımların erken yaş büzülme sonuçları, 110M691 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenen Yalçınkaya (2014)'nin doktora tezi çalışmalarından alınmıştır. Yalçınkaya (2014)'nin çalışmasında, mikro liflerin RPB'nin erken yaş serbest büzülme mertebelerini kayda değer oranda etkilemediği görülmüştür. Bu sebeple lifsiz karışımlarda büzülme ölçümleri alınmamıştır. Yorumlar, lifli matrislerin büzülme ölçümlerine istinaden yapılmıştır. Şekil 6.5'te her bir karışımdan 3 ila 5 örneğin erken yaş bünyesel büzülme eğilimleri ve ortalama değerler gösterilmektedir. YFC ikamesi ile maksimum büzülme kontrol karışımının 2 katı mertebesindedir (-1050 $\mu\epsilon$). Ayrıca YFC ikamesi priz başlangıcını ve bitişini yaklaşık 1 saat kısaltmaktadır.

Priz başlangıç ve bitişlerinin 3 mm maksimum tane çapına sahip karışımlarda lifsiz durumda belirlendiğini belirtmek gerekmektedir. UK ikamesi ile priz başlangıcı 1,4

saat, priz sonu ise 3,2 saat uzamıştır. Bununla beraber erken yaştaki maksimum büzülme değeri ($\approx 450\mu\epsilon$) kontrol karışımı ile benzer mertebededir (Şekil 6.6).

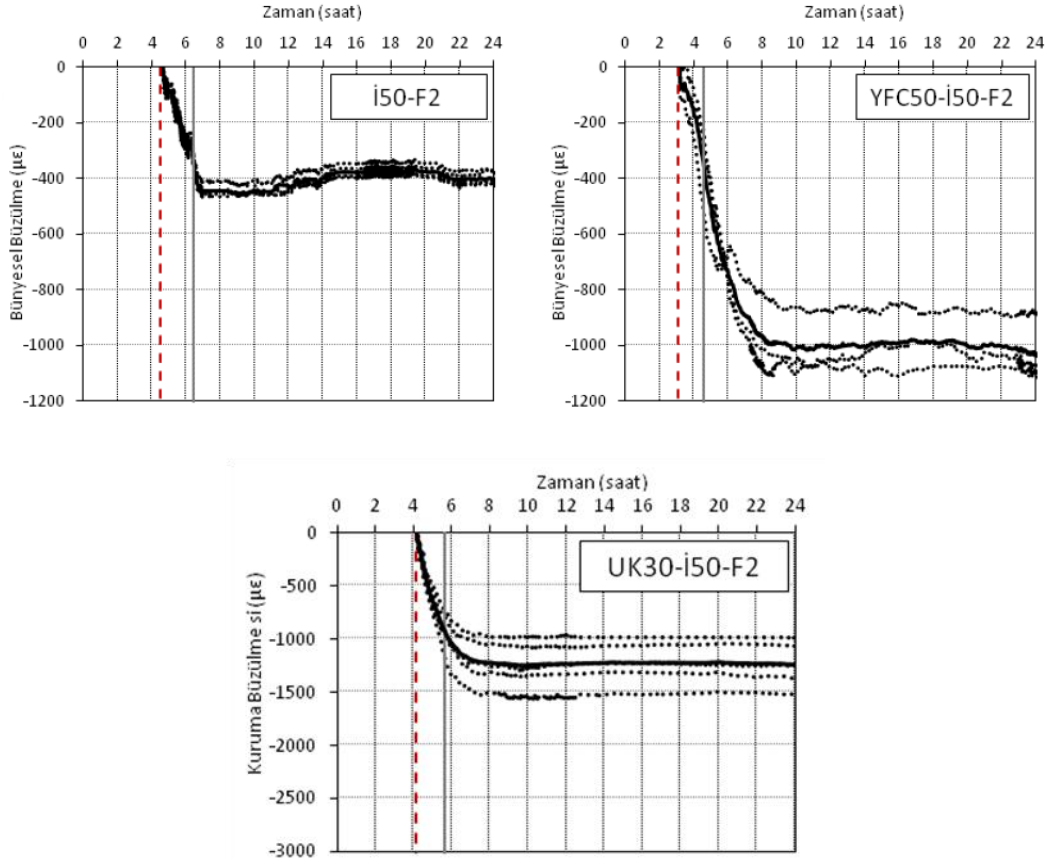


Şekil 6.5. Kontrol karışımı, UK ve YFC ikameli örneklerin erken yaş bünyesel büzülme eğrileri



Şekil 6.6. Erken yaş bünyesel büzülmenin puzolan ikamesi ile değişimi

Şekil 6.7’de erken yaş kuruma büzülmesi eğilimleri 5’er örnek için sunulmaktadır. YFC ikamesi priz başlangıcını yaklaşık 1 saat kısaltırken, UK ikamesi 1,1 saat uzatmıştır. YFC ikamesi ile priz başlangıcı ve bitişi arasındaki süre kısalmaktadır.

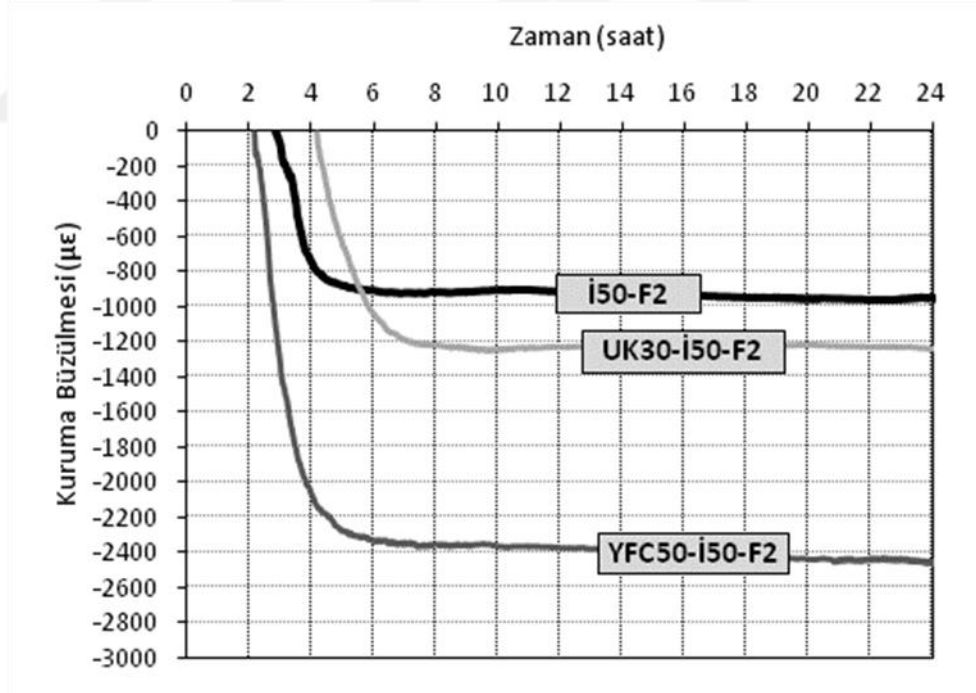


Şekil 6.7. Kontrol karışımı, UK ve YFC ikameli örneklerin erken yaş kuruma büzülmesi eğilimleri

Şekil 6.8’de kuruma büzülmesi eğilimleri topluca sunulmaktadır. UK ikamesinin ilk 24 saatteki maksimum kuruma büzülmesi değerini %22, YFC ikamesinin %145 oranında arttırdığı görülmektedir.

Şekil 6.6 incelendiğinde 20°C’de elde edilen bünyesel büzülme değerlerinin 30°C’de şiddetleneceği düşünülürse YFC ikamesinin yarattığı etkiyi salt karışım suyunun buharlaşmasına bağlamak doğru olmayacaktır.

YFC ikamesinin kuruma büzülmesini arttırıcı etkisi içerisinde içsel kuruma etkisi baskın faktör olabilir. Kontrol karışımının (İ50-F2) priz başlangıcı ve sonu arasında en az büzülmeyi sergileyen karışım olması agrega – matris arayüzey özelliklerinin çok erken yaşta hızlı gelişiminin agregaların büzülme kısıtlayıcı etkisini arttırdığı şeklinde yorumlanabilir. Erken yaş kuruma deformasyonu mertebeleri kontrol karışımı, UK ikameli karışım ve YFC ikameli karışım için sırasıyla -1000µε, -1250µε ve -2450µε olarak elde edilmiştir.



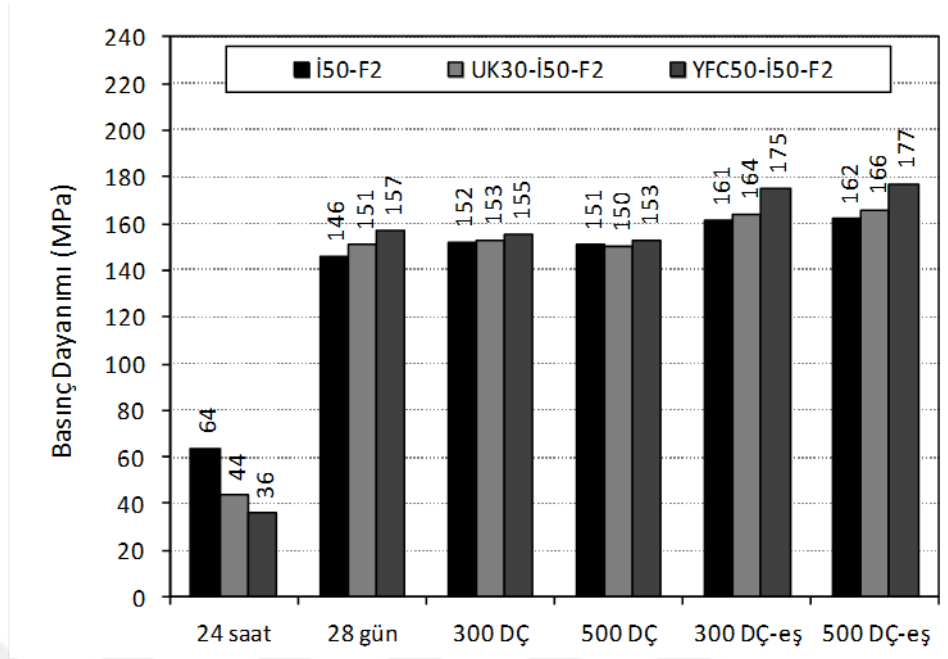
Şekil 6.8 Erken yaş kuruma büzülmesinin puzolan ikamesi ile değişimi

BÖLÜM YEDİ

DONMA – ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİNİN ÇELİK LİFLİ KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Donma – Çözülme (DÇ) çevrimlerinin yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemenin kalıcılığına etkisinin basınç dayanımı noktasına araştırıldığı bu bölümde ilk gün kalıp içerisinde bekletilme koşullarının etkisi üç ana karışım için tartışılmaktadır. İlk gün kuruma koşullarında ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ BN) kısıtlanmış halde bekletilen numuneler ve ideal ortamda (20°C , $\%98\pm 2$ BN) serbest halde bekletilen numunelerin standart su kürü (28 gün) sonrası maruz kaldığı 300 ve 500 DÇ çevriminin basınç performansına etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, gerek çevrime giriş gerekse aynı süre kür edilmiş (eşlenik) dayanımlarla kıyaslanarak irdelenmiştir.

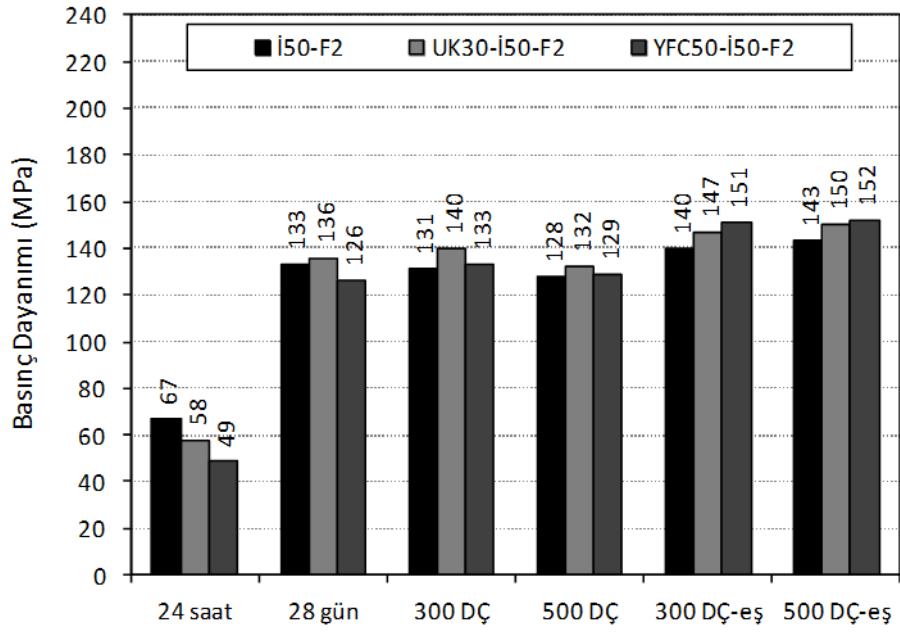
Şekil 7.1’de ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal koşullarda serbest halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası basınç dayanımları sunulmaktadır. Grafiklerde “-eş” ifadesi çevrim süresince su küründe tutulmuş serileri, diğer bir deyişle eşlenik serileri göstermektedir. İlk 24 saatte basınç dayanımları incelendiğinde beklendiği üzere puzolan ikame oranı artışıyla dayanımlar azalmaktadır. Kontrol karışımı, kül ikameli ve YFC ikameli karışımların basınç dayanımları sırasıyla 64, 44 ve 36 MPa olarak elde edilmiştir. 28 gün standart kür sonrası ise aynı değerler sırasıyla 146, 151 ve 157 MPa’ya ulaşmıştır. Grafikler incelendiğinde donma – çözülmenin çevrime giriş dayanımı olan 28 günlük basınç dayanımlarını önemli ölçüde etkilemediği görülmektedir. Eşlenik numuneler incelendiğinde ise dayanım artışının sürdüğü görülmektedir. DÇ etkisinin basınç dayanımlarına olan olumsuz etkisi yalnızca eşlenik numuneler ile kıyaslama yapıldığında belirginleşmektedir. Burada DÇ ortamında bekletilen numunelerin de yöntem itibarıyla suya doygun olduğu vurgulanmalıdır. Bu sebeple eşlenik numunelere kıyasla gelişen dayanım kayıpları yalnızca kür eksikliğinden değil, aynı zamanda DÇ etkisinden de kaynaklanmaktadır. 500 DÇ çevrimi süresince su küründe tutulan numunelerin basınç dayanımı İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 162, 166 ve 177 MPa elde edilmiştir.



Şekil 7.1 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin basınç dayanımları

Şekil 7.2’de ilk 24 saat kalıp içerisinde kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası basınç dayanımları sunulmaktadır. İlk 24 saatte İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için basınç dayanımları sırasıyla 67, 58 ve 49 MPa elde edilmiştir. 28 günlük standart kür sonrası bu değerler sırasıyla 133, 136 ve 126 MPa mertebesine yükselmiştir.

300 ve 500 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımlarının giriş dayanımlarına göre önemli oranda değişmediği ancak eşlenik serilere göre belirgin derecede etkilendiği söylenebilir. 500 DÇ çevrimi süresince su küründe tutulan numunelerin basınç dayanımı İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 143, 150 ve 152 MPa elde edilmiştir. Çevrim sayısının artışıyla eşlenik dayanımların da artışına paralel olarak DÇ etkisine maruz örneklerin dayanımlarının bir miktar düşük olduğu görülmektedir.



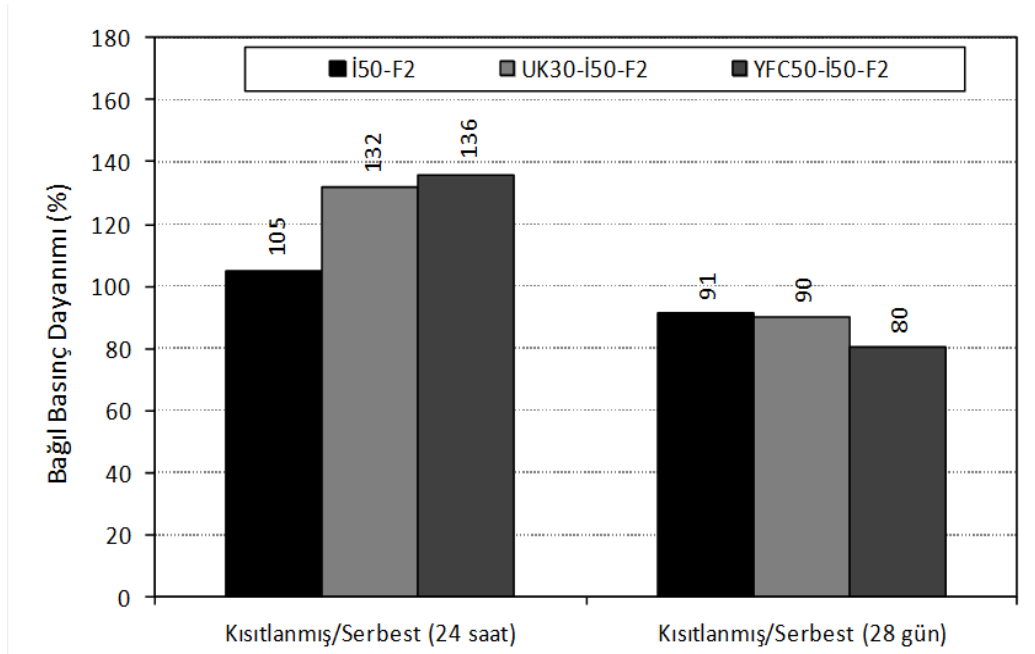
Şekil 7.1 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin basınç dayanımları

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2 kıyaslandığında kısıtlanmış haldeki numunelerin serbest haldekilere kıyasla erken yaşta daha yüksek dayanım verdiği, ilerlemiş yaşlarda ise daha düşük dayanım verdiği görülmektedir. Burada kısıtlama etkisinin çatlak oluşturma mekanizmasından ziyade erken yaş mukavemet gelişiminin sıcaklık artışı ile artması, ancak ilerleyen yaşlarda nihai dayanımlarının düşmesi durumu söz konusudur. Kuruma ortamında kısıtlama etkisi 30°C, serbest halde ideal koşulların ise 20°C sıcaklık ile teşkil edildiğini vurgulamak gerekmektedir. Yüksek oranda çimento içeren bu tür kompozitlerde sıcaklık artışı ile erken yaşta dayanım gelişiminin hızlandığı, düzensiz gelişen hidrasyon ürünlerinin hidrate olmayan çimento taneleri etrafında bariyer etkisi yaptığı ve hidrate olmamış tane miktarını arttırarak uzun dönemli dayanımlarda düşüş yaratabildiği bilinmektedir (Barnett ve diğer., 2006; Yalçınkaya ve diğer., 2013).

Bu çalışmada kısıtlanmış durumda gelişmesi muhtemel çatlakların basınç dayanımına etkisinin belirgin olmadığı görülmektedir. Çatlaklar, genellikle numune orta kısmında yoğunlaşmaktadır. Basınç dayanımları, eğilme sonrası basınç deneyi ile bulunduğundan bu çatlakların mekanik özelliklere etkisinin tam olarak yansımından söz edilemez. Ancak kuruma ortamında YFC içeren karışımın serbest

büzülme değerinin fazla olması agrega tane çeperlerinde ve çimento pastasının içsel kısıtlandığı noktalarda arayüzey hasarına sebep olmuş olabilir. Ayrıca, durabilite zorlamaları veya büzülme sebebiyle gelişen çatlaklı yapılardaki hasarı belirlemede eğilme yüklemesinin basınç dayanımına göre daha iyi bir gösterge olduğu söylenebilir.

Şekil 7. 3'te erken yaşta kuruma etkisinde kısıtlamanın ve ideal koşullarda serbest durumda kür etmenin, basınç dayanımlarına etkisi kıyaslanarak bağıl olarak sunulmaktadır. Erken yaşta hızlı gelişen hidrasyon reaksiyonlarının basınç yüklemesi altında büzülme çatlaklarından daha baskın bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. İnceliği ve puzolanik aktivitesi yüksek YFC puzolanı ikamesi ile sıcaklık artışıyla dayanım artışı en belirgindir (%36). Ardından 28 gün su kürü yapılması durumunda karışımlarda tersi bir etki oluşmaktadır. YFC50-İ50-F2 karışımı erken yaşta sıcaklık artışı ile en yüksek dayanım artışını oluştururken, 28 gün su kürü sonrası en yüksek dayanım kaybını (%20) beraberinde getirmektedir. Başka bir deyişle sıcaklık artışı puzolan ikamesi durumunda dayanım kazanma hızını arttırırken, ilerlemiş yaş dayanımlarını kontrol karışımına göre daha olumsuz etkilemektedir.



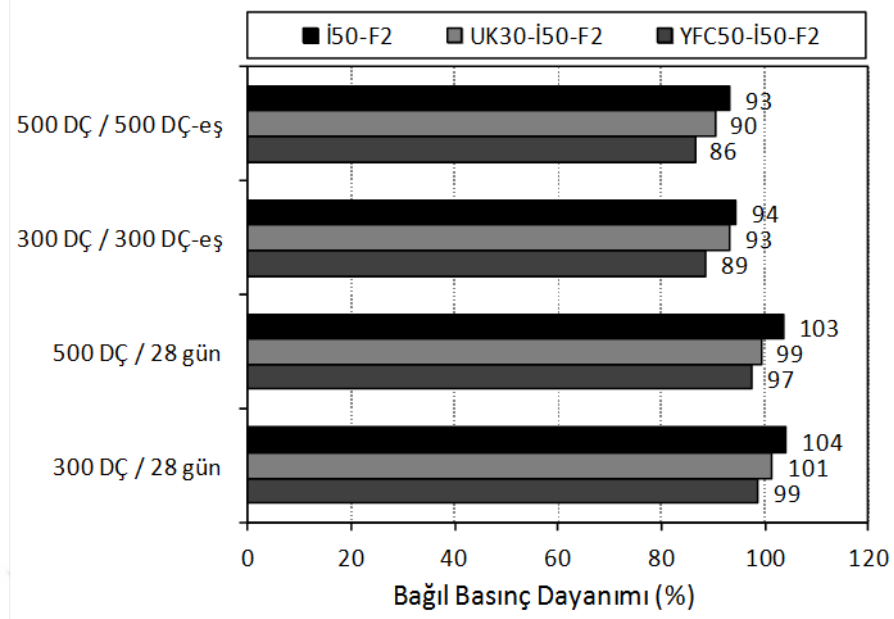
Şekil 7.3 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için 24 saat ve 28 gün bağıl basınç dayanımları

Erken yaşta (24 saat) ideal koşullarda serbest halde tutulan serilerin değişik yaşlarda ve DÇ çevrimleri sonrası basınç dayanımları bağıl olarak Şekil 7.4'te sunulmaktadır. Karışımların 300 DÇ sonrası basınç dayanımları, DÇ'ye giriş dayanımına göre (28 gün) önemli oranda değişmemiş, belirgin kayıp gözlenmemiştir. 300 DÇ çevrimi boyunca eşlenik olarak su küründe tutulan numunelere göre ise İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla %6, %7 ve %11 dayanım kaybı meydana gelmiştir.

Kayıp oranları 500 DÇ çevrimi sonrası sırasıyla %7, %10 ve %14'e yükselmektedir. Çevrime giriş dayanımları İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 146, 151 ve 157 MPa'dır. 28 günden, eşlenik numunelerin 500 DÇ çevrimi boyunca suda bekleme süresine kadar en büyük dayanım artışı YFC50-İ50-F2 karışımı tarafından sergilenmiştir (%13). Çevrime giriş dayanımları üç ana karışım için benzer olsa da DÇ hasarının gelişeceği iri agrega – matris ve çelik lif – matris arayüzeyi gelişiminin puzolan ikamesindeki artış ile gecikebileceği söylenebilir. Su/bağlayıcı oranı tüm karışımlar için 0,20'dir. Ancak, su/çimento oranı UK ikamesi ile 0,36'ya, YFC ikamesi ile 0,50'ye yükselmektedir.

Ramezaniapour ve Malhotra (1995), UK veya YFC ikamesinin artışıyla kür süresine hassasiyetin arttığını vurgulamıştır. Peng ve diğer. (2007), 0,32 su/bağlayıcı oranına sahip betonlarda puzolanların uzun dönem dayanımını arttırsa da donma hasarından korunmak için hava sürüklemenin gerekli olduğunu vurgulamıştır.

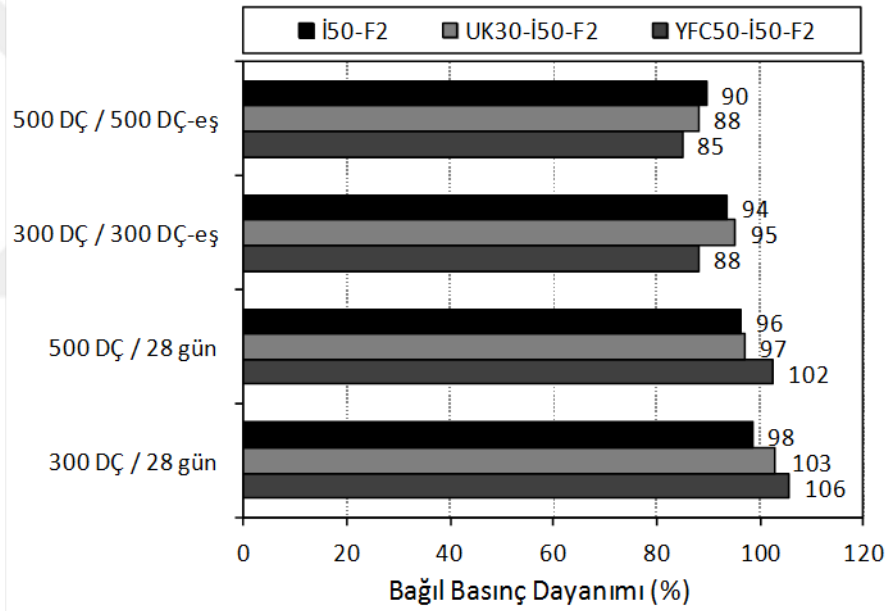
Eşlenik numunelere kıyasla dayanım kayıplarının 500 DÇ sonrası önemli oranda olmadığını vurgulamak gerekmektedir. İdeal koşullarda saklanan numunelerin çatlaksız bir yapıya sahip olduğu, DÇ çevrimlerinden fiziksel olarak etkilenmediği görülmüştür. Lifli RPB karışımlarının normal bir betona kıyasla donma-çözülme etkisine çok daha dayanıklı olduğu bilinmektedir.



Şekil 7.4 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin bağıl basınç dayanımları

Erken yaşta (24 saat) kuruma koşullarında kısıtlanmış halde tutulan serilerin değişik yaşlarda ve DÇ çevrimleri sonrası basınç dayanımları bağıl olarak Şekil 7.5'te sunulmaktadır. Çevrime giriş dayanımları İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 133, 136 ve 126 MPa'dır. Karışımların 300 DÇ ve 500 DÇ sonrası basınç dayanımları, giriş dayanımlarına kıyasla kayda değer oranda değişmemiştir. 300 DÇ sonrası eşlenik dayanımlara kıyasla YFC ikameli karışım %12 dayanım kaybı yaşamıştır. 500 DÇ çevrimi sonrası ise eşlenik dayanımlar referans alınarak İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için dayanım kayıpları sırasıyla %10, %12 ve %15 elde edilmiştir. Şekil 7.5 incelendiğinde kısıtlanmış numunelerde, ideal koşullarda saklanan numunelere kıyasla 28 günlük dayanımların İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla %9, %10 ve %20 oranında daha az olduğu görülmüştür. İlk 24 saatte görülmeyen, uzun dönemde oluşan bu etkinin temel sebebinin erken yaşta hızlı ve düzensiz gelişen hidrasyon ürünleri olabileceği vurgulanmıştır. Erken yaş ortam sıcaklığının 20°C'den 30°C'ye yükseltilmesi sonucu ilerlemiş yaşlarda yaşanan dayanım kayıplarının, DÇ hasarından daha baskın bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Erken yaşta büzülme sonucu gelişmesi muhtemel kılcal çatlakların DÇ çevrimleri sırasında çimento pastası gövdesine su işleyişini kolaylaştırabileceği Corinaldesi ve Moriconi (2003) tarafından belirtilmiştir. Yüksek serbest büzülme miktarı ile YFC ikameli

karışım söz konusu etkiyi göstermiş olabilir. Ancak çevrime giriş dayanımlarına kıyasla kayıp olmayışı göz önüne alındığında çok dar mikro çatlakların eşlenik numunelerde su kuru ile kısmen iyileştiği, DÇ çevrimlerine maruz kalan numunelerde ise tersi bir etkinin minör de olsa olduğu söylenebilir. Çevrime girerken kısıtlanmış büzülme hasarı bulunan lifli matrislerde, çevrimler sonrası yapılan gözlemsel incelemeler sonucu belirgin bir DÇ hasarı (parçalanma, kapak atma vb.) gelişmediği, ilave çatlakların oluşmadığı, yüzey çatlaklarının kararlılığının ise ölçülebilir oranda değişmediği saptanmıştır. Lifli RPB karışımlarının kuruma ortamında artan büzülmesinin kısıtlanması halinde çatlak riskinin arttığı, bu olumsuz etkiye rağmen yüksek sayıdaki donma-çözülme tekrarında iyi bir performans sergilediği söylenebilir.



Şekil 7.5 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin bağıl basınç dayanımları

7.1 Donma – Çözülme Çevrimlerinin Eğilme Performansına Etkisi

DÇ çevrimlerinin eğilme performansına olan etkisi basınç dayanımlarındaki araştırmanın sistematığında, eğilme dayanımları ve eğilme yükleri altında elde edilen yük – sehim eğrilerinin irdelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımlarına ek olarak eğilme tokluklarının yaşa göre ve DÇ etkisi altında değişimi belirlenmiştir. İlk gün kuruma koşullarında ($30 \pm 1^\circ\text{C}$, $\%50 \pm 2$ BN) kısıtlanmış halde bekletilen

numuneler ve ideal ortamda (20°C, %98±2 BN) serbest halde bekletilen numunelerin standart su kürü (28 gün) sonrası maruz kaldığı 300 ve 500 DÇ çevriminin eğilme performansına etkisi bu bölümde tartışılmıştır.

Şekil 7.6’da ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal koşullarda serbest halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası ortalama eğilme yükü – sehım eğrileri sunulmaktadır. Eğriler incelendiğinde tüm eğrilerin genel davranışının deformasyon yumuşaması şeklinde olduğu, yani matristeki ilk çatlak yükünün %2 lif hacmi ile aşılamadığı görülmektedir. Artan kür süresi ile İ50-F2 karışımının ikincil pikinin deformasyon sertleşmesi davranışına yaklaştığı görülmektedir. Ancak tüm kür türleri için matris çatlama sonrası ani yük düşüşü söz konusudur.

Bu düşüş YFC ikameli matriste en belirgindir. Hacimce %2 çelik lifin hedef basınç dayanımını (150 MPa) yakalamada ve kırılma parametrelerini iyileştirmede yeterli olduğu ama deformasyon sertleşmesi için kritik lif dozajının altında kaldığı, bu açıdan üç ana karışımında daha yüksek lif hacimlerine gerek duyulduğu anlaşılmaktadır.

Deformasyon sertleşmesi ve buna bağlı kritik lif hacminin, lifli kompozitlerin performans sınıflandırması açısından önemli olduğu Naaman ve Reinhardt (2005)’in çalışmasında vurgulanmaktadır. Kür süresinin artışıyla maksimum sehım değerleri de artmaktadır.

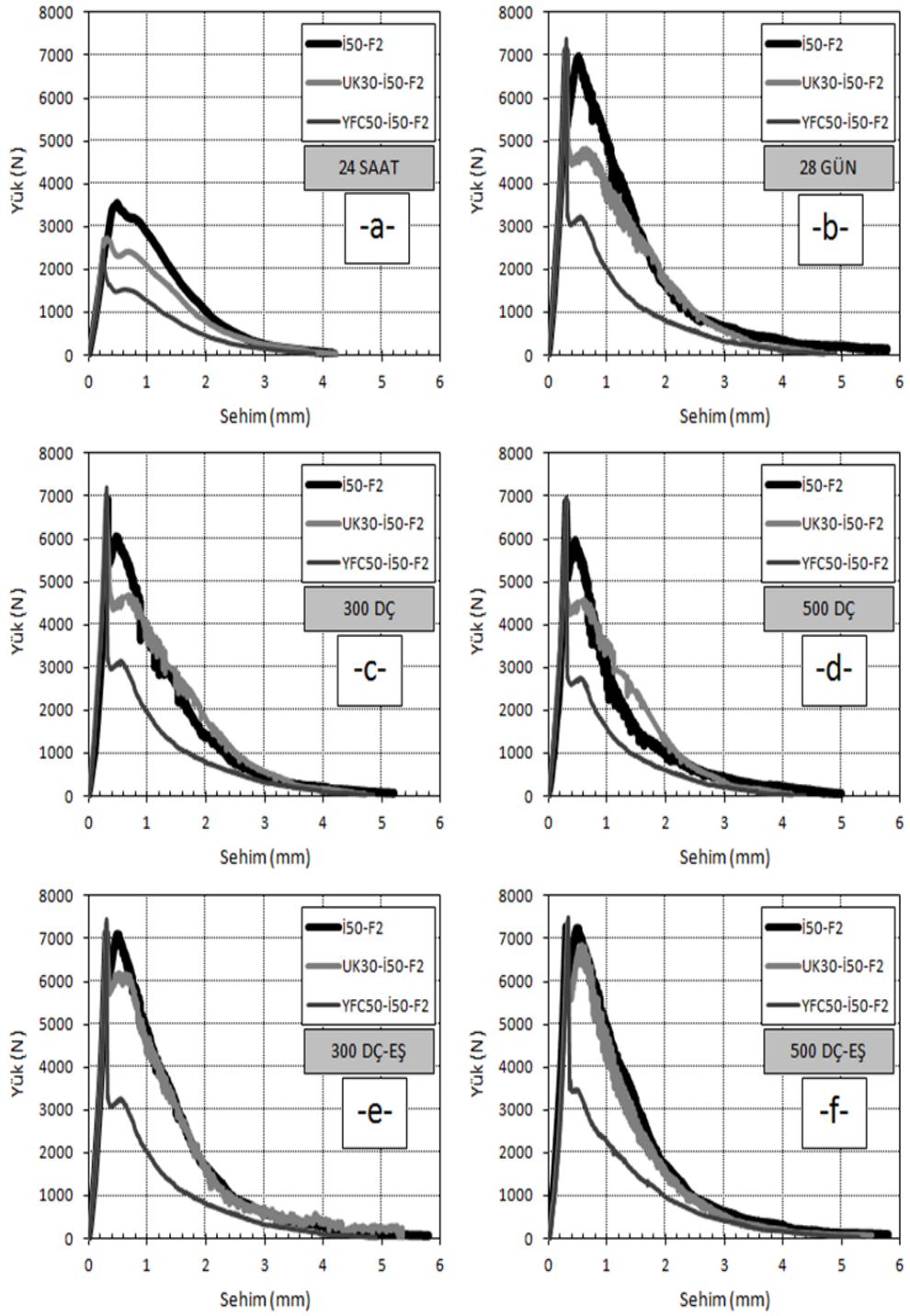
Taşınan yük, 1 – 10 kg arasına kadar düştüğünde deneyler sonlandırılmıştır. Sehım değerleri, tüm karışımlar için benzer mertebededir. Tüm sehım değerleri 4 – 6 mm arası elde edilmiştir. Karışımların eğilme yüklemesi altında göçüşü, açılan ve genişleyen tek bir çatlaktan meydana gelmiştir.

Yük – sehım eğrisinin alt alanının hesaplanmasıyla elde edilen tokluk değerleri, pik yükün artışıyla ve pik yük sonrası bölgenin (kuyruk bölgesi) daha geç düşüşe geçmesiyle artmaktadır. İlk çatlak yükü sonrası gözlenen testere ağzı şeklindeki dalgalanmalar, ani yük düşüşlerini ve toparlanmaları göstermektedir (Şekil 7.6). Bu tür kuyruk bölgelerinin sebebi, bazı liflerin kopması veya aniden sıyrılması sonrası çatlak yolundaki bir üst lifin devreye girmesidir. Çalışmada kullanılan mikro çelik

lifler 0,16 mm çapa, 2000 MPa çekme dayanımına ve 6 mm boya sahiptir. Ayrıca bu lifler matrisle aderansı geliştirmesi beklenen pirinç ile kaplıdır. İnceliği ve yüksek puzolanik aktivitesi sayesinde arayüzey geliştirici etkisi bilinen YFC'nin çimentoya ağırlıkça %50 ikamesi sonucu oluşan lif – matris arayüzeyi, kontrol karışımı ve %30 UK ikameli karışımın lif – matris arayüzeyine kıyasla daha güçlü olabilir. Arayüzey bölgesi geliştikçe liflerin sıyırılması güçleşmekte, çatlığa denk gelme konumuna göre matrise yeterli gömülme boyu olanları kopabilmektedir.

YFC ikameli matris – mikro çelik lif arayüzeyinin diğer karışımlara kıyasla daha gelişmiş olması sebebiyle lif kopma eğiliminin arttığı söylenebilir. Başka bir ifadeyle kompozit gevrekleşmiştir. Matris çatladığında, çekme yüzeyine yakın lifler ani olarak kopabilmektedir. YFC içeren karışımlarda ani yük düşüşü bu duruma işaret eder.

YFC ikamesiyle nihai sehim değerleri de azalmıştır. Matris dayanımı ve lif – matris arayüzeyinin gelişmesiyle kopan lif sayısının artabileceği, buna paralel olarak tokluk özelliğinin olumsuz etkilenebileceği Şengül ve diğer. (2006) ve Aydın (2013) tarafından belirtilmektedir. YFC içeren karışımın sergilediği yüksek bünyesel büzülme değerleri de lif – matris bağ dayanımını arttırmış olabilir. Bu tür kompozitlerde matris büzülmesinin artışı, lif çeperindeki basıncı ve beraberinde mekanik kenetlenmeyi arttırarak lif kopmalarını kolaylaştırabilmektedir (Stang, 1996; Park ve diğer., 2014).



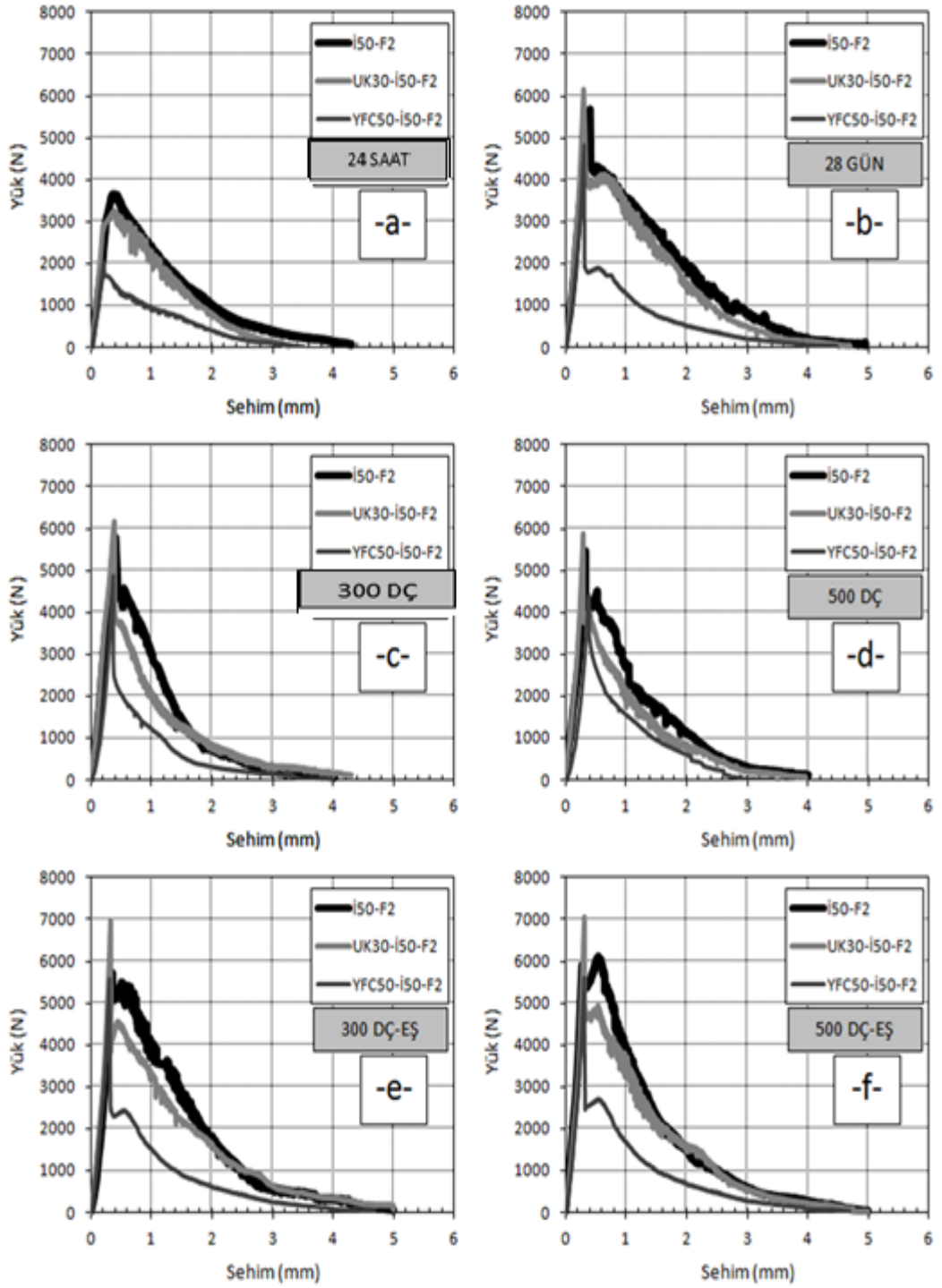
Şekil 7.6 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 DÇ sonrası (c), 500 DÇ sonrası (d), 300 DÇ eşlenik (e), 500 DÇ eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri

Şekil 7.6'dan DÇ çevrimleri sonrası grafikler incelendiğinde üç ana değişiklik göze çarpmaktadır: pik yüklerde düşüş, ikincil piklerde düşüş ve maksimum sehım değerlerindeki düşüş. Bu farkların özellikle eşlenik numunelerle kıyaslama yapıldığında belirginleştiği görülmektedir.

Şekil 7.7'de ilk 24 saat kalıp içerisinde kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası ortalama eğilme yükü – sehım eğrileri sunulmaktadır.

Şekil 7.6 ile kıyaslama yapıldığında pik yüklerin YFC ikameli karışımında en fazla olmak üzere düştüğü, ikincil piklerin kısıtlama sonucu neredeyse kaybolduğu, artan kür süresi ile ikincil piklerin oluşmaya başladığı görülmektedir. Dikkati çeken diğer bir nokta ise maksimum sehım değerlerinin kısıtlama sonucu belirgin derecede ($\approx 1\text{mm}$) azalmasıdır.

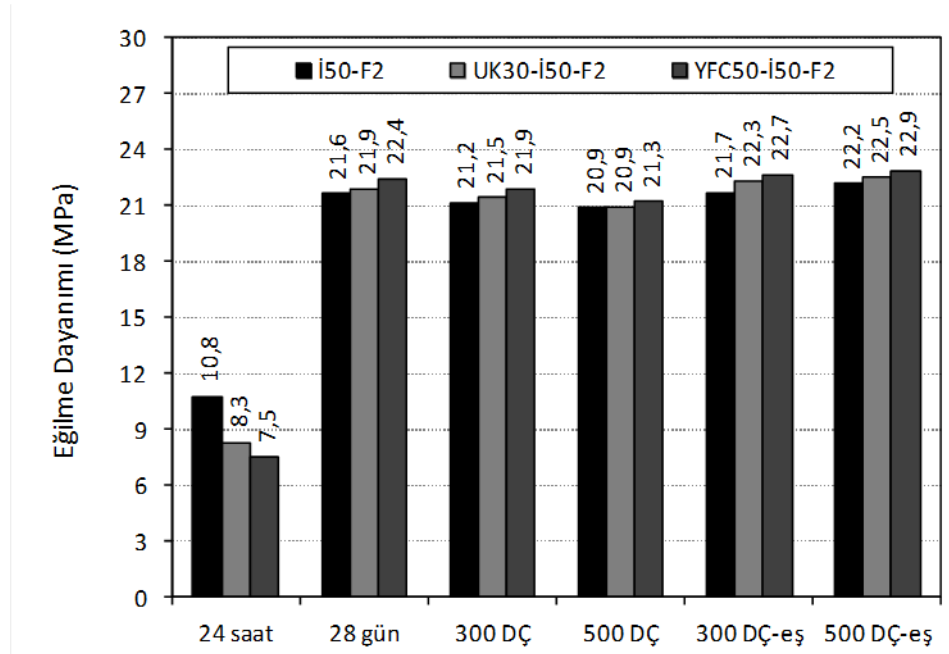
Kısıtlama sonucunda erken yaşta kontrol karışımının ve UK ikameli karışımın pik yükleri serbest hale kıyasla artarken, YFC ikameli karışımın azalmıştır. Numuneler üzerinde yapılan gözlemsel incelemelerde YFC içeren numunelerin orta kesiminde yoğunlaşmak üzere gözle görünür, düzgün geometride kısıtlama sonucu oluşan çatlaklara sahip olduğu belirlenmiştir. Kısıtlama sisteminin, en fazla büzülen YFC50-İ50-F2 karışımında en büyük hasarı verdiği görülmüştür.



Şekil 7.7 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanmış halde bekletilen serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 DÇ sonrası (c), 500 DÇ sonrası (d), 300 DÇ eşlenik (e), 500 DÇ eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri

DÇ çevrimlerinin kısıtlanmış numuneler üzerinde yaptığı etki incelendiğinde dayanım ve sehim düşüşlerine ilaveten ikincil yük artışlarının neredeyse kaybolduğu görülmektedir (Şekil 7.7). Özellikle çevrim sayısı arttıkça YFC içeren karışımda ilk çatlak sonrası ani yük düşüşü de azalmaktadır. Daha kademeli bir yük düşüşü daha büyük bir sehim aralığında gerçekleşmiştir. Ayrıca 500 DÇ sonrası eğrilerin doğrusal kısmının az de olsa eğiminin azaldığı (sağ el yönünde yattığı) görülmektedir. Yük – sehim eğrilerinde kısıtlanmış büzülme çatlakları sebebiyle oluşan değişikliklerin, DÇ sonrası yük – sehim eğrilerinin davranışını etkileyebildiği görülmektedir.

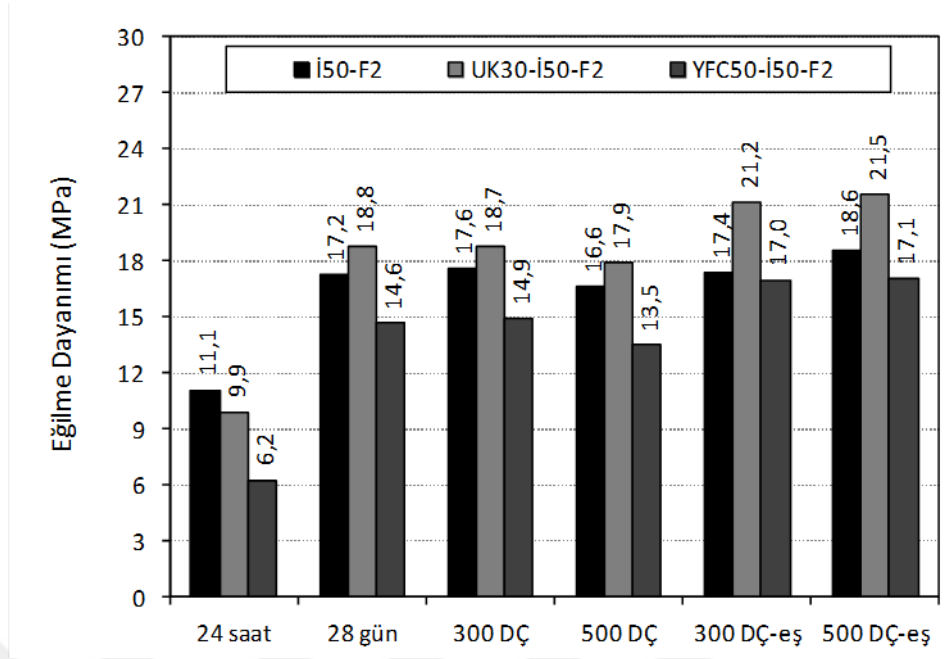
Şekil 7.8’de ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal koşullarda serbest halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası eğilme dayanımları sunulmaktadır. 24 saatlik dayanımlar incelendiğinde İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımlarının eğilme dayanımları sırasıyla 10,8, 8,3 ve 7,5 MPa elde edilmiştir. Bu değerler 28 gün su kürü sonrası 21,6, 21,9 ve 22,4’e yükselmiştir. 1 günlük eğilme dayanımlarının puzolan ikamesi ile azaldığı görülmektedir. İdeal koşullarda kür edilen RPB karışımlarının DÇ dayanıklılığının oldukça iyi olduğu, basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da etkilenmenin fazla olmadığı görülmektedir.



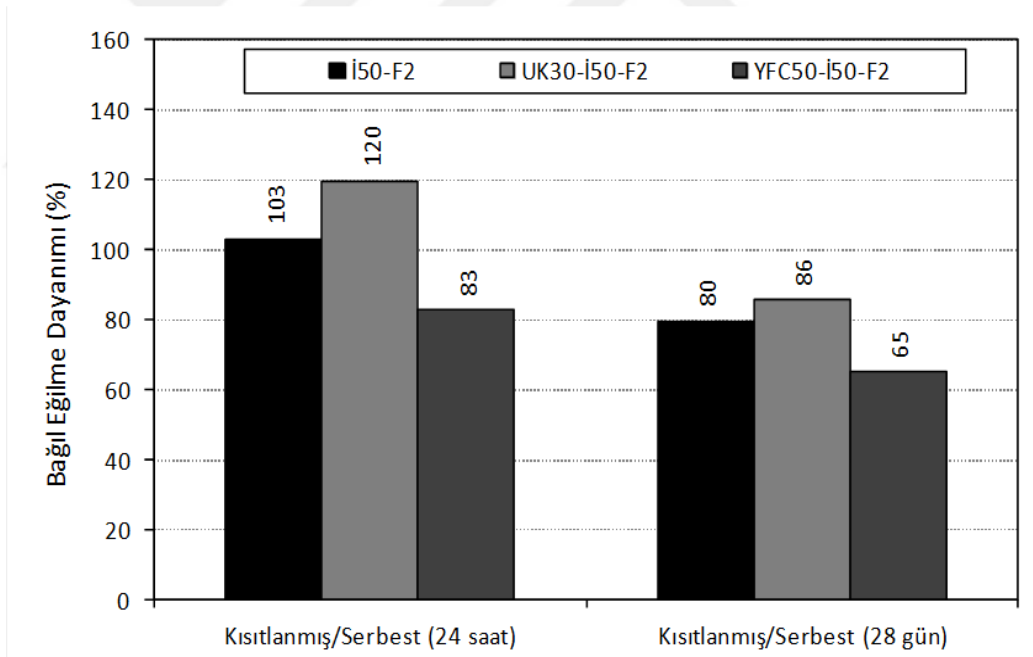
Şekil 7.8 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin eğilme dayanımları

Şekil 7.9’da ilk 24 saat kalıp içerisinde kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası eğilme dayanımları sunulmaktadır. İlk 24 saatte İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için eğilme dayanımları sırasıyla 11,1, 9,9 ve 6,2 MPa elde edilmiştir. 28 günlük standart kür sonrası bu değerler sırasıyla 17,2, 18,8 ve 14,6 MPa mertebesine yükselmiştir. 300 ve 500 DÇ çevrimi sonrası eğilme dayanımlarının çevrime giriş dayanımlarına göre önemli oranda değişmediği ancak UK ve YFC ikameli karışımlarda eşlenik serilere göre belirgin derecede etkilendiği söylenebilir. YFC ikameli karışımın yüksek erken dönem kuruma büzülmesi sebebiyle daha geniş ve uzun bir çatlak yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu çatlakların yarattığı eğilme performansı kaybının eşlenik numuneler için uygulanan uzatılmış su kürü ile düzeltilemediği görülmektedir. Büzülme mertebesi daha düşük olan UK ikameli karışım ise eğilme dayanımı kazanımını sürdürmüştür.

Şekil 7.10 incelendiğinde erken yaş kuruma büzülmesinin kısıtlanması sonucu oluşan hasarın ilk gün dayanımlarına yansıdığı görülmektedir. YFC50-İ50-F2 karışımı kısıtlama sebebiyle %17 eğilme dayanımı kaybı yaşamıştır. 28 gün dayanımları kıyaslandığında kısıtlamanın etkisi daha da belirginleşmektedir ve YFC’nin dayanım kaybı mertebesi %35’e ulaşmıştır. İ50-F2 ve UK30-İ50-F2 karışımları için 28 günde kaydedilen kısıtlanmış büzülme hasarı sırasıyla %20 ve %14’tür. Mikroskopik ve gözlemsel incelemelerde yüzey çatlaklarının en geniş ve en uzun olduğu YFC karışımında mekanik hasar en fazladır.

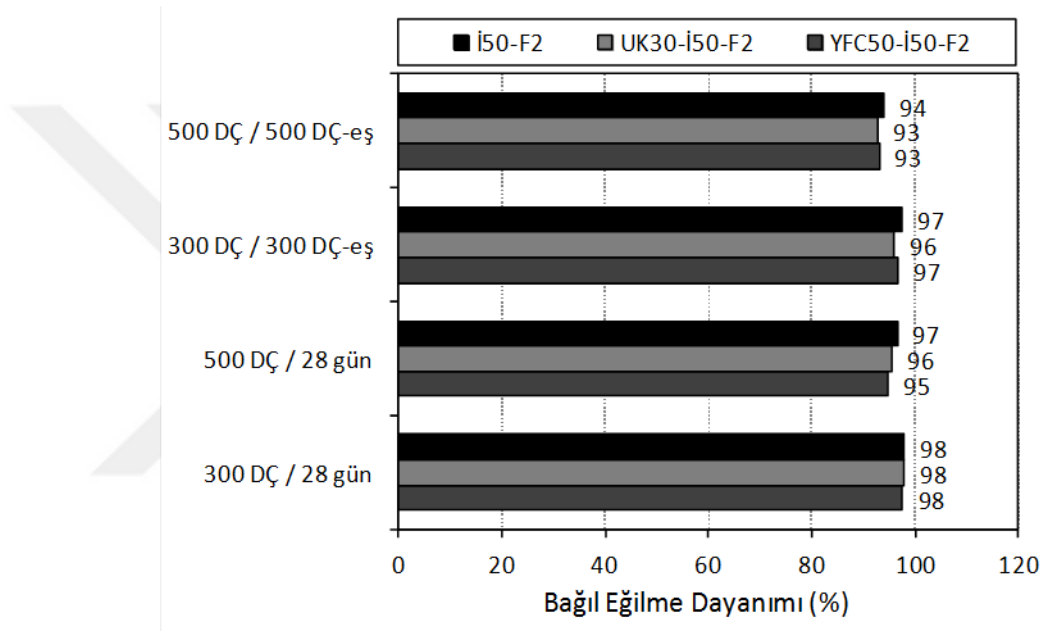


Şekil 7.9 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin eğilme dayanımları



Şekil 7.10 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için 24 saat ve 28 gün bağıl eğilme dayanımları

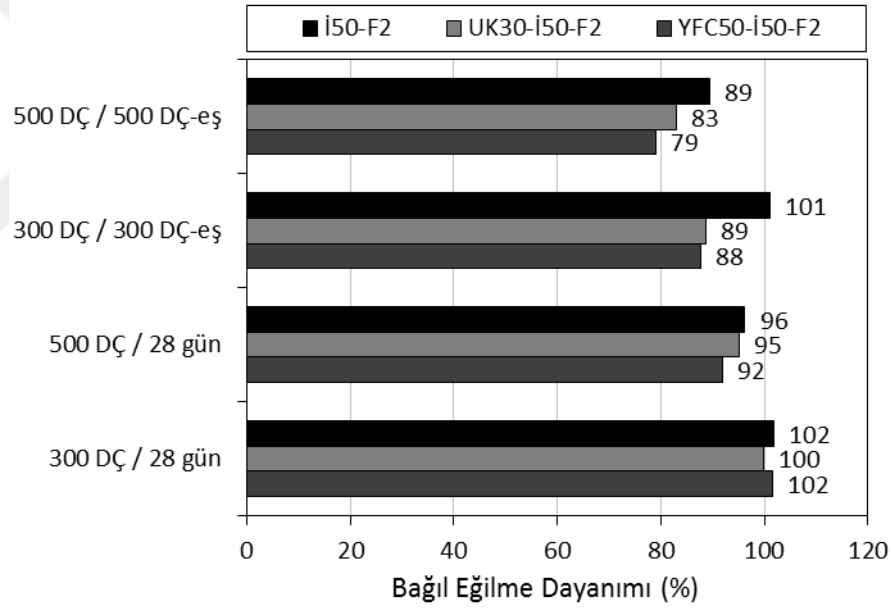
Erken yaşta (24 saat) ideal koşullarda serbest halde tutulan serilerin değişik yaşlarda ve DÇ çevrimleri sonrası eğilme dayanımları bağıl olarak Şekil 7.11’de sunulmaktadır. Karışımların 300 DÇ sonrası eğilme dayanımları, DÇ’ye giriş dayanımına göre (28 gün) önemli oranda değişmemiş, belirgin kayıp gözlenmemiştir. DÇ çevrimleri sonucu oluşan hasar giriş dayanımına göre %5’i, eşlenik dayanımlara göre ise %7’yi aşmamıştır. Diğer bir deyişle lifli RPB’ler erken yaşta iyi kür edilirler, büzülme çatlaklarından korunurlarsa DÇ dirençleri basınç dayanımı noktasında olduğu gibi eğilme dayanımı noktasında da oldukça iyidir.



Şekil 7.11 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin bağıl eğilme dayanımları

Erken yaşta (24 saat) kuruma koşullarında kısıtlanmış halde tutulan serilerin değişik yaşlarda ve DÇ çevrimleri sonrası eğilme dayanımları bağıl olarak Şekil 7.12’de sunulmaktadır. Çevrime giriş dayanımları İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 17,2, 18,8 ve 14,6 MPa’dır. 300 DÇ çevrimi sonrası bu değerlerde düşüş yaşanmazken, 500 DÇ sonrası İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımlarında çevrime giriş dayanımlarına kıyasla sırasıyla %4, %5 ve %8 mertebelerinde minör kayıplar oluşmuştur. 300 DÇ çevrimi sonrası eşlenik numunelere kıyasla İ50-F2 karışımında hasar oluşmazken, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla %11 ve %12 oranında dayanım kaybı yaşanmıştır. 500 DÇ çevrimi sonrası eşlenik numunelere kıyasla İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve

YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla %11, %17 ve %21 oranında eğilme dayanımı kaybı yaşanmıştır. Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının DÇ performansına ve mekanik performansa olan etkisi uzun dönemli çevrimlerde ve bu çevrimlere eş sürede suda bekleyen numunelerle kıyaslanmasıyla belirginleşmektedir. YFC'nin erken yaş büzülme mertebesinin ve yüzeysel çatlak oranlarının daha yüksek olması, DÇ çevrimleri sırasında bünyeye su girişini kolaylaştırmış olabilir. Ancak, mikro çelik lifler sayesinde bu çatlaklarda gelişmesi muhtemel don hasarının büyük oranda engellendiği düşünülmektedir. Düşük S/Ç oranlarında (<0,3) beton dona karşı oldukça dayanıklıdır (Gagne ve diğ., 1990). Mikro liflerin yeterince ince olması durumunda C-S-H matrisinin çatlak toleransını dahi arttırabildikleri (Schulson, 1998), uzun çevrimlerde şişmeyi kısıtlayıcı etki yarattıkları ve dağılmayı geciktirdikleri (Atiş ve Karahan, 2007; Nawy, 2001) bilinmektedir.



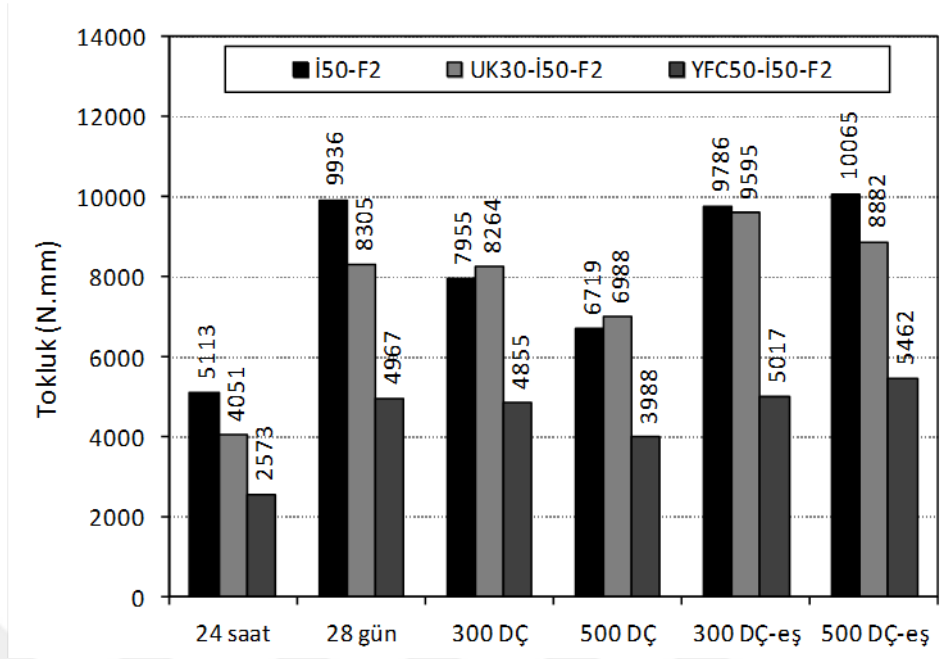
Şekil 7.12 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin bağıl eğilme dayanımları

Şekil 7.13'te ideal koşullarda kür edilen serilerin tokluk değerleri verilmektedir. 1 gün sonunda elde edilen tokluk değerleri İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 5113, 4051 ve 2573 N.mm'dir. Bu değerler 28 gün sonunda neredeyse 2 katına yükselmiş, karışımlar arasındaki tokluk farkları açılmıştır. 300 DÇ çevrimi sonrası çevrime giriş tokluklarına kıyasla yalnızca İ50-F2 karışımının

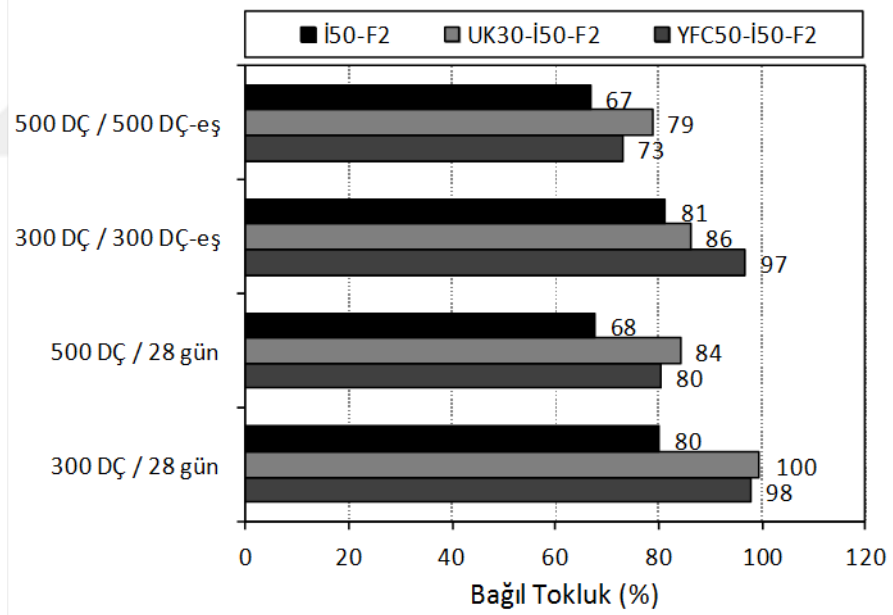
tokluğu belirgin oranda azalırken, 500 DÇ çevriminde UK ikameli karışımın da tokluk değeri azalmıştır. Eşlenik numuneler değerlendirildiğinde 300 ve 500 DÇ çevrimi sonrası YFC ikameli karışımların tokluğundaki azalma en azdır. Burada DÇ hasarından ziyade, YFC ikameli karışımların zaman içerisinde tokluklarının gelişmemesi söz konusudur. YFC ikameli karışımında gelişen lif - matris arayüzeyi sebebiyle lif kopma davranışının arttığı, ilk çatlak sonrası eğilme yükünün ani düştüğü, ikincil pikin yükselemediği, kuyruk bölgesinde taşınan yükün diğer karışımlara kıyasla belirgin derecede düşük olduğu belirtilmişti (Şekil 7.6). Söz konusu etkinin, DÇ hasarından daha baskın olduğu, diğer karışımlarda tokluk değeri düşüşlerinin DÇ çevrimleri sonrası değişen kuyruk bölgesi ile alakalı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 7.8’de tüm çevrim ve yaşlar için verilen dayanım mertebelerinin birbirine çok yakın olması, DÇ çevrimlerinin dayanımdan ziyade tokluk kaybı yaratabildiğini göstermektedir. Bu durumun sebebi, tüm karışımların deformasyon yumuşaması davranışı sergilemesi, diğer bir ifadeyle karışımların dayanım mertebesini belirleyen temel olgunun matris dayanımı olmasıdır.

DÇ etkisi ile Lif – matris arayüzeyi hasarının oluşması, toklaşma mekanizmasının daha belirgin olduğu İ50-F2 karışımında daha şiddetli tokluk kayıplarına sebep olmuştur. İ50-F2 karışımının tokluk kaybı, çevrime giriş toklukları referans alındığında 300 DÇ çevrimi sonunda %20, eşlenik tokluklar referans alındığında %33 seviyesindedir (Şekil 7.14).



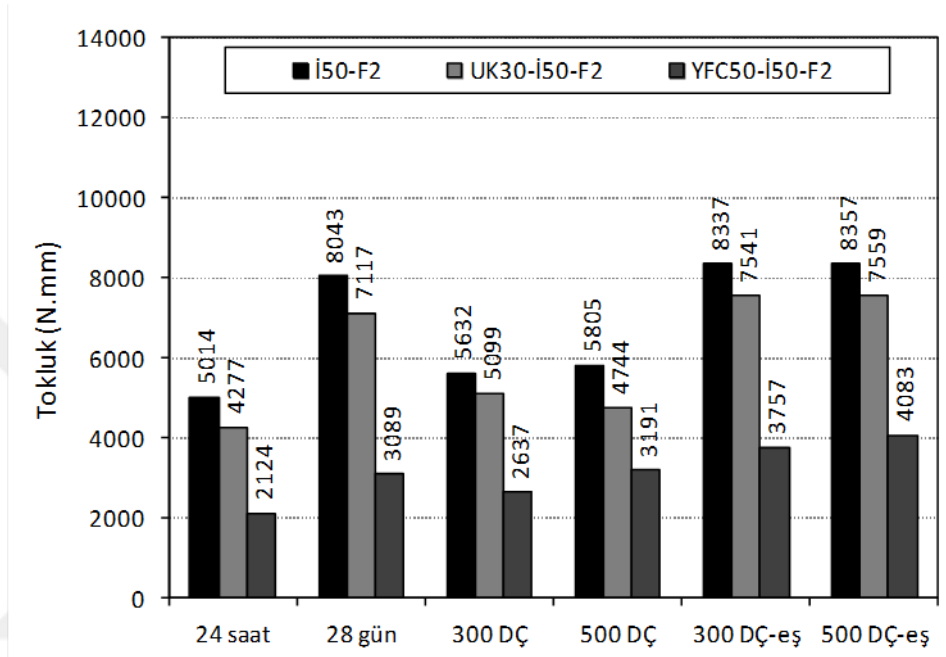
Şekil 7.13 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin toklukları



Şekil 7.14 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin bağlı toklukları

Şekil 7.15'te ilk 24 saat kalıp içerisinde kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası toklukları sunulmaktadır. İlk 24 saatte İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için tokluklar sırasıyla 5014, 4277 ve 2124 N.mm elde edilmiştir. 28 günlük standart kür sonrası bu değerler sırasıyla 8043, 7117 ve 3089 N.mm mertebesine yükselmiştir. Kısıtlanmış durumda

da ideal koşullardakine benzer bir eğilim vardır. YFC ikamesi en düşük tokluk değerlerini sergilemiştir. Ayrıca tüm yaşlar ve DÇ çevrimleri için tokluk değerleri kuruma ortamında büzülme kısıtlamasıyla düşmüştür. Eğilme dayanımlarının erken yaş büzülme kısıtlama işlemiyle düştüğü görülmüştü (Şekil 7.10). Benzer davranış tokluklar için de geçerlidir.

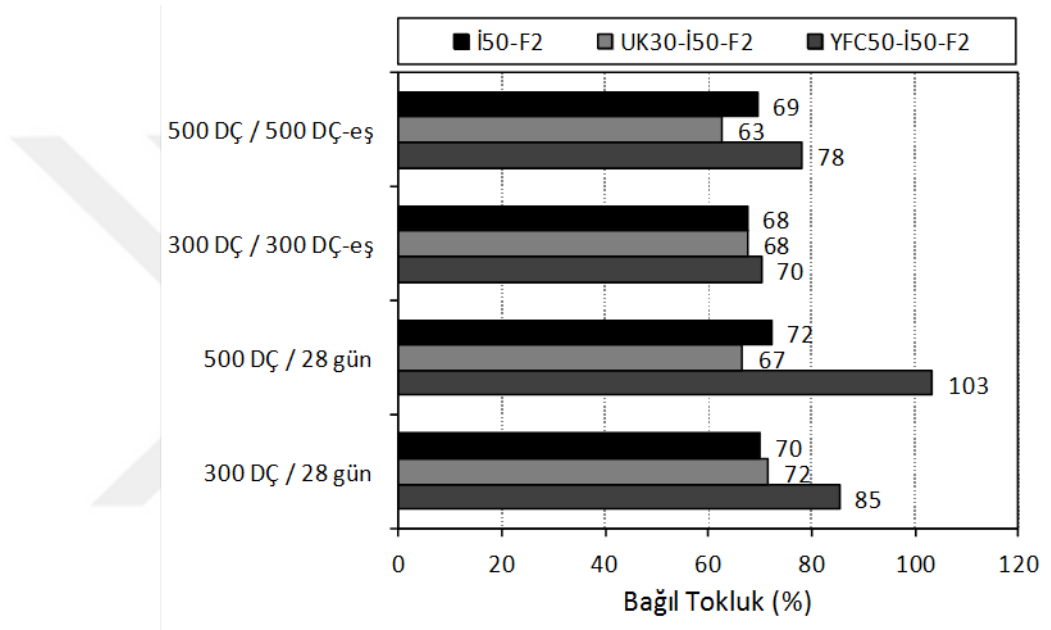


Şekil 7.15 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin toklukları

Şekil 7.16’da ilk 24 saatte kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin bağıl toklukları sunulmaktadır. Kısıtlama durumunda çevrime giriş dayanımına kıyasla 300 DÇ çevrimi sonrası tokluklar İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için %30, %28 ve %15 oranında azalmıştır. Aynı değerler 500 DÇ çevrimi sonrası İ50-F2 ve UK30-İ50-F2 için sırasıyla %28 ve %33 iken, YFC50-İ50-F2 karışımının tokluğu artmıştır. YFC50-İ50-F2 karışımının 500 DÇ sonrası yük sehim eğrisi incelendiğinde 28 güne kıyasla ani yük düşüşünün azaldığı, kuyruk bölgesinin aynı sehim değeri için daha yüksek yük mertebelerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 7.7).

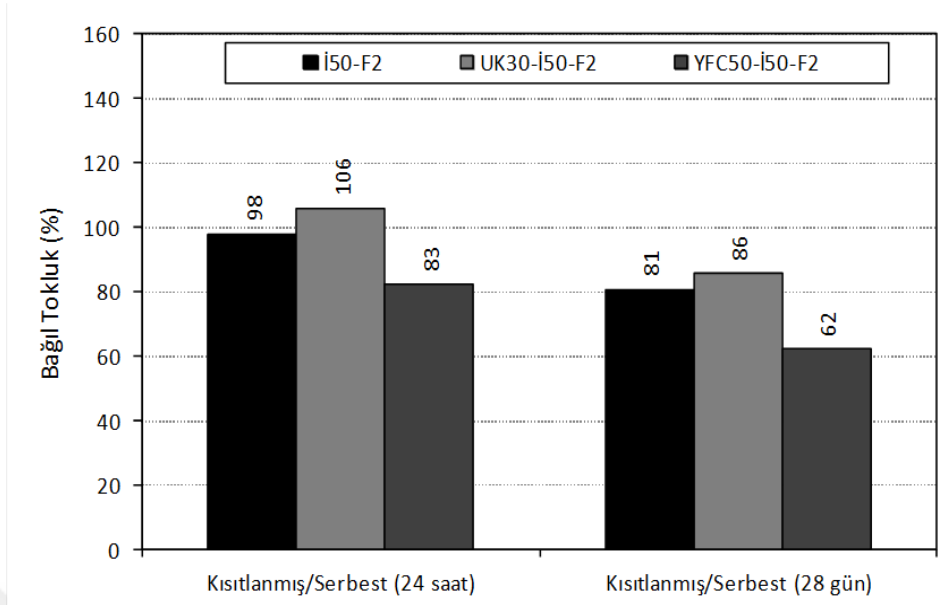
Kısıtlama çatlakları en belirgin olan YFC ikameli karışıma bu çatlaklardan çevrimlerde sızan suyun lif – matris aderansına zarar vererek gevrek yapıyı biraz olsun sünekleştirdiği, lif kopma davranışını azalttığı söylenebilir. 500 DÇ çevriminde

de en az tokluk kaybını YFC ikameli karışım yaşamıştır. 300 DÇ sonrası İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları tokluk değerleri eşlenik numunelere göre %30 mertebesinde azalmıştır. 500 DÇ çevrimi sonrasında eşlenik numunelere göre kıyas yapıldığında ise İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için tokluklar sırasıyla %31, %37 ve %22 oranında azalmıştır. YFC ikameli matriste ani pik yük düşüşü, 500 DÇ çevrimlerinin eşleniği olan su kürü numunelerinde artan dayanım ile birlikte belirginleşmiştir.



Şekil 7.16 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin bağıl toklukları

Şekil 7. 17’de erken yaşta kuruma ortamında kısıtlanmış serilerin ideal koşullarda serbest olarak bekletilmiş serilere göre bağıl toklukları verilmektedir. Bağıl toklukların, bağıl eğilmelerle benzer eğilimde olduğu görülmektedir (Şekil 7.10). Kısıtlanmış büzülme çatlakları, eğilme pik yükünü, kuyruk bölgesi davranışını genellikle olumsuz etkilemektedir. Kısıtlama sonucu maksimum sehim değerli de düştüğünden tokluk değerleri azalmaktadır. Kısıtlama sonrası eğilme performansındaki azalma, karışımların serbest büzülme değerlerindeki artışla belirginleşmektedir. Toklukların da eğilme dayanımlarına paralel olarak bu durumdan olumsuz etkilendiği görülmektedir.



Şekil 7. 17 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için 24 saat ve 28 gün bağıl tokluklar

7.2 Genel Değerlendirme

Benzer dayanım sınıfına sahip olan, bağlayıcı fazı ikamelerle değiştirilmiş üç ana reaktif pudra betonunun donma – çözülme direncine erken yaş kısıtlanmış büzülme çatlaklarının etkisinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Yüksek oranda uçucu kül (%30) ve yüksek fırın cürufu (%50) ikamesiyle 785 kg çimento dozajına sahip RPB'nin su kürü ile 150 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılabilir. Yüksek oranda puzolan ikamesi ile daha ekonomik ve çevreci bir kompozit malzeme geliştirilmiştir. Kendiliğinden yerleşen kıvamda üretilen RPB'nin uygulanabilirliği arttırılmıştır.
- YFC ikamesi ile erken yaş (24 saat) kuruma büzölmeleri önemli oranda artmıştır. Sahada uygulama durumunda ve özellikle kısıtlanmış elemanlarda RPB'nin çatlak hassasiyetine sahip olduğu belirlenmiştir.
- Kısıtlanmış büzölme çatlaklarının basınç yükleri altındaki performansa olumsuz etkisi belirgin değilken, yükleme doğası gereği eğilme performansına etkisi belirgindir.

- Erken yaş sıcaklığının artışı RPB'nin uzun dönemli dayanımlarında belirgin düşüşler yaratmaktadır. Bu durumun sebebi düzensiz gelişen hidrasyon ürünleri sebebiyle uzatılmış kürlerde hidrate olamayan tane sayısının artışı olabilir.

- RPB'ler, 500 DÇ çevrimi sonrası önemli oranda basınç dayanımı kaybına uğramamıştır. 500 DÇ çevrimi sonrası çevrime giriş mukavemetlerinin gerisine düşülmemiş, çevrimler boyunca su küründe bekletilen numunelere kıyasla 500 DÇ çevrimi sonrası en fazla YFC ikamesi için olmak üzere %15 dayanım kaybı görülmüştür.

- Üretilen kompozitlerin 28 günlük eğilme dayanımları 22 MPa civarındadır. Erken dönemde ölçülen büzülme değeri arttıkça, kısıtlanmış büzülme çatlak uzunlukları ve genişlikleri artmaktadır. Eğilme dayanımları, çatlaklardaki artışla belirgin oranda düşmektedir. Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının eğilme dayanımları üzerinde yarattığı düşüş, kontrol karışımı, UK ikameli ve YFC ikameli karışımlar için sırasıyla %20, %14 ve %35 olarak elde edilmiştir.

- İdeal koşullarda kür edildikten sonra 500 DÇ çevrimine maruz kalan RPB'lerde belirgin bir eğilme dayanımı kaybı oluşmazken, kısıtlanmış büzülme çatlakları sonucu eşlenik dayanımlara kıyasla kontrol karışımı, UK ikameli ve YFC ikameli karışımlar için sırasıyla %11, %17 ve %21 eğilme dayanımı kaybı oluşmuştur. Çevrime giriş dayanımlarına kıyasla önemli bir eğilme dayanımı kaybı görülmemiştir.

- Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının eğilme yükleri altında RPB'nin tokluğunu önemli oranda düşürdüğü, düşüşün diğer mekanik özelliklerden daha belirgin olduğu görülmüştür. DÇ çevrimlerinin tokluk özelliğine verdiği zarar, diğer mekanik özelliklerden daha belirgindir. Yük – sehim eğrilerinin kuyruk bölgeleri DÇ çevrimleri sonucu bazı değişikliklere uğrayabilmektedir. İkincil pik yük artış kısmı çevrimlerden olumsuz etkilenabilmektedir. Kompozitin sergilediği maksimum sehim

değerleri DÇ çevrimlerinden olumsuz etkilenebilmektedir. Bu etkiler kısıtlanmış büzülme çatlaklarının varlığında şiddetlenebilmektedir.

- DÇ ortamının, RPB'nin eğilme yükü – sehım eğrileri üzerinde yarattığı iki etki vardır: birincisi matris dayanımında düşüş, ikincisi lif – matris arayüzeyindeki muhtemel hasar. Çalışmaya konu olan, deformasyon yumuşaması sergileyen kompozitlerde birinci etkinin, deformasyon sertleşmesi sergileyebilen başka çimento esaslı kompozitlerde ikinci etkinin eğilme performansında belirleyici olacağı söylenebilir.

Donma – çözülme hasarının, farklı kırılma parametrelerine ve türlerine sahip çimento esaslı kompozit malzemelerde yarattığı etkinin araştırılması önerilmektedir.

BÖLÜM SEKİZ

DONMA – ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİNİN LİFSİZ KARIŞIMLARIN MEKANİK DAYANIMINA ETKİSİ

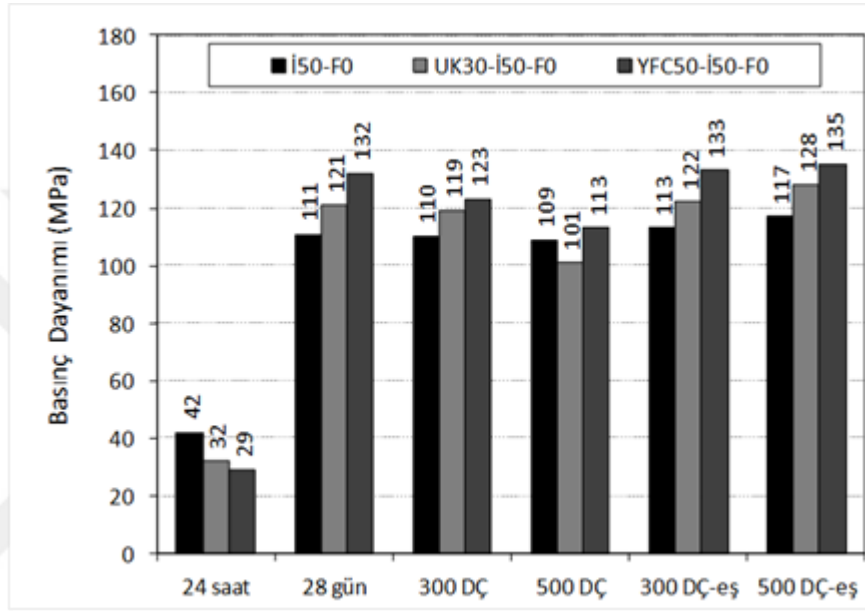
8.1 Donma – Çözülme Çevrimlerinin Basınç Dayanımına Etkisi

Donma – Çözülme (DÇ) çevrimlerinin yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemenin kalıcılığına etkisinin basınç dayanımı noktasında araştırıldığı bu bölümde ilk gün kalıp içerisinde bekletilme koşullarının etkisi üç ana lifsiz karışım için tartışılmaktadır. İlk gün kuruma koşullarında ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ BN) kısıtlanmış halde bekletilen numuneler ve ideal ortamda (20°C , $\%98\pm 2$ BN) serbest halde bekletilen numunelerin standart su kürü (28 gün) sonrası maruz kaldığı 300 ve 500 DÇ çevriminin basınç performansına etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, gerek çevrime giriş gerekse aynı süre kür edilmiş (eşlenik) dayanımlarla kıyaslanarak irdelenmiştir.

Şekil 8.1’de ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal koşullarda serbest halde bekletilmiş lifsiz numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası basınç dayanımları sunulmaktadır. Grafiklerde “-eş” ifadesi çevrim süresince su küründe tutulmuş serileri, diğer bir deyişle eşlenik serileri göstermektedir. İlk 24 saatte basınç dayanımları incelendiğinde beklendiği üzere puzolan ikame oranı artışıyla dayanımlar azalmaktadır.

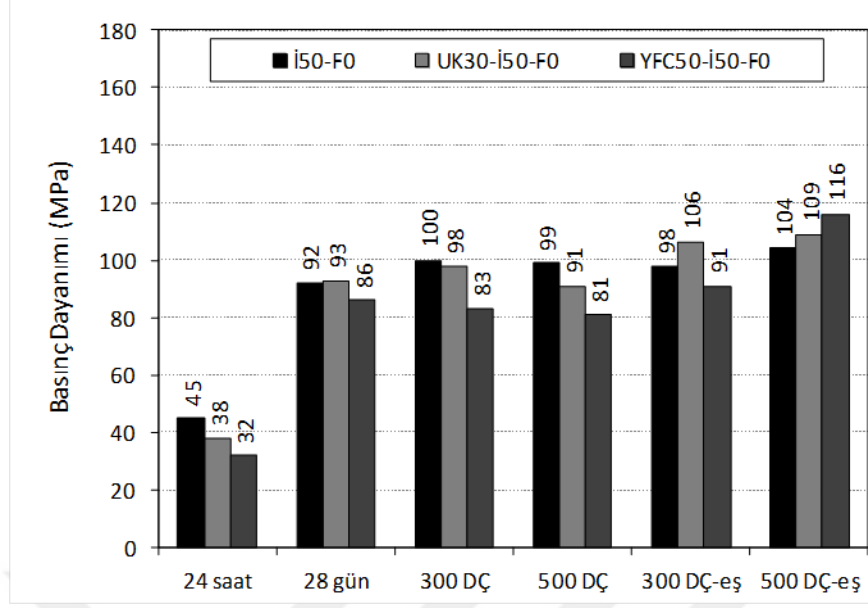
Kontrol karışımı, kül ikameli ve YFC ikameli karışımların basınç dayanımları sırasıyla 42, 32 ve 29 MPa olarak elde edilmiştir. 28 gün standart kür sonrası ise aynı değerler sırasıyla 111, 121 ve 132 MPa’ya ulaşmıştır. Grafikler incelendiğinde donma – çözülmenin çevrime giriş dayanımı olan 28 günlük basınç dayanımlarını 300 DÇ çevriminde önemli oranda etkilemediği görülmektedir. 500 DÇ çevriminde ise giriş dayanımları UK ikameli ve YFC ikameli karışımlar için azalmaktadır. Eşlenik numuneler incelendiğinde ise 28 günden sonra dayanımların önemli oranda artmadığı görülmektedir. DÇ etkisinin basınç dayanımlarına olan olumsuz etkisi yalnızca eşlenik numuneler ile kıyaslama yapıldığında daha belirgindir. DÇ

ortamında bekletilen numunelerin de yöntem itibariyle suya doygun olduğu vurgulanmalıdır. Bu sebeple eşlenik numunelere kıyasla gelişen dayanım kayıpları yalnızca kür eksikliğinden değil, aynı zamanda DÇ etkisinden de kaynaklanabilir. 500 DÇ çevrimi süresince su küründe tutulan numunelerin basınç dayanımı İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla 117, 128 ve 135 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 8.1 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin basınç dayanımları

Şekil 8.2’de ilk 24 saat kalıp içerisinde kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası basınç dayanımları sunulmaktadır. İlk 24 saatte İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için basınç dayanımları sırasıyla 45, 38 ve 32 MPa elde edilmiştir. 28 günlük standart kür sonrası bu değerler sırasıyla 92, 93 ve 86 MPa mertebesine yükselmiştir. 300 ve 500 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımlarının giriş dayanımlarına göre önemli oranda değişmediği ancak eşlenik serilere göre belirgin derecede etkilendiği görülmektedir. 500 DÇ çevrimi süresince su küründe tutulan numunelerin basınç dayanımı İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla 104, 109 ve 116 MPa elde edilmiştir. Çevrim sayısının artışıyla eşlenik dayanımların da artışına paralel olarak DÇ etkisine maruz örneklerin dayanımlarında düşüş kaydedilmiştir.

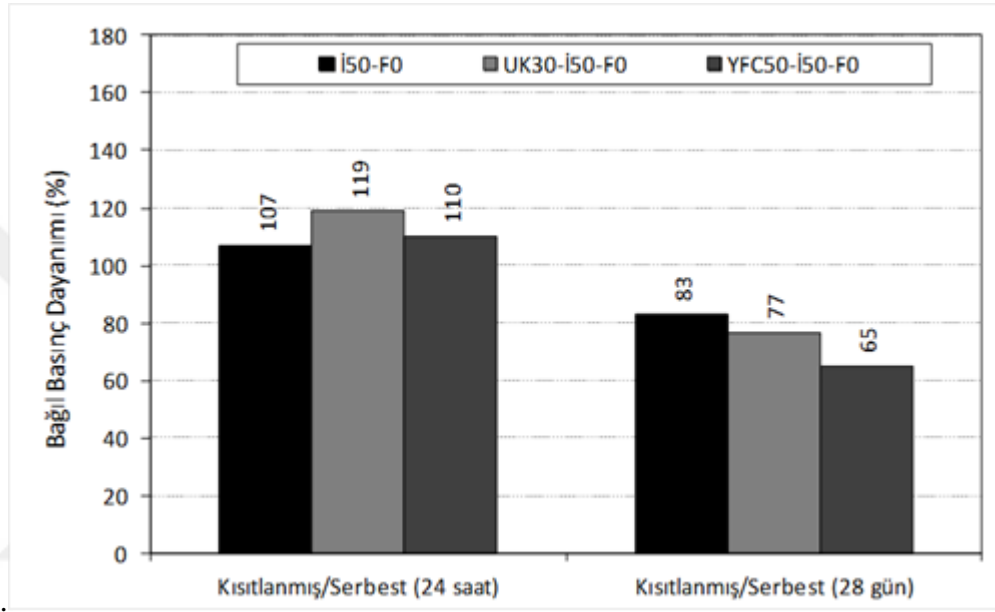


Şekil 8.2 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin basınç dayanımları

Şekil 8.1 ve Şekil 8.2 kıyaslandığında kısıtlanmış haldeki numunelerin serbest haldekilere kıyasla erken yaşta 3 ila 5 MPa yüksek dayanım verdiği, ilerlemiş yaşlarda ise belirgin derecede daha düşük dayanım verdiği görülmektedir. Kuruma ortamında kısıtlama etkisi 30°C, serbest halde ideal koşulların ise 20°C sıcaklık ile teşkil edilmiştir. Yüksek oranda çimento içeren bu tür malzemelerde düzensiz ve hızlı gelişen hidrasyon ürünlerinin ileriki yaşlarda dayanımı olumsuz etkilediği bilinmektedir (Barnett ve diğer., 2006; Yalçınkaya ve diğer., 2013). Kısıtlanmış durumda gelişmesi muhtemel çatlakların basınç dayanımına etkisinin bulunduğu görülmektedir. Minör diğer bir etki ise YFC içeren karışımın diğer karışımlara göre kuruma ortamındaki serbest büzülme değerinin oldukça yüksek olması ve bu karışımda matris – agrega arayüzeyinde mikro çatlakların artışı olabilir. Agregalar, büzülen hamur fazını içsel kısıtlayıcı etkiye sahiptir.

Şekil 8.3'te erken yaşta kuruma etkisinde kısıtlamanın ve ideal koşullarda serbest durumda kür etmenin, lifsiz karışımların basınç dayanımlarına etkisi bağli olarak sunulmaktadır. Erken yaşta hızlı gelişen hidrasyonun, basınç yüklemesi altında büzülme çatlaklarından daha baskın bir etkiye sahiptir. UK ve YFC puzolanı ikameli karışımlarda sıcaklık artışıyla dayanım artışı sırasıyla %19 ve %10 olarak elde edilirken aynı değer kontrol karışımı için %7'dir. Ardından 28 gün su kürü yapılması

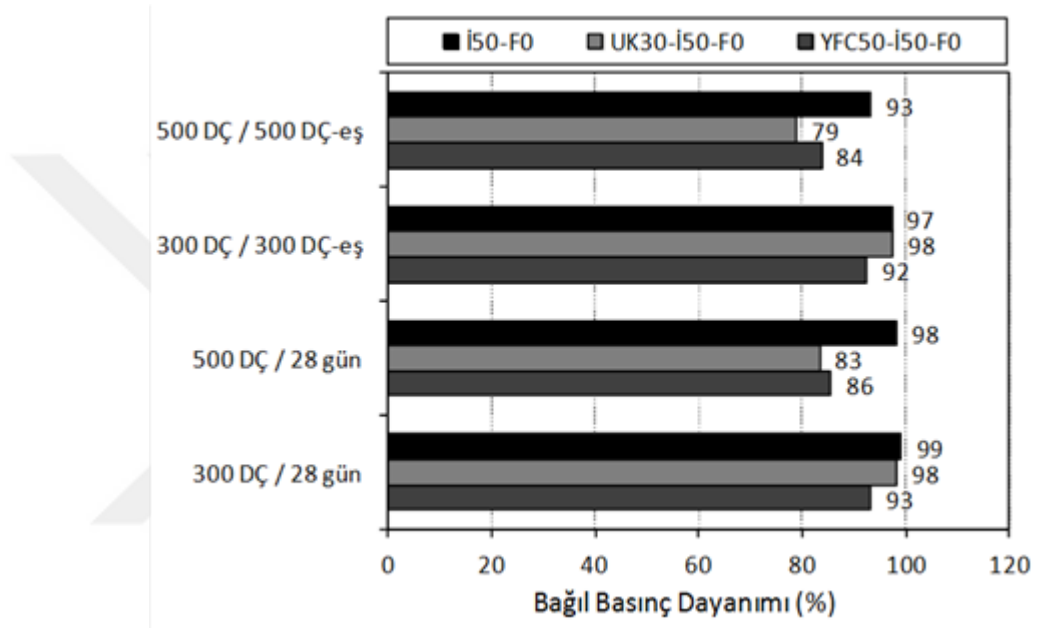
durumunda karışımlarda zıt bir etki görülmüştür. UK ve YFC ikameli lifsiz karışımlar erken yaşta sıcaklık artışı ile en yüksek dayanım artışını sergilerken, 28 gün su kürü sonrası en yüksek dayanım kaybını yaşamıştır. Başka bir deyişle sıcaklık artışı puzolan ikamesi durumunda dayanım kazanma hızını arttırırken, ilerlemiş yaş dayanımlarını kontrol karışımına göre daha olumsuz etkilemektedir. Bu durum, YFC ikameli karışımda en belirgindir



Şekil 8.3 Kuruma ortamında lifsiz karışımlarda kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için 24 saat ve 28 gün bağıl basınç dayanımları

Erken yaşta (24 saat) ideal koşullarda serbest halde tutulan lifsiz serilerin değişik yaşlarda ve DÇ çevrimleri sonrası basınç dayanımları bağıl olarak Şekil 8.4'te sunulmaktadır. Karışımların 300 DÇ sonrası basınç dayanımları, DÇ'ye giriş olan 28. gün dayanımına göre önemli oranda düşmemiştir. 300 DÇ çevrimi süresince eşlenik su küründe tutulan numunelere kıyasla da belirgin bir kayıp yoktur (en fazla %8). Kayıp oranları, 500 DÇ çevrimi sonrası giriş dayanımlarına göre UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla %17 ve %14'e yükselirken, kontrol karışımında hasar belirgin değildir. Çevrime giriş dayanımları İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla 111, 121 ve 132 MPa'dır. 28 günden, eşlenik numunelerin 500 DÇ çevrimi boyunca suda bekleme süresine kadar önemli bir dayanım artışı olmamıştır (en fazla %6). 500 DÇ çevrimine eş su küründeki

numunelere kıyasla dayanım kayıpları, İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla %7, %21 ve %16'dır. Çevrime giriş dayanımları, puzolan ikamesiz karışımdan daha yüksek olan UK ve YFC ikameli karışımların 500 DÇ çevrimi sonrası daha çok hasar görmesi, basınç dayanımı faktöründen ziyade karışımların boşluk yapısı ve agrega – matris arayüzeyi gelişimi ile ilgili olabilir (Ramezianpour ve Malhotra, 1995).

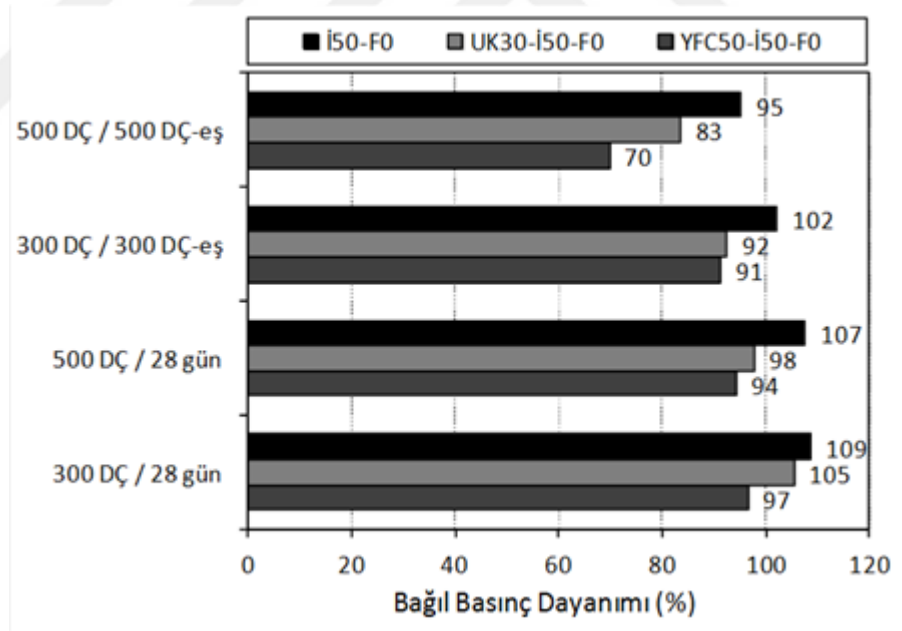


Şekil 8.4 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin bağıl basınç dayanımları

Erken yaşta (24 saat) kuruma koşullarında kısıtlanmış halde tutulan lifsiz serilerin değişik yaşlarda ve DÇ çevrimleri sonrası basınç dayanımları bağıl olarak Şekil 8.5'te sunulmaktadır. Çevrime giriş dayanımları İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla 92, 93 ve 86 MPa'dır. Karışımların 300 DÇ ve 500 DÇ sonrası basınç dayanımları, giriş dayanımlarına kıyasla kayda değer oranda azalmamış, kontrol karışımında kür etkisi baskın çıkmıştır. 300 DÇ sonrası eşlenik dayanımlara kıyasla UK ve YFC ikameli karışım sırasıyla %8 ve %9 dayanım kaybı yaşamıştır. 500 DÇ çevrimi sonrası ise eşlenik dayanımlar referans alınarak İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için dayanım kayıpları sırasıyla %5, %17 ve %30'dur. Aynı değerler ilk 24 saatte serbest halde bekletilmiş numuneler için %7, %21 ve %16'dır (Şekil 8.4). Şekil 8.5'te ise kısıtlanmış numunelerde, ideal

koşullarda saklanan numunelere kıyasla 28 günlük dayanımların İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla %17, %23 ve %35 oranında düşük olduğu görülmüştür.

Erken yaş ortam sıcaklığının 20°C'den 30°C'ye yükseltilmesi sonucu ilerlemiş yaşlarda yaşanan dayanım kayıplarının, basınç dayanımı noktasında önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Bununla birlikte YFC ikameli karışımın eşlenik numune ile kıyaslamada %35 olan 500 DÇ sonrası dayanım kaybı, eşlenik numunelerin erken yaşta hızlı hidratasyonu sonucu ilerlemiş yaşlarda azalan basınç dayanımları da göz önüne alındığında çok şiddetli bir etkiyi göz önüne koymaktadır. Erken yaşta büzülme sonucu gelişmesi muhtemel kılcal çatlakların DÇ çevrimleri sırasında çimento pastası gövdesine su işleyişini kolaylaştırabileceği, yüksek serbest büzülme miktarı ile YFC ikameli karışımın söz konusu etkiyi yarattığı söylenebilir (Corinaldesi ve Moriconi, 2003).



Şekil 8.5 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin bağıl basınç dayanımları

8.2 Donma – Çözülme Çevrimlerinin Lifsiz Serilerin Eğilme Performansına Etkisi

DÇ çevrimlerinin lifsiz serilerin eğilme performansına olan etkisi eğilme dayanımları ve eğilme yükleri altında elde edilen yük – sehım eğrilerinin irdelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımlarına ek olarak eğilme tokluklarının yaşa göre ve DÇ etkisi altında değişimi tespit edilmiştir. İlk gün kuruma koşullarında ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ BN) kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz numuneler ve ideal ortamda (20°C , $\%98\pm 2$ BN) serbest halde bekletilen lifsiz numunelerin standart su kürü (28 gün) sonrası maruz kaldığı 300 ve 500 DÇ çevriminin eğilme performansına etkisi tartışılmıştır.

Şekil 8.6’da ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal koşullarda serbest halde bekletilmiş lifsiz numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası ortalama eğilme yükü – sehım eğrileri sunulmaktadır. Lifli RPB’lerden farklı olarak beklendiği üzere maksimum yük sonrası ani yük düşüşü, diğer bir ifade ile gevrek davranış görülmektedir. 1. gün pik yüklerinin 28 gün su kürü sonrası yükseldiği, uygulanan eğilme yükü başına düşen sehım değerlerinin azaldığı, diğer bir ifadeyle malzemenin rijitlik ve dayanım kazandığı görülmektedir. Bu kazanım, 300 ve 500 DÇ çevrimlerine eş, su küründe bekleyen numunelerde devam etmemiş, 28 günlük performansın belirgin derecede üzerine çıkılmamıştır. İlk 24 saat sonunda eğilme tepe yükü daha düşük olan puzolan ikameli karışımların, 28 gün kür sonrası ikamesiz karışımı (İ50-F0) yakaladığı görülmektedir. Sehım değerleri, tüm kür süresi ve DÇ etkisi altında 0,18 – 0,34 mm arasında değişmektedir. YFC ikameli karışımın tüm yaşlarda tepe yüküne minimum sehım değeriyle ulaştığı görülmektedir.

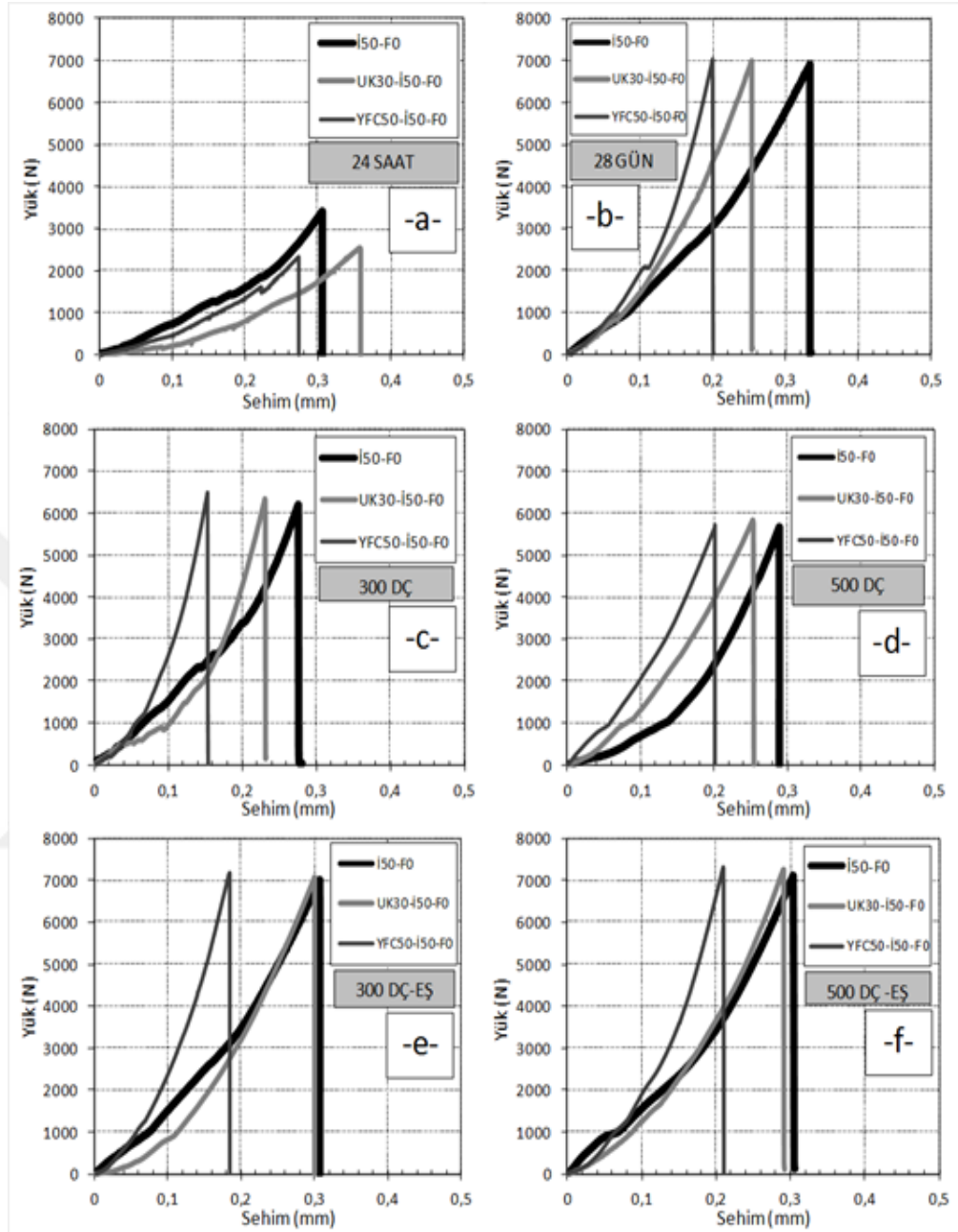
Bu durumun sebebi yüksek inceliği ve yüksek puzolanik aktivitesi ile agrega – matris arayüzeyini güçlendirmesi olabilir. Kırılan numuneler incelendiğinde çatlak yolunun YFC ikameli matrislerde ilk günden itibaren en kısa olduğu görülmüştür. Eğilme deneyi sonrası iki parçaya ayrılan numuneler gözlemsel incelemelere tabi tutulduğunda YFC ikameli matrisin üst mesnet doğrultusunda diğer karışımlara kıyasla daha düz, dolayısıyla daha kısa bir çatlak yoluna sahip olduğu görülmüştür.

DÇ çevrimleri etkisi ile 28 günlük tepe yükleri ilk 300 DÇ çevrimi sonrasında en fazla olmak üzere azalmaktadır. Düşüşler, 500 DÇ çevrimi ile devam etse de en büyük düşüş ilk 300 DÇ çevriminde oluşmuştur. Düşüş oranı, karışımlar için benzerdir. Maksimum sehım değerleri, DÇ etkisi ile önemli oranda değişmemektedir.

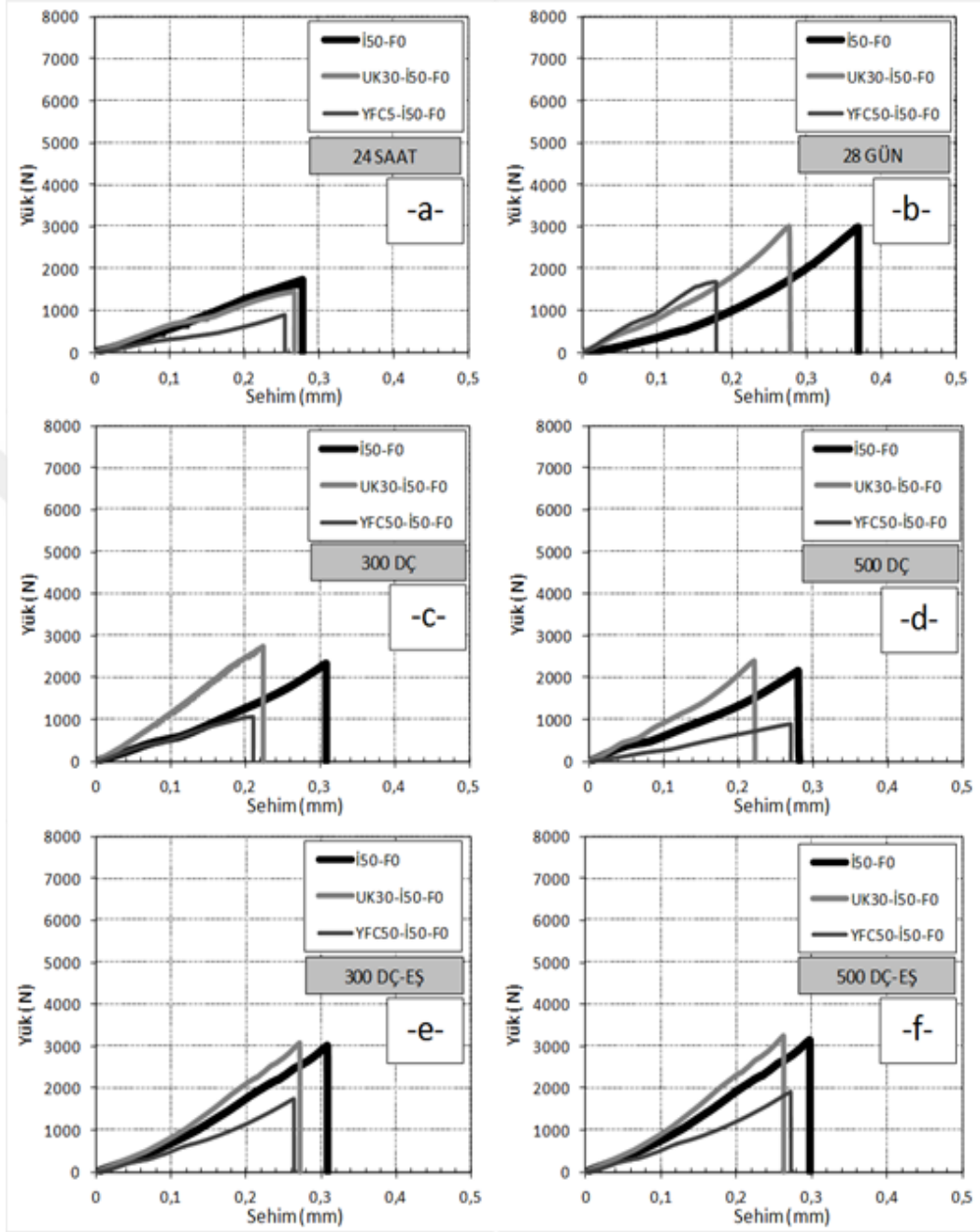
Şekil 8.7’de ilk 24 saat kalıp içerisinde kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilmiş lifsiz numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası ortalama eğilme yükü – sehım eğrileri sunulmaktadır. Kısıtlanmış haldeki numunelerin saklandığı ortam 30°C iken, serbest haldeki ideal koşullarda ortam sıcaklığı 20°C idi. Sıcaklık artışı, erken yaş basınç dayanımı gelişimlerini hızlandırırken, ilerlemiş yaşlarda nihai dayanımları düşürmekte idi. Ancak eğilmede sıcaklığın olumsuz etkisi erken yaşlardan itibaren görülmektedir. İdeal koşullarda serbest haldeki serilere göre tepe yükleri önemli oranda düşmekte, düşüş kür süresinin artışıyla toparlanamamaktadır. Erken yaşta kısıtlama etkisinde gözle görülen çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir.

Eğilme yükleri altında büzülme çatlakları içeren matrisin yüklemeye karşı direnci azalmakta, numunenin orta kesitindeki çatlaklardan göçme oluşabilmektedir. 28 gün su kürü altında ilk gün elde edilen tepe yükleri artmıştır. Artış, erken yaş kuruma büzülmesi değeri en fazla olan YFC karışımında en azdır. Diğer bir ifadeyle kısıtlanmış büzülme, YFC ikameli matriste en büyük hasarı yaratmaktadır. Liflerin de yalın matrislerde bulunmayışı, büzülme çatlaklarına karşı hassasiyeti arttırmaktadır.

DÇ çevrimleri sonucu tepe yükleri azalmakta, özellikle YFC ikameli matrisin birim yük başına düşen ve maksimum sehım değerleri artmaktadır. Eşlenik numunelerin uzun süren su kürlerine rağmen 28 günlük tepe yükü değerlerine kıyasla kayda değer oranda yük artışı gözlenmemektedir. İkamesiz karışımın sehım değeri uzatılmış su kürü değerlerinde düşerken, YFC ikameli karışımında artmaktadır. Rijitlik artışı ile malzeme gevrekleşmekte iken, büzülmesi en fazla YFC ikameli karışımın bu davranışı sergilemediği söylenebilir.

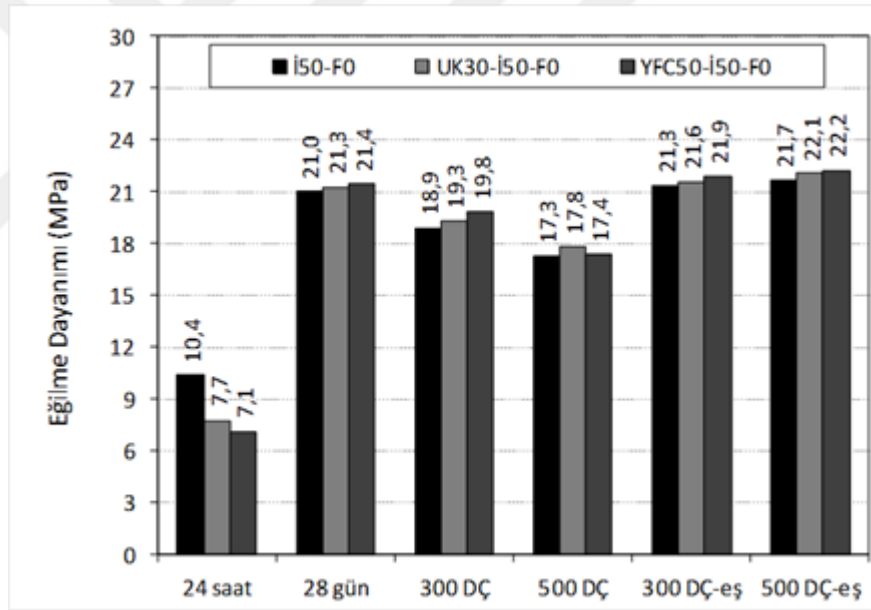


Şekil 8.6 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 DÇ sonrası (c), 500 DÇ sonrası (d), 300 DÇ eşlenik (e), 500 DÇ eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri



Şekil 8.7 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 DÇ sonrası (c), 500 DÇ sonrası (d), 300 DÇ eşlenik (e), 500 DÇ eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri

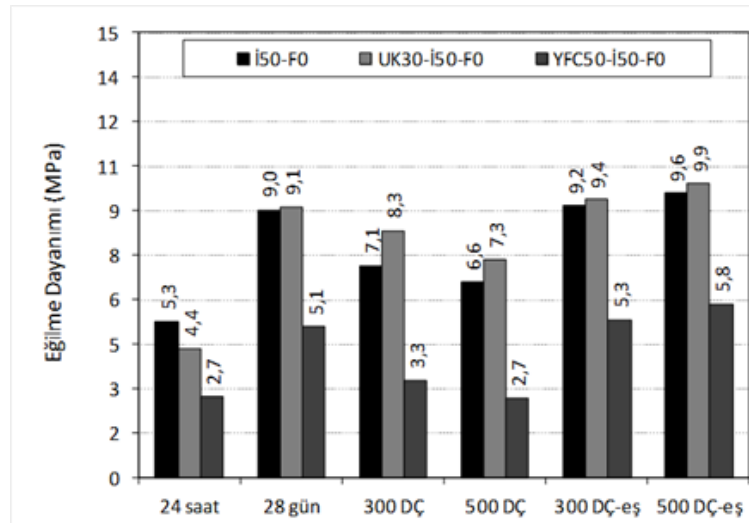
Şekil 8.8’de ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal koşullarda serbest halde bekletilmiş lifsiz serilerin, çevrimler öncesi ve sonrası eğilme dayanımları sunulmaktadır. 24 saatlik dayanımlar incelendiğinde İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımlarının eğilme dayanımları sırasıyla 10,4, 7,7 ve 7,1 MPa elde edilmiştir. Bu değerler 28 günlük su kürü ardından 21,0, 21,3 ve 21,4’e yükselmiştir. 1 günlük eğilme dayanımlarının puzolan ikamesi ile düştüğü görülmektedir. İdeal koşullarda kür edilen RPB karışımlarının 300 DÇ çevrimi sonrasında 1,6 ila 2,0 MPa, 500 DÇ çevrimi sonrasında 3,5 ila 4 MPa dayanım kaybı yaşadığı görülmektedir. Eşlenik numunelerin uzatılmış su kürü ile eğilme dayanımları 28 günlük dayanımlarla kıyaslandığında kayda değer oranda yükselmemektedir.



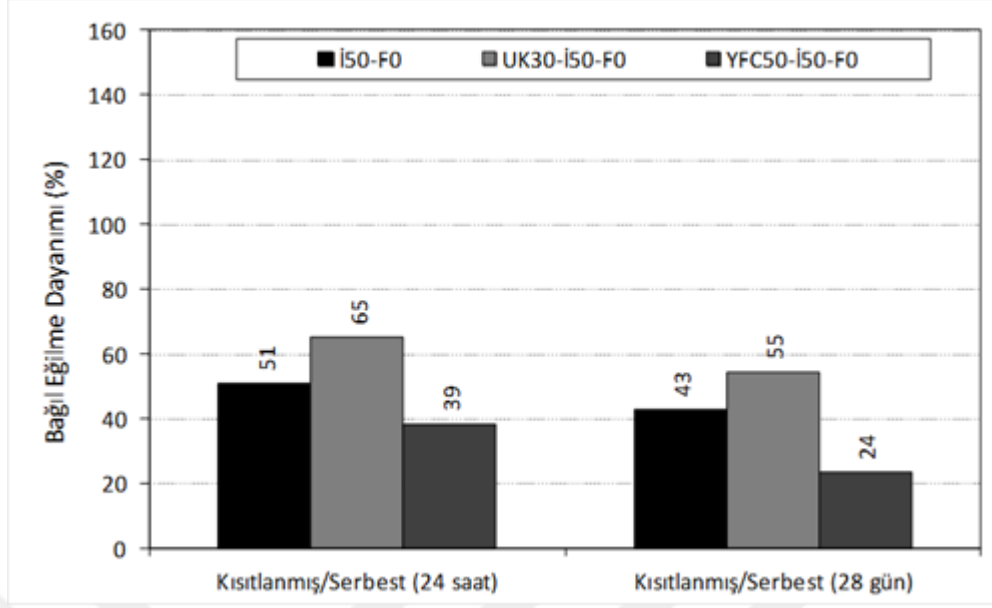
Şekil 8.8. İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin eğilme dayanımları

Şekil 8.9’da ilk 24 saat kalıp içerisinde kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilmiş lifsiz numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası eğilme dayanımları sunulmaktadır. İlk 24 saatte İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için eğilme dayanımları sırasıyla 5,3, 4,4 ve 2,7 MPa bulunmuştur. 28 günlük standart kür sonrası dayanımlar sırasıyla 9,0, 9,1 ve 5,1 MPa mertebesine yükselmiştir. 300 ve 500 DÇ çevrimi sonrası eğilme dayanımları düşmektedir. İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için 300 DÇ sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 7,1, 8,3

ve 3,3 MPa, 500 DÇ sonrası ise sırasıyla 6,6, 7,3 ve 2,7 MPa elde edilmiştir. YFC ikameli karışımın eğilme dayanımı 28 günde ve sonrasında gerek kısıtlanmış büzülme çatlaklarının gerekse DÇ çevrimlerinin etkisiyle geleneksel harç dayanım mertebesine inmektedir. Eşlenik numunelerin dayanımları incelendiğinde, 28 gün su kürü sonrasında artışın kayda değer olmadığı (<0,8 MPa) görülmektedir. DÇ sonrası eğilme dayanımı kaybının ilk 300 DÇ çevrimi sonucu en fazla YFC50-İ50-F0 ve İ50-F0 karışımında olduğu görülmektedir. 500 DÇ sonrası eğilme dayanımı kaybı ilk 300 DÇ çevrimine kıyasla daha azdır. DÇ etkisi ile lifsiz yalın matrisin büzülme çatlakları genişlemektedir. Ancak, büzülme çatlaklarının eğilme dayanımlarına verdiği hasar özellikle YFC ikameli karışımında diğer karışımlara kıyasla baskındır. Şekil 8.10'da kuruma koşullarında kısıtlanmış serilerin dayanımı, ideal koşullarda serbest halde tutulmuş serilere kıyasla bağıl olarak verilmektedir. Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının ilk 24 saatte verdiği hasar %49 – 61 aralığında olup, hasar kontrol karışımı ve YFC ikameli karışımında en fazladır. 28 gün kür edilen büzülme çatlaklı kısıtlanmış seriler ile ideal koşullarda 28 gün kür edilen seriler arasındaki eğilme dayanımı farkı, ilk güne göre büyümektedir. Diğer bir ifadeyle ilk gün oluşan büzülme çatlaklarının sonradan su kürü ile iyileştirilmesi mümkün olmamaktadır. Bu sebeple ilk gün alınacak önlemler, karışımın eğilme performansı ve kalıcılığına doğrudan etki edecektir. Kısıtlama sebebiyle 28 gün su kürü sonrası eğilme dayanımı düşüşü İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla %57, %45 ve %76'dır.

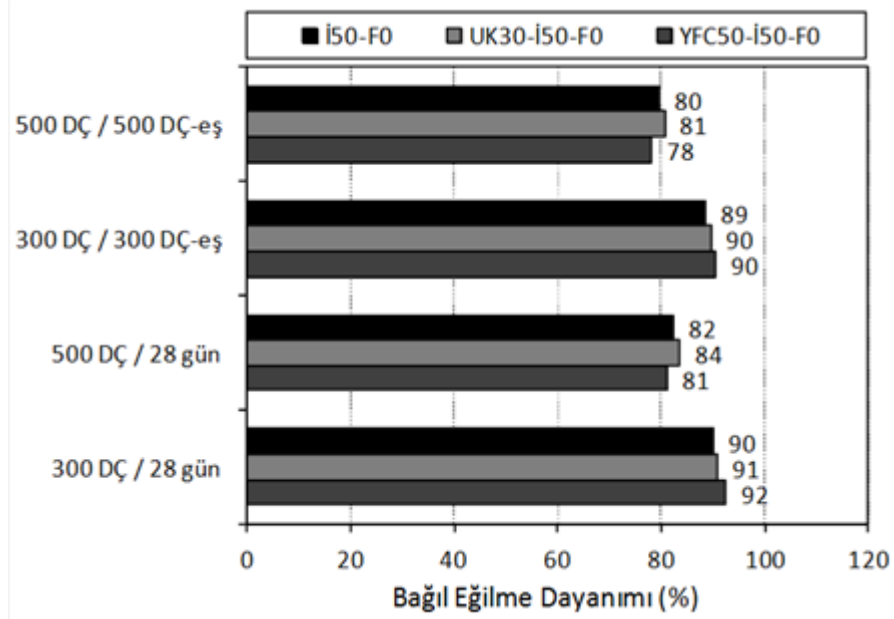


Şekil 8.9 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin eğilme dayanımları



Şekil 8.10 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için lifsiz serilerin 24 saat ve 28 gün bağıl eğilme dayanımları

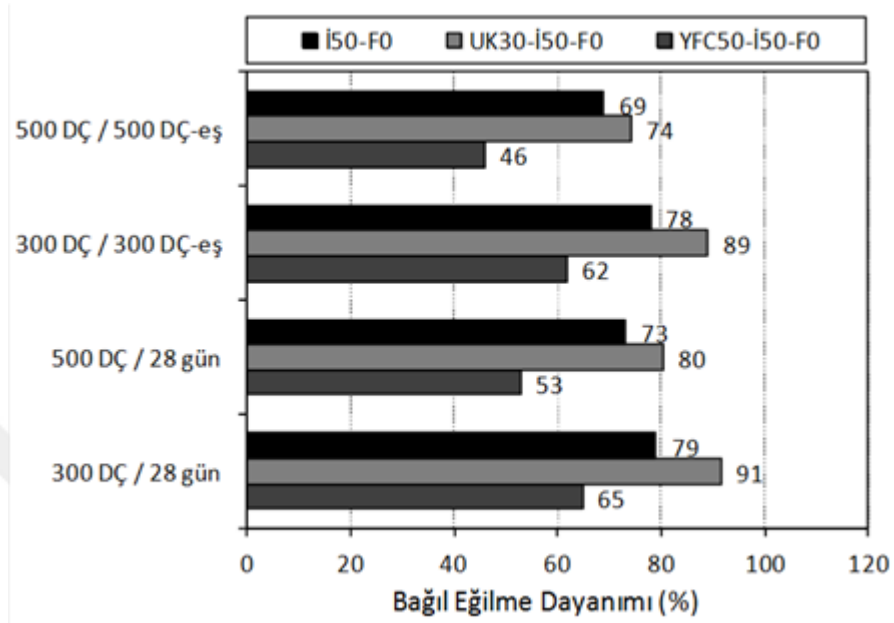
Şekil 8.11’de erken yaşta (24 saat) ideal koşullarda serbest halde tutulan lifsiz serilerin değişik yaşlarda ve DÇ çevrimleri sonrası eğilme dayanımları bağıl olarak sunulmaktadır. Karışımların 300 DÇ sonrası eğilme dayanım kayıpları, DÇ’ye giriş dayanımına göre (28 gün) İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla %10, %9 ve %8’dir. 500 DÇ sonrasında aynı değerler sırasıyla %18, %16 ve %19’dur. Karışımların hasar mertebeleri birbirine benzerdir. DÇ süresince eşlenik suda bekleyen numunelere kıyasla İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla 300 DÇ çevrimi sonrasında %11, %10 ve %10, 500 DÇ çevrimi sonrasında %20, %19 ve %22 eğilme dayanımı kaybı görülmüştür. Eşlenik dayanımlara kıyasla da kayıp oranları karışımlar için birbirine benzerdir. Lifsiz karışımların hasar mertebesi, gerek 300 gerekse 500 DÇ sonrasında lifli hallerinden %12 ila %15 daha fazladır. Liflerin, DÇ etkisi ile genişlemeye ve uzamaya çalışan çatlakları kısıtladığı söylenebilir (Atiş ve Karahan, 2007; Schulson, 1998). Gözlemsel incelemelerde lifsiz karışımlarda kapak atma başlangıçlarının olduğu, numunelerin şişme eğiliminde olduğu görülmüştür. Özellikle bu etkiler, kalıp yüzeylerinde, duvar etkisinin olduğu bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Lifler, matrisin dağılmasını geciktirmektedir. Lifsiz matrisler ise gerek büzülme koşullarında gerekse DÇ etkileri altında çatlak hassasiyeti yüksek olan karışımlardır.



Şekil 8.11 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin bağıl eğilme

Erken yaşta kuruma koşullarında, kısıtlanmış halde tutulan serilerin değişik yaşlarda ve DÇ çevrimleri sonrası eğilme dayanımları bağıl olarak Şekil 8.12’de sunulmaktadır. Karışımların 300 DÇ sonrası eğilme dayanımı kayıpları, DÇ’ye giriş dayanımına göre (28 gün) İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla %21, %9 ve %35’dir. 500 DÇ sonrasında aynı değerler sırasıyla %27, %20 ve %53’tür. 300 DÇ çevrimi sonrası eşlenik numunelere kıyasla İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla %22, %11 ve %38 oranında dayanım kaybı yaşanmıştır. 500 DÇ çevrimi sonrası eşlenik numunelere kıyasla İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla %31, %26 ve %54 oranında eğilme dayanımı kaybı oluşmuştur. Hasar, DÇ çevrimindeki artışla belirginleşmektedir. En büyük kayıp, serbest büzülmesi yüksek YFC karışımındadır. Lifsiz karışımlarda kısıtlanmış büzülme sebebiyle oluşan hasar, DÇ çevrimleri sebebiyle oluşan hasardan daha baskındır. Ancak, kısıtlanmış büzülme çatlaklarının DÇ çevrimleri ile genişleyebildiği görülmüştür. Genişleyen çatlaklara biriken çözme suyu, ilerlemiş çevrimlerde hasarı şiddetlendirebilir. Oluşan hasar oranlarının, lifli RPB’den fazla olduğu, özellikle lifli ve lifsiz karışımlar arasındaki farkın giriş dayanımlarına göre hasar oranları incelendiğinde belirginleştiği görülmüştür. Kısıtlanmış büzülme çatlakları nedeniyle lifsiz matrislerin, lifli matrislere göre daha büyük mekanik hasar uğraması, uzatılmış su kürlü eşlenik numunelerin dayanımının

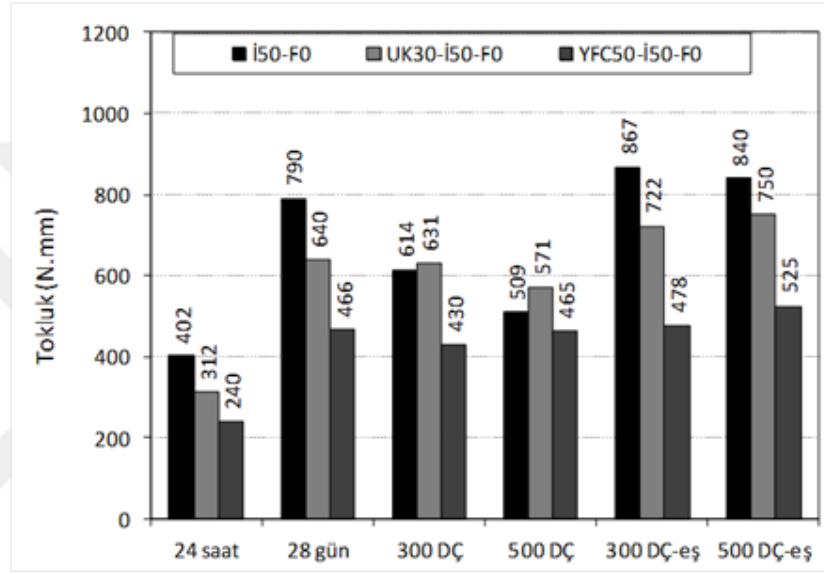
28 gün sonrası artmamasına sebep olarak bu sonucu doğurmuştur. Genel bir ifadeyle, matris hasarı yalnızca DÇ dayanıklılığını değil, mekanik performansı da olumsuz etkilemiştir.



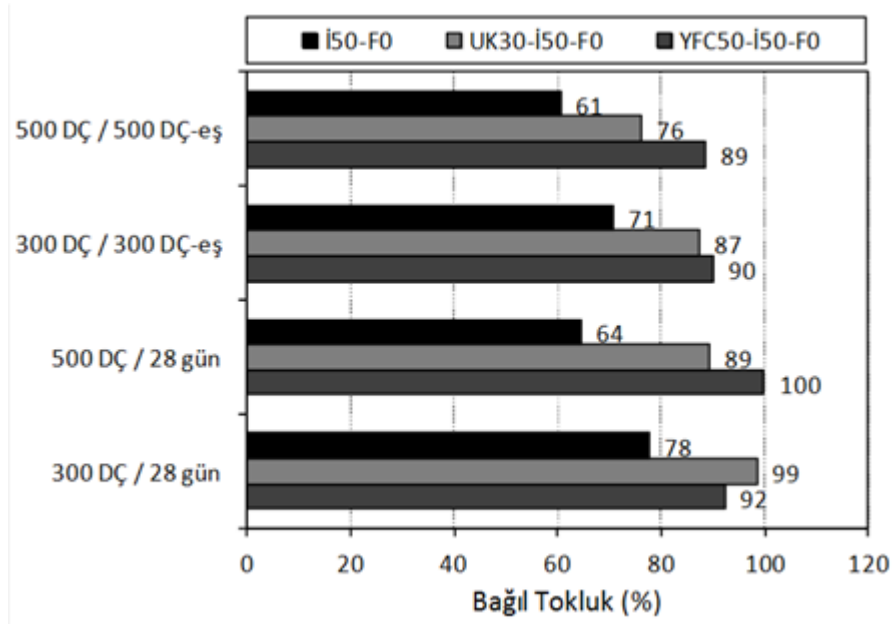
Şekil 8.12 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin bağıl eğilme dayanımları

Şekil 8.13'te ideal koşullarda serbest halde kür edilen lifsiz serilerin tokluk değerleri verilmektedir. 1 gün sonunda elde edilen tokluk değerleri İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla 402, 312 ve 240 N.mm'dir. Bu değerler, 28 gün su kürü sonrasında tepe yüklerindeki artış ile birlikte nerdeyse 2 katına çıkmıştır. 28 gün su kürü görmüş karışımların tokluk değerleri, lifli hallerinin 1/11'i ila 1/13'ü mertebesindedir. Diğer bir ifadeyle lif takviyesi yapılmamış matrisler oldukça gevreklerdir. Su kürünün uzatılması ile tokluklar artmaktadır. En düşük artış, YFC içeren matristedir. YFC içeren matrisin çok düşük sehim değerlerinde tepe yüküne ulaşması, daha rijit bir matris olması bu sonucu doğurmaktadır. DÇ çevrimleri sonucu en belirgin olarak kontrol karışımının tokluk değeri azalmaktadır. Şekil 8.14'te bağıl tokluk değerleri verilmektedir. Giriş dayanımlarına kıyasla belirgin tokluk kaybının 300 ve 500 DÇ çevrimi için sırasıyla %22 ve %36 oranlarıyla kontrol karışımında olduğu görülmektedir. Eşlenik numunelere kıyasla da benzer eğilim görülmektedir. Karışımların DÇ etkisi sonucu

oluşan tokluk değişimleri, temel olarak iki etmene bağlıdır. Birincisi DÇ çevrimleri sonucu tepe yüklerinde (dayanımda) azalma, ikincisi ise sehim değerlerindeki azalış veya artıştır. DÇ çevrimleri sonucu hasar mertebesi yüksek olan YFC ikameli karışımda sehim değeri artarken, tepe yükü azalmaktadır. Düşen tepe yüküne paralel olarak sehim değerlerinde artış görülmesi, matris – agrega arayüzeyinde DÇ etkisi ile gelişen mikro hasarın eğilme yükleri altında çatlak yolunun uzamasına sebep olması, diğer bir ifadeyle matrisi sünekleştirmesidir.



Şekil 8.13 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin toklukları

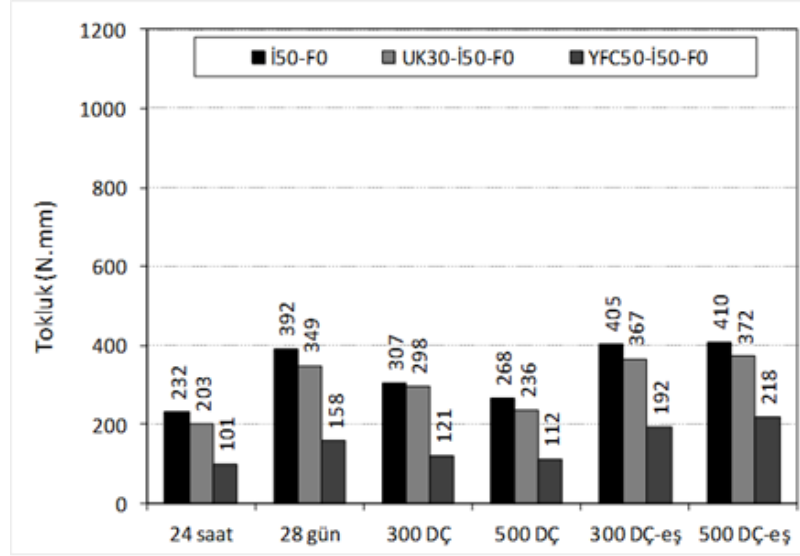


Şekil 8.14 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin bağlı toklukları

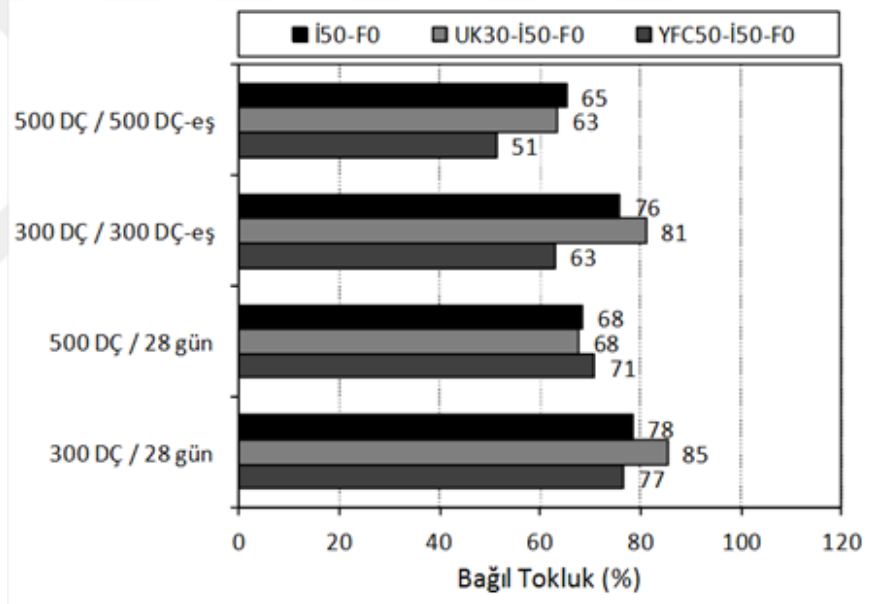
Şekil 8.15'te erken yaşta kısıtlanmış durumda kuruma ortamında tutulan lifsiz serilerin tokluk değerleri verilmektedir. 1 gün sonunda elde edilen tokluk değerleri İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla 232, 203 ve 101 N.mm'dir. Bu değerler, 28 gün su kürü sonrasında tepe yüklerindeki artış ile birlikte yaklaşık 1,5 katına çıkmaktadır. Şekil 8.13 ve Şekil 8.15 kıyaslandığında kısıtlamanın, dayanım kayıplarına benzer olarak tokluklar üzerinde de olumsuz etkisi olduğu görülmektedir. YFC ikameli karışımların tokluk değerleri, UK ikameli karışım ve kontrol karışımına göre oldukça düşüktür. Serbest büzülme değeri en fazla olan YFC ikameli karışımın kısıtlanması durumunda oluşan çatlaklar, eğilme dayanımlarındaki düşüş ile birlikte tokluk değerlerini de olumsuz etkilemiştir.

Su kürünün uzatılmasıyla YFC ikameli karışımın tokluk değeri artarken, diğer karışımlarda önemli bir artış oluşmamıştır. DÇ etkisi ile tüm karışımların tokluk değerleri azalmaktadır. Düşüşler, Şekil 8.16'da bağıl olarak tokluk değerleri cinsinden sunulmaktadır. 300 DÇ çevrimi sonunda, çevrime giriş tokluklarına göre kayıp oranları İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 için sırasıyla %22, %15 ve %23'tür. 500 DÇ çevrimi sonrası kayıplar sırasıyla %32, %32 ve %29'a yükselmektedir. Eşlenik numunelerdeki tokluklara kıyasla İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için kayıp oranları 300 DÇ sonrası sırasıyla %24, %19 ve %37'dir. Bu değerler 500 DÇ çevrimi sonrası sırasıyla %35, %37 ve %49'a yükselmektedir.

Kısıtlamanın etkisinin en şiddetli olarak görüldüğü YFC ikameli karışımda, tokluk kaybı oranı en fazladır. Yalın matrislerin tokluk kayıpları, matristeki büzülme çatlaklarından, bu çatlaklara sızan suların donarak çatlakları genişletmesinden, ayrıca agrega – matris arayüzeyinde oluşan hasarlardan kaynaklanabilir. DÇ çevrimleri sonucu oluşan hasarların, lifli kompozitlerde büzülme çatlaklarını köprüleme potansiyeli de olan lifler ile matris arayüzey bölgesindeki muhtemel değişikliklerden daha çok etkileneceği söylenebilir.



Şekil 8.15 İlk 24 saat kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz serilerin toklukları



Şekil 8.16 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür koşulları için lifsiz serilerin 24 saat ve 28 gün bağlı toklukları

8.3 Genel Değerlendirme

Erken yaş kısıtlanmış büzülme çatlaklarının Kontrol, UK ve YFC ikameli üç farklı lifsiz reaktif pudra betonu karışımının mekanik özelliklerine ve donma – çözülme direncine etkisinin araştırıldığı bölümde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- 28 günde 111 MPa olan kontrol karışımı basınç dayanımı, yüksek oranda uçucu kül (%30) ve yüksek fırın cürufu (%50) ikamesiyle sırasıyla 121 ve 132 MPa'ya yükseltilebilmektedir.
- Kısıtlanmış ortamda erken yaş sıcaklığının artışı lifsiz RPB'nin uzun dönemli dayanımlarında belirgin düşüşler yaratmaktadır.
- Erken yaşta ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz RPB'ler, 300 DÇ sonrası önemli oranda hasar görmezken, 500 DÇ çevrimi sonrası %21'e varan basınç dayanımı kaybına uğramıştır. Kısıtlama durumunda 500 DÇ çevrimi sonrası hasar, en fazla büzülmeye sahip YFC ikameli karışımda maksimum olmak üzere %30'a (eşlenik numunelere kıyasla) ulaşmıştır. İdeal koşullarda bekletilmiş numunelerdeki DÇ hasarı gelişimi ses geçiş hızı ile belirgin şekilde takip edilemezken, kısıtlanmış büzülme çatlaklarına sahip numunelerde belirlenebilmektedir. Ses geçiş hızlarındaki düşüş miktarı ile basınç dayanımı kayıpları arasında ise güçlü bir ilişki elde edilememiştir.
- Erken dönemde ölçülen büzülme değeri arttıkça, kısıtlanmış büzülme çatlak uzunlukları ve genişlikleri artmaktadır. Eğilme dayanımları, çatlaklardaki artışla belirgin oranda düşmektedir. Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının eğilme dayanımları üzerinde yarattığı düşüş, kontrol karışımı, UK ikameli ve YFC ikameli karışımlar için sırasıyla %57, %45 ve %76 olarak elde edilmiştir. Bir başka deyişle büzülmeden kaynaklı çatlaklar önemli mertebede mekanik performans kaybına yol açmaktadır.
- İdeal koşullarda kür edildikten sonra DÇ çevrimine maruz kalan lifsiz RPB'lerde 300 çevrim sonrası büyük bir eğilme dayanımı kaybı oluşmazken, 500 çevrim

sonucu eşlenik numunelere kıyasla %20, giriş dayanımına kıyasla %10 mertebesinde mertebesinde kayıp oluşmuştur. Kısıtlanmış numunelerde ise 300 ve 500 DÇ çevrimi sonucu, çevrime giriş eğilme dayanımlarına göre kontrol karışımı, UK ikameli ve YFC ikameli karışımlar için sırasıyla %21, %9 ve %35 kayıp oluşmuştur. Aynı değerler 500 DÇ sonrasında %27, %20 ve %38'e yükselmiştir.

- Lifsiz RPB'ler gevrek bir davranış sergilemiş, eğilme yüklemesinde tepe yükünden sonra ani kırılma oluşmuştur. DÇ etkisinde toklukta düşüşler oluşmuştur. Tokluktaki kayıpların sebebi, tepe yükünün düşüşü ve maksimum sehim değerlerindeki düşüş olabilmektedir. YFC ikameli karışımların tokluk değerleri, UK ikameli karışım ve kontrol karışımına göre oldukça düşüktür. Serbest büzülme değeri en fazla olan YFC ikameli karışımın kısıtlanması durumunda oluşan çatlaklar, eğilme dayanımlarındaki düşüş ile birlikte tokluk değerlerini de olumsuz etkilemiştir. Kısıtlama sebebiyle YFC ikameli matriste oluşan tokluk kaybı, DÇ etkisi ile artmaktadır.

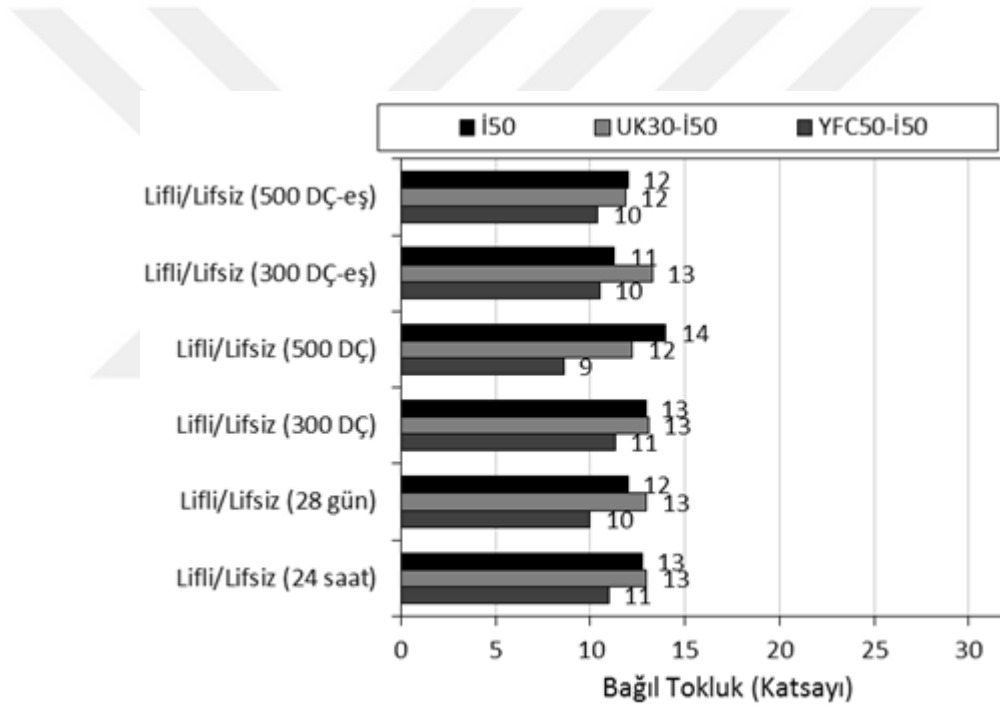
Genel bir değerlendirme olarak lifsiz matrislerin erken yaş büzülme çatlakları hassasiyetinin, lifli matrislere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Büzülme çatlakları, DÇ etkisi ile oluşan hasarı şiddetlendirmektedir.

BÖLÜM DOKUZ

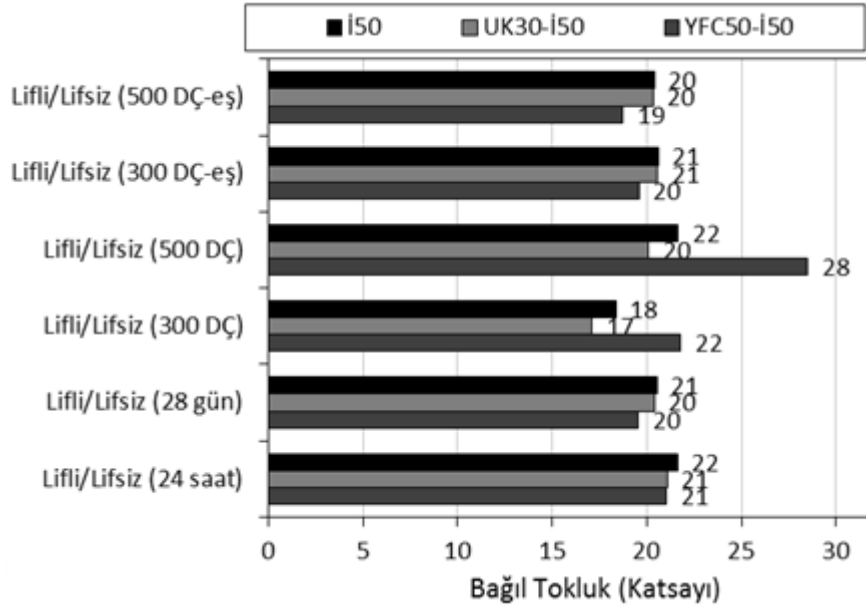
DONMA – ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİNİN LİFLİ VE LİFSİZ SERİLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN KIYASLANMASI

Şekil 9.1’de ilk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin lif kullanılması ile bağlı tokluklarının değişimi sunulmaktadır. Lif kullanımının yoğun mikroyapılı matrisin gevrek davranışını olumlu yönde değiştirdiği görülmektedir.

Lifsiz karışım çok düşük tokluk değerlerine sahipken, lif kullanımı ile dayanımın artışıyla birlikte tokluklar da artmaktadır. %2 lif ilavesi ile yalın matrisin tokluğu tüm karışımlar için 9 ila 14 kat artmıştır.



Şekil 9.1 ilk 24 saat ideal koşulda serbest halde bekletilen serilerin lif ilavesi ile bağlı tokluklarının değişimi

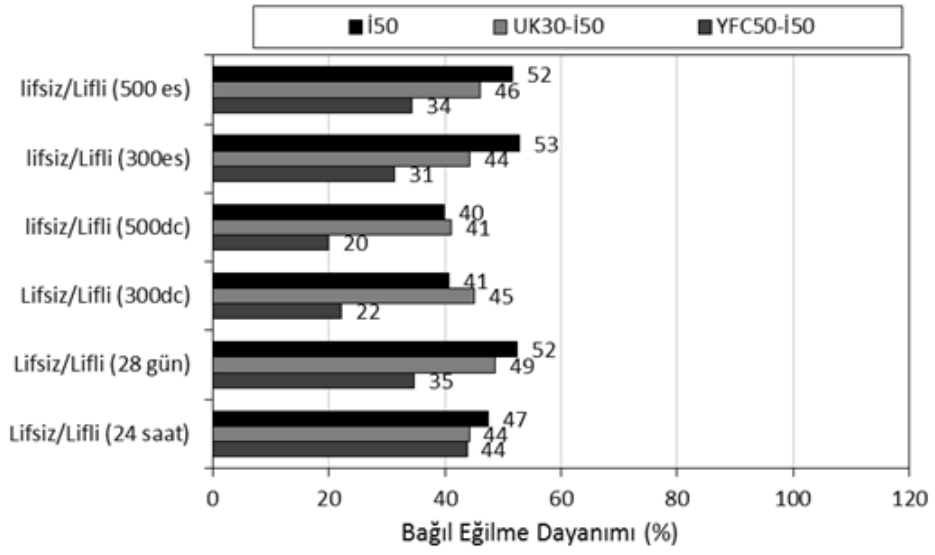


Şekil 9.2 ilk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin lif kullanımı ile bağıl tokluklarının değişimi

Şekil 9.2’de ilk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin lif kullanımı ile bağıl tokluklarının değişimi sunulmaktadır. Kısıtlanmış büzülme çatlakları, eğilme pik yükünü ve sehim değerini genellikle olumsuz etkilemektedir. . Kısıtlama sonucu maksimum sehim değerleri de düştüğünden tokluk değerleri azalmaktadır. Toklukların da eğilme dayanımlarına paralel olarak bu durumdan olumsuz etkilendiği görülmektedir. %2 lif ilavesi ile yalın matrisin tokluğu tüm karışımlar için 17 ila 28 katına yükselmiştir.

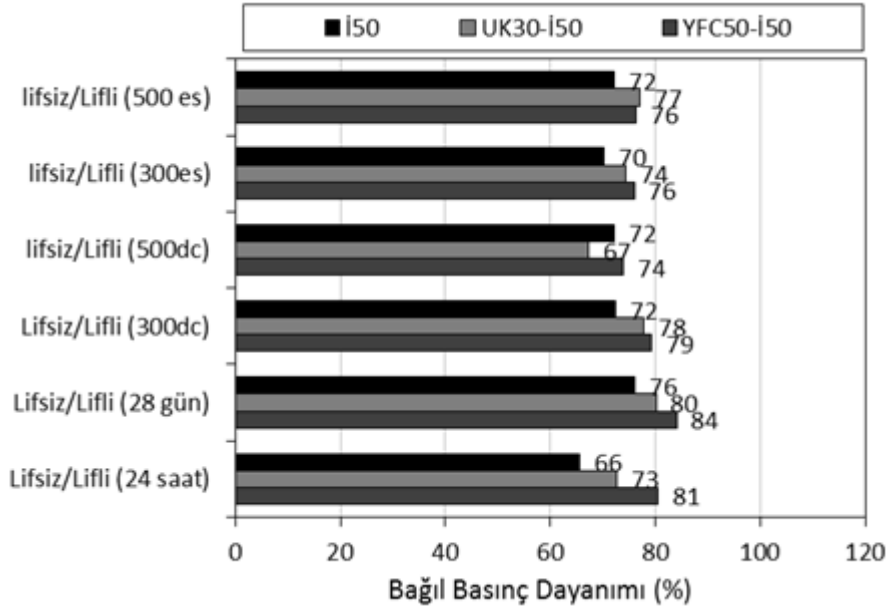
Kısıtlanmış serilerde lif kullanımının tokluk performansına etkisi kısıtlanmamış serilere kıyasla daha yüksektir. Bu durum kısıtlanmış serilerde yalın matrisin daha fazla çatlaması ile açıklanabilir.

Şekil 9.3’te ilk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin lif kullanılması ile bağıl eğilme dayanım değişimi sunulmaktadır.. Lifsiz karışıma kıyasla lifli serilerin eğilme dayanımı daha yüksektir. Bu Şekli incelendiğinde lifsiz serilerde oluşan hasarın 300 ve 500 DÇ sonrası dayanımlara yansıdığı görülmektedir. Lifli ve lifsiz seriler arasındaki dayanım farkı DÇ etkisi ile daha belirgindir.



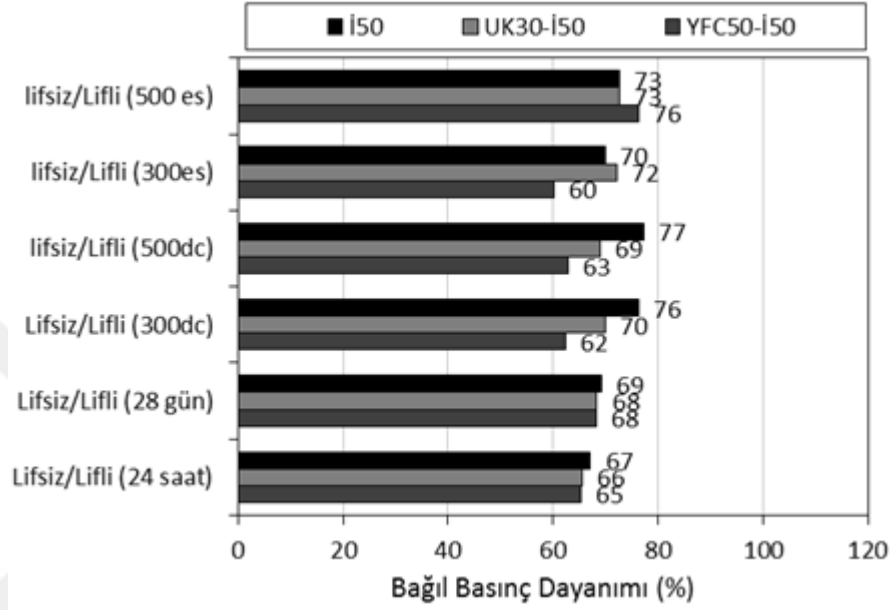
Şekil 9.3 ilk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin lif kullanımı ile bağıl eğilme dayanımlarının değişimi

Şekil 9.4'te ilk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin lif kullanılması ile bağıl basınç dayanımı değişimi sunulmaktadır. Lifli karışımların basınç dayanımları lifsiz karışımlar ile kıyasla daha yüksektir. Lifsiz serilerin basınç dayanımı lifli serilere kıyasla tüm karışımlarda %16 ila %34 daha düşüktür.



Şekil 9.4 ilk 24 saat ideal koşulunda serbest halde bekletilen serilerin lif kullanımı ile bağıl basınç dayanımının değişimi

Şekil 9.5'te ilk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin lif kullanılması ile bağıl basınç dayanım değişimi sunulmaktadır. İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen lifsiz seriler lifli serilere kıyasla tüm karışımlarda %33 ila %40 daha düşük basınç dayanımı göstermiştir.



Şekil 9.5 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin lif kullanımı ile bağıl eğilme dayanımlarının değişimi

BÖLÜM ON

DONMA – ÇÖZÜLME ÇEVİRİMLERİNİN ÖRNEKLERİN ULTRASONİK SES GEÇİŞ HIZINA ETKİSİ

Ultrasonik test cihazı ile betonun içerisine gönderilen ses üstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçme süresi ölçülüp, dalga hızı hesaplanmaktadır. Bulunan bu ses üstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki elde edilmektedir. Beton numunenin bir yüzeyinden gönderilen ses üstü dalganın diğer yüzeyine ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$(V= S/t x 10^3) \quad (10.1)$$

V = Ses üstü dalga hızı (km/sn),

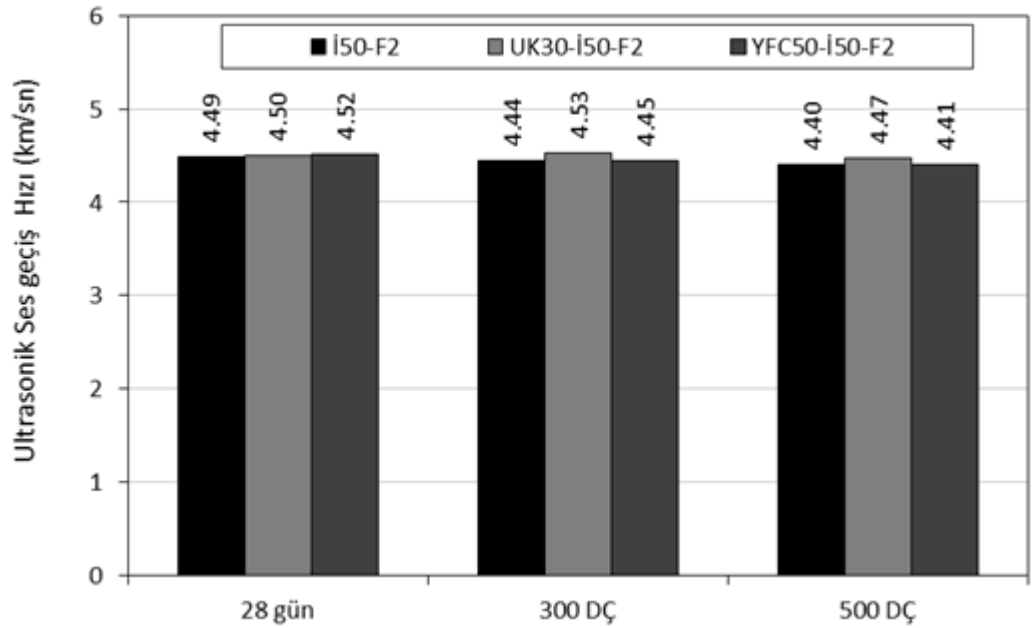
S = Numunenin ses üstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (metre),

t = Ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı diğer yüzeye kadar geçen zaman (mikro saniye) (Erdoğan, 1997).

10.1 Lifli Serilerin Ses Geçiş Hızları

Numunelerin DÇ çevrimlerindeki durumunu takip etmek için tahribatsız yöntemlerden olan ultrasonik ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Sürelerden, ses geçiş hızları hesaplanmıştır. Şekil 8.1’de ilk 24 saat serbest halde ideal koşullarda bekletilen lifli karışımların, 28 gün su kürü, 300 DÇ ve 500 DÇ geçirdikten sonraki ses geçiş hızları sunulmaktadır. İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için 28 gün su kürü sonrası sırasıyla 4,49, 4,50 ve 4,52 km/sn geçiş hızı elde edilmiştir. Karışımların basınç dayanımları aynı yaşta 146, 151 ve 157 MPa elde edilmişti. 300 DÇ çevrimi sonrası ses hızları 28 güne kıyasla 0,03 ila 0,07 km/sn azalmıştır. 300 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımları İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 152, 153 ve 155 MPa elde edilmişti. 500 DÇ çevrimi sonrası 28 güne göre ultrasonik ses geçiş hızları 0,03 ila 0,09 km/sn azalarak

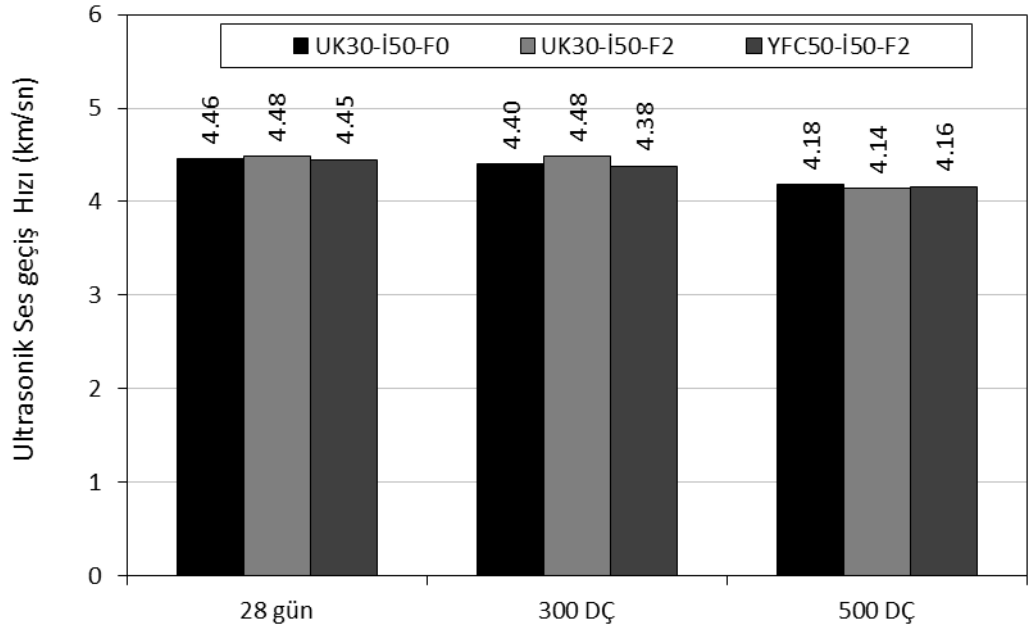
İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 4,06, 4,09 ve 4,16 km/sn bulunmuştur. 500 DÇ sonrası elde edilen basınç dayanımları sırasıyla 151, 150 ve 153 MPa'dır. Numunelerin maruz kaldığı DÇ çevrimi sayısının artışıyla ses geçiş hızlarının azaldığı, azalışın 500 DÇ çevrimi sonrasında belirginleştiği görülmektedir. 28 gün su kürüne kıyasla 300 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımı kaybı tüm karışımlar için maksimum %1 iken, 500 DÇ çevrimi sonrasında maksimum %3 olarak kaydedilmiştir. Ultrases hızlarında belirgin bir düşüş oluşması için basınç dayanımı kaybindan ziyade çevrim sayısındaki artış etkilidir. Tekrarlı donma ve çözülme etkileri sonucu matriste ve arayüzeylerde oluşan hasarın basınç dayanımına etkisinin mekanik deneylerle kaydedilebildiği 500 DÇ çevrimi sonucu ses hızları belirgin mertebede azalmaktadır. Geçiş hızlarındaki azalış oranları ise basınç dayanımı kayıp yüzdeleri ile güçlü bir ilişkiye sahip değildir.



Şekil 10.1 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifli serilerin ses geçiş hızları

Şekil 10.2'de ilk 24 saat kısıtlanmış halde kuruma koşullarında bekletilen lifli karışımların, 28 gün su kürü, 300 DÇ ve 500 DÇ geçirdikten sonraki ses geçiş hızları sunulmaktadır. 28 gün su kürü sonrası İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için ses geçiş hızları sırasıyla 4,32, 4,36 ve 4,43 km/sn, basınç dayanımları ise sırasıyla 133, 136 ve 126 MPa elde edilmiştir. 300 DÇ çevrimi sonrası

hızlar aynı sırayla 4,26, 4,28 ve 4,31 km/sn iken dayanımlar sırasıyla 131, 140, 133 MPa'dır. 500 DÇ sonrası İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için ses geçiş hızları 4,06, 4,09 ve 4,16 km/sn iken, basınç dayanımları sırasıyla 128, 132 ve 129 MPa'dır. Kısıtlanmış serilerde ses geçiş hızlarında özellikle 500 DÇ çevrimi sonrası büyük düşüş olmuştur. Bununla beraber basınç dayanımlarındaki kayıp aynı oranda değildir. Şekil 10.1'da da basınç dayanımları ile geçiş hızları arasında güçlü bir ilişki kurulamasa da dayanım düşüşünün ses geçiş hızı ölçümleriyle yakalanabileceği belirlenebilmiştir. Ultrasonik ses geçiş hızı ölçümleri, kısıtlanmış numunelerin alın bölgelerindeki pimler sebebiyle prizmaların kısa mesafelerinden, 160 mm uzunluk boyunca farklı noktalardan alınmıştır. Yani ultrasonik cihaz problemleri arası ölçüm mesafesi sadece 40 mm'dir. 28 günlük dayanımlar, 300 ve 500 DÇ çevrimi sonrası azalmamıştır. Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının basınç dayanımı sonuçlarına büyük etki yapmadığı söylenebilir. Numunelerde 40x40 mm'lik tüm kesiti geçebilen ve gözle görülebilen çatlaklar, ses geçiş hızlarını önemli derecede etkilemektedir. Bu çatlakların, çevrimler sırasında sızan ve donan su ile genişlemesi, daha çok orta kısımda bulunan çatlak yoğunluğunun eğilme sonrası basınç deneylerine yansımaması bu sonucu yaratmış olabilir.



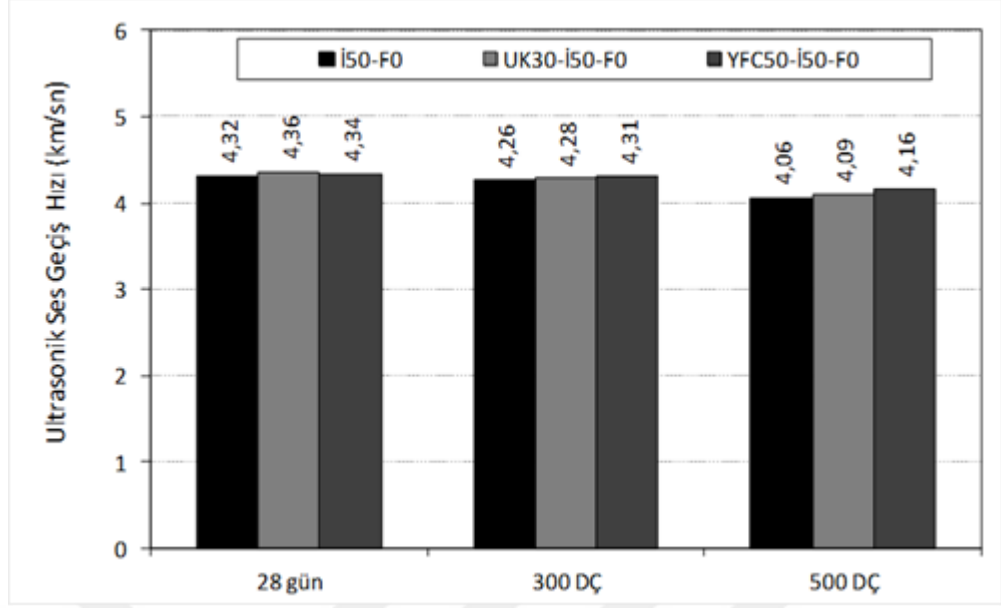
Şekil 10.2 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin ses geçiş hızları

10.2 Lifsiz Serilerin Ses Geçiş Hızları

Lifsiz numunelerinde DÇ çevrimlerindeki ultrasonik ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Sürelerden, ses geçiş hızları hesaplanmıştır. Şekil 8.3'te ilk 24 saat serbest halde ideal koşullarda bekletilen lifsiz karışımların, 28 gün su kürü, 300 DÇ ve 500 DÇ geçirdikten sonraki ses geçiş hızları sunulmaktadır. İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için 28 gün su kürü sonrası sırasıyla 4,32, 4,36 ve 4,34 km/sn geçiş hızı elde edilmiştir. Karışımların basınç dayanımları aynı yaşta 111, 121 ve 132 MPa elde edilmişti. 300 DÇ çevrimi sonrası ses hızları 28 güne kıyasla 0,03 ila 0,08 km/sn azalmıştır. 300 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımları İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla 110, 119 ve 123 MPa elde edilmişti. 500 DÇ çevrimi sonrası 28 güne göre ultrasonik ses geçiş hızları 0,18 ila 0,27 km/sn azalarak İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için sırasıyla 4,06, 4,09 ve 4,16 km/sn bulunmuştur. 500 DÇ sonrası elde edilen basınç dayanımları sırasıyla 109, 101 ve 113 MPa'dır.

Numunelerin maruz kaldığı DÇ çevrimi sayısının artışıyla ses geçiş hızlarının azaldığı, azalışın 500 DÇ çevrimi sonrasında belirginleştiğı görölmektedir. 28 gün su kürüne kıyasla 300 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımı kaybı tüm karışımlar için maksimum %7 iken, 500 DÇ çevrimi sonrasında maksimum %14 olarak kaydedilmiştir.

Ultrases hızlarında belirgin bir düşüş oluşması için basınç dayanımı kaybından ziyade çevrim sayısındaki artış etkilidir. Tekrarlı donma ve çözölme etkileri sonucu matriste ve arayüzeylerde oluşan hasarın basınç dayanımına etkisinin mekanik deneylerle kaydedilebildiğı 500 DÇ çevrimi sonucu ses hızları belirgin mertebede azalmaktadır. Geçiş hızlarındaki azalış oranları ise basınç dayanımı kayıp yüzdeleri ile güçlü bir ilişkiye sahip değıldir.



Şekil 10.3 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz serilerin ses geçiş hızları

Şekil 10.4’de ilk 24 saat kısıtlanmış halde kuruma koşullarında bekletilen lifsiz karışımların, 28 gün su kürü, 300 DÇ ve 500 DÇ geçirdikten sonraki ses geçiş hızları sunulmaktadır. 28 gün su kürü sonrası İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için ses geçiş hızları sırasıyla 4,29, 4,27 ve 4,12 km/sn, basınç dayanımları ise sırasıyla 92, 93 ve 86 MPa elde edilmiştir.

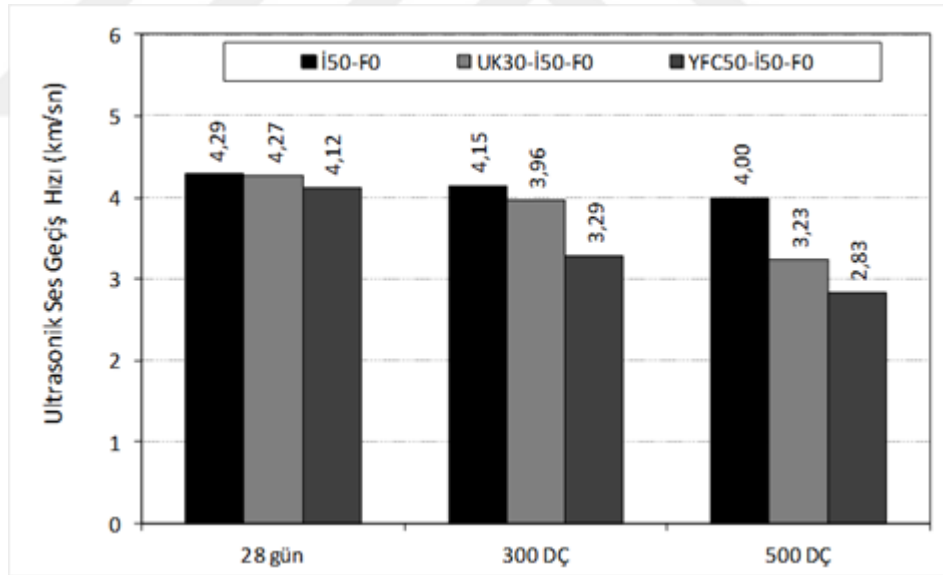
300 DÇ çevrimi sonrası hızlar aynı sırayla 4,15, 3,96 ve 3,29 km/sn iken dayanımlar sırasıyla 100, 98, 83 MPa’dır. 500 DÇ sonrası İ50-F0, UK30-İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 karışımları için ses geçiş hızları 4,00, 3,23 ve 2,83 km/sn iken, basınç dayanımları sırasıyla 99, 91 ve 81 MPa’dır. Kısıtlanmış serilerde ses geçiş hızlarında özellikle 500 DÇ çevrimi sonrası büyük düşüş olmuştur. Bununla beraber basınç dayanımlarındaki kayıp aynı oranda değildir.

Basınç dayanımları ile geçiş hızları arasında güçlü bir ilişki kurulamasa da dayanım düşüşünün ses geçiş hızı ölçümleriyle yakalanabileceği belirlenebilmiştir. Ultrasonik ses geçiş hızı ölçümleri, kısıtlanmış numunelerin alın bölgelerindeki pimler sebebiyle prizmaların kısa mesafelerinden, 160 mm uzunluk boyunca farklı noktalardan alınmıştır. Aynı işlem, değişkenlik yaratmaması adına ideal koşullarda kısıtlanmadan saklanmış (pimsiz) numunelerde de uygulanmıştır. Yani ultrasonik

cihaz problemleri arası ölçüm mesafesi sadece 40 mm'dir. 28 günlük dayanımlar, 300 ve 500 DÇ çevrimi sonrası önemli oranda azalmamıştır. Ancak özellikle kısıtlanmış numunelerde 300 ve 500 DÇ çevrimi sonrası kötü kalitede bir betonda görülebilecek bir ses geçiş hızları tespit edilmiştir (<4 km/sn).

Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının basınç dayanımı sonuçlarına büyük etki yapmadığı, ancak ilerlemiş çevrim sayıları ile birlikte ses geçiş hızlarında büyük farklılıklar oluşturduğu söylenebilir.

Numunelerde 40×40 mm'lik tüm kesiti geçebilen ve gözle görülebilen çatlaklar, ses geçiş hızlarını önemli derecede etkilemektedir. Bu çatlakların, çevrimler sırasında sızan ve donan su ile genişlemesi, daha çok orta kısımda bulunan çatlak yoğunluğunun eğilme sonrası basınç deneylerine yansımaması bu sonucu yaratmış olabilir.



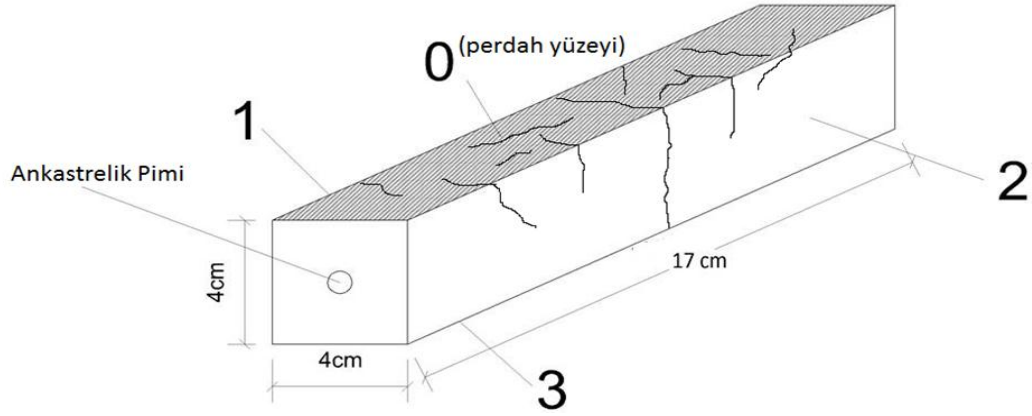
Şekil 10.4 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin ses geçiş hızları

BÖLÜM ONBİR

BÜZÜLME ÇATLAKLARININ VE DONMA – ÇÖZÜLME ORTAMINDAKİ DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ

Çalışma kapsamında erken yaşta 30°C, %50 BN ortamında ankastrelik pimleri ile kısıtlanmış halde bekletilmiş numunelerde çatlak uzunluk ve açıklıkları incelenmiştir. Numuneler, kısıtlanmış kalıptan 24 saat sonra çıkarılmış ve 28 gün standart su kürüne bırakılmıştır. 28. günün sonunda DÇ koşullandırması başlatılmıştır. Şekil 11.1’de verilen 40×40×170mm’lik numunelerin, 28 gün su kürü sonrası ve 500 DÇ çevrimi sonrası çatlak gelişimleri izlenmiştir. Çalışmada, dijital çatlak mikroskobu ile sistematik taramalar gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte fotoğraf makinesi ile tüm yüzeyler fotoğraflanarak genel görünüm kayıt altına alınmıştır. Numune yüzeyleri: perdah yüzeyi (0), yan yüzeyler (1 ve 2) ve alt yüzey olmak üzere 3 ana grupta değerlendirilmiştir (Şekil 11.1). Bunun sebebi, çatlakların yüzeysel olup olmadığının, derinliği olan çatlakların en kesit boyunca ilerleyip ilerlemediğinin anlaşılmasıdır. Yan iki yüzey (1 ve 2), çatlak karakteri, yönlenmesi ve bunlara DÇ çevrimlerinin etkisi adına farklı fikirler veremeyeceğinden tek bir yüzey olarak ortak şekilde değerlendirilmiştir. Çatlak incelemeleri 5’er numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dallanarak yön değiştirmemiş ve karakteri benzer her bir çatlak, tek çatlak olarak kendi içinde değerlendirilmiştir. Numunenin her bir yüzeyindeki çatlak uzunlukları ve açıklıkları bulunmuştur. Ardından, genel değerlendirme için toplam çatlak uzunluğu ve toplam çatlak yüzeyi alanı tanımlanmıştır. Her bir yüzeydeki çatlak uzunlukları, yüzey fotoğraflarının ölçeklenmesi ile bulunmuştur. Ortalama çatlak açıklıkları ise yön değiştirmemiş ve benzer karakterdeki her bir çatlaktan alınan en az üç ölçüm ile belirlenmiştir. Her bir çatlak için tespit edilen ortalama çatlak açıklıkları, farklı çatlaklar olarak tanımlanan çatlak sayısına bölünerek ilgili yüzeyin ortalama çatlak açıklığı tespit edilmiştir. Kısıtlama sebebiyle oluşan çatlaklar, DÇ çevrimlerinden sonra her bir numune üzerinde tekrardan bulunarak incelenmiştir. Ayrıca, 500 DÇ çevrimi sırasında yeni gelişen, büzülme çatlaklarının devamı veya dalı olmayan çatlaklar da değerlendirmeye alınmıştır. Sözü edilen incelemeler, lifli RPB’ler için Tablo 11.1’de sunulmaktadır. Tablo 11.1’de perdah yüzeyi (üst yüzey) 0, yan yüzeyler (1 ve 2) ve

alt yüzey (3) isimlendirmeleri kullanılmıştır. Çatlak uzunlukları mm, ortalama çatlak açıklıkları ise μm cinsinden verilmiştir. Çatlak yüzeyi alanları, çatlak uzunlukları ve ortalama çatlak çaplarının çarpımı ile mm^2 cinsinden tanımlanmıştır. Tablo 11.1’de verilen ortalama çatlak açıklığı, her numunenin aynı yüzeyinde ölçülen ortalama çatlak açıklığının, numuneler bazındaki ortalamasıdır. Çatlak uzunluğu ise her bir yüzeydeki toplam çatlak uzunluklarının numuneler bazındaki ortalamasıdır. Toplam sütununda verilen değerler ise yüzey farkı gözetmeksizin her bir karışımın numune başına düşen ortalama toplam çatlak uzunlukları ve ortalama toplam çatlak yüzey alanlarıdır.



Şekil 11.1 Kısıtlanmış numunelerde yüzey isimlendirmesi

Tablo 11.1 Lifli RPB’lerin 28 gün ve 500 DÇ çevrimi sonrası çatlak uzunlukları ve ortalama açıklıkları

Karışım	Ölçülen Değer	28 Gün				500 Çevrim			
		Üst (0)	Yan (1+2)	Alt (3)	Toplam	Üst (0)	Yan (1+2)	Alt (3)	Toplam
İ50-F2	Çatlak Uzunluğu (mm)	102	18	0	120	103	18	0	121
	Ort. Çatlak Açıklığı (μm)	82,1	32,0	0	-	83,9	33,0	0	-
	Çatlak Yüzeyi Alanı (mm^2)	8,4	0,6	0	9,0	8,6	0,6	0	9,2
UK30-İ50-F2	Çatlak Uzunluğu (mm)	140	21	0	161	141	21	0	162
	Ort. Çatlak Açıklığı (μm)	61,0	44,2	0	-	63,4	45,8	0	-
	Çatlak Yüzeyi Alanı (mm^2)	8,5	0,9	0	9,4	8,9	1,0	0	9,9
YFC50-İ50-F2	Çatlak Uzunluğu (mm)	171	22	0	193	174	23	0	197
	Ort. Çatlak Açıklığı (μm)	155,0	60,8	0	-	158,6	69,7	0	-
	Çatlak Yüzeyi Alanı (mm^2)	26,6	1,3	0	27,9	27,5	1,6	0	29,2

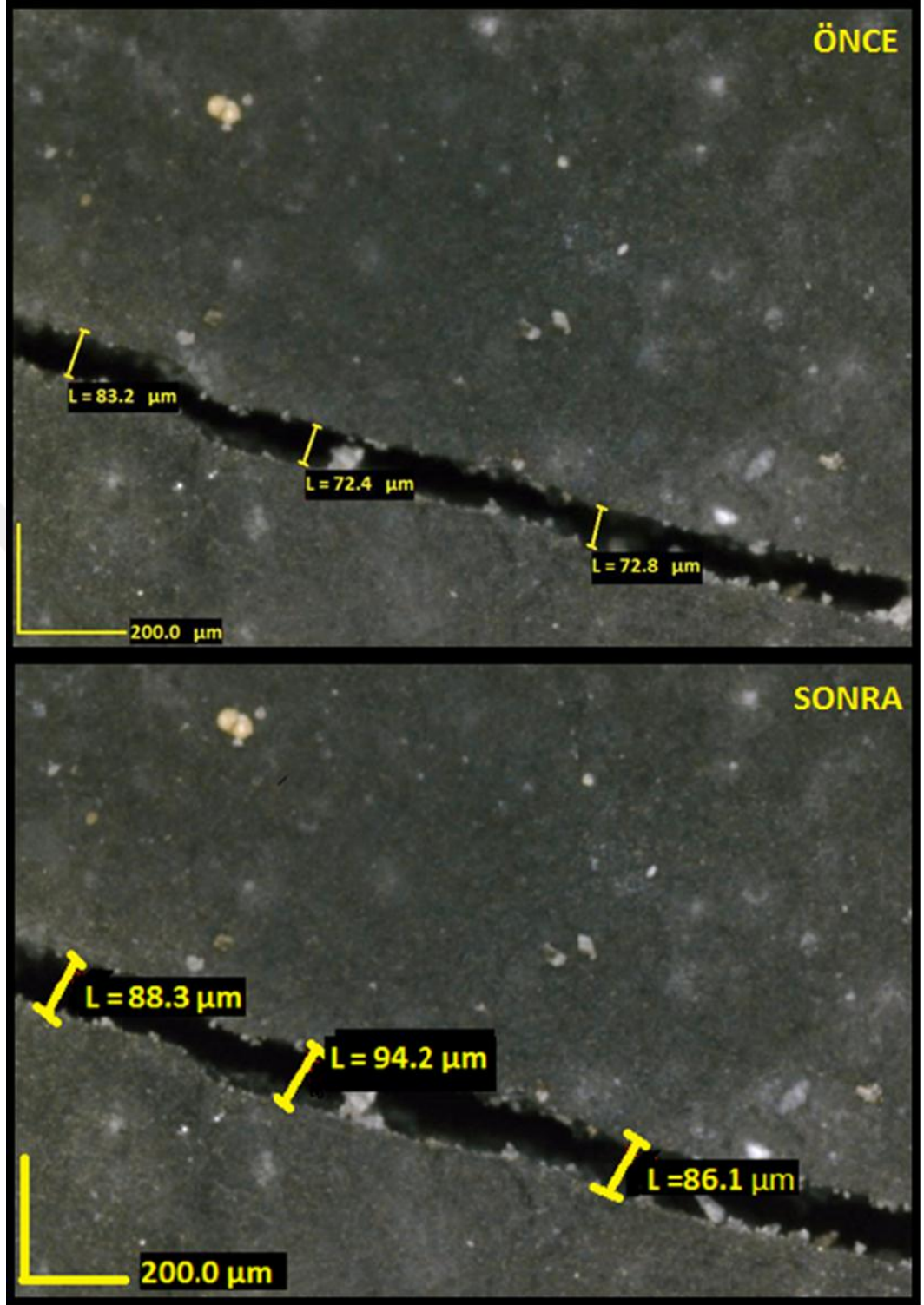
Ort. : ortalama

Lifli RPB’ler incelendiğinde çevrimler öncesi kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kurumaya doğrudan maruz kalan üst yüzeyde en büyük uzunlukta oluştuğu, çatlak

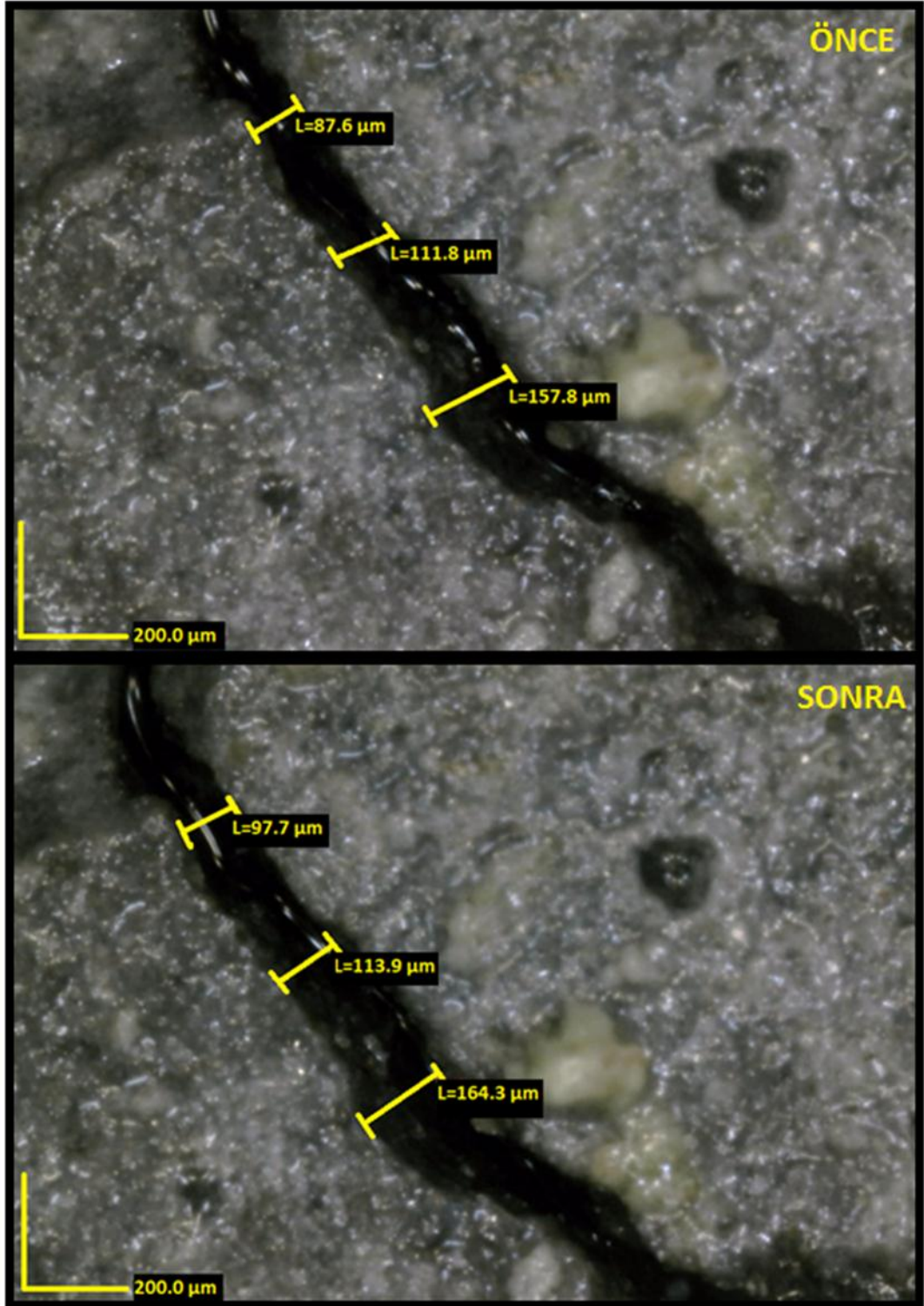
açıklıklarının da bu yüzeyde en fazla olduğu görülmektedir (Tablo 11.1). Yan yüzeylerin çatlak açıklıkları, üst yüzeydeki çatlak açıklıklarının %40'ı ile %70'i mertebesindedir. Çatlak uzunlukları ise üst yüzeyin 1/10'u mertebesindedir. Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kalıp alt yüzünde oluşmadığı veya üst ve yan yüzeydeki çatlakların kalıp alt yüzüne ulaşmadığı görülmektedir. İ50-F2 karışımı için ortalama toplam çatlak uzunluğu 120 mm, ortalama çatlak yüzey alanı ise 9 mm²'dir. Aynı değerler sırasıyla UK30-İ50-F2 karışımı için 16,1 mm, 9,4 mm², YFC50-İ50-F2 karışımı için 193 mm, 27,9 mm²'dir.

Erken yaşta okunan serbest büzülme miktarları arttıkça çatlak uzunluk ve genişlikleri artmaktadır. DÇ çevrimleri sonucu çatlak uzunluk ve açıklıkları önemli oranda artmamıştır. Toplam değerlerdeki artışlar incelendiğinde, çevrime giriş değerlerine kıyasla 4 mm çatlak uzunluğu ve 1,7 mm² ortalama çatlak açıklığı artışı ile en fazla YFC ikameli karışımın hasar gördüğü anlaşılmaktadır.

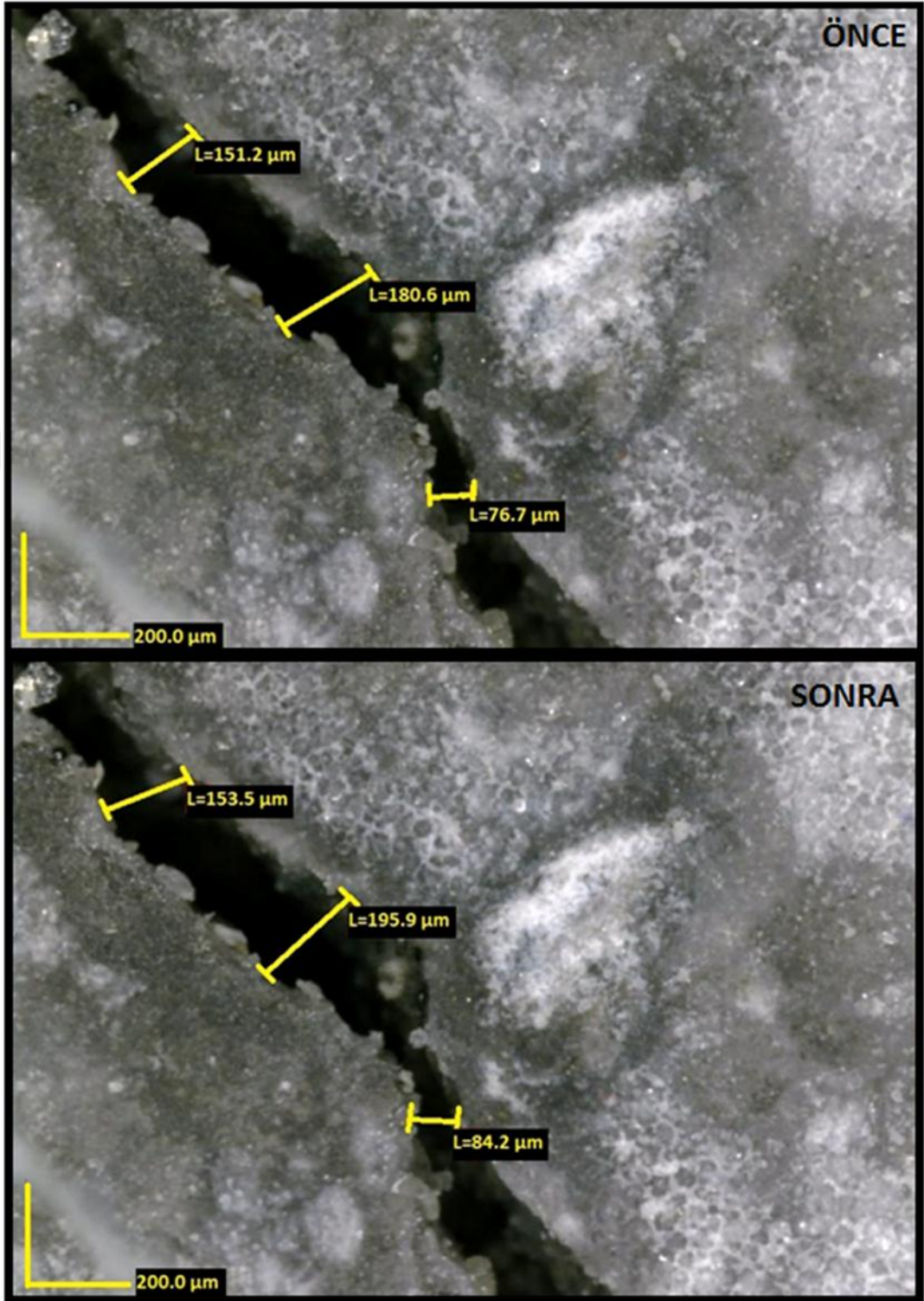
DÇ çevrimleri sonrası lifli karışımlardaki üst ve yan yüzey büzülme çatlaklarının alt yüzeye erişemediği görülmüştür. Ayrıca, çatlak mikroskobu incelemelerinde geniş çatlakların DÇ etkisi ile dar çatlaklara kıyasla daha çok genişlediği görülmüştür. Şekil 11.2'de İ50-F2, Şekil 11.3'te UK30-İ50-F2 ve Şekil 11. 4'te YFC50-İ50-F2 karışımlarındaki en geniş çatlaklarının olduğu bölgelerin DÇ çevrimi öncesi ve sonrası halleri aynı ölçekte sunulmaktadır. DÇ etkisi ile çatlakların bariz şekilde genişlediği görülmektedir. Bu durumun iki temel sebebi vardır. Birincisi çatlaklar RPB gövdesinin geçirimsizliğini arttırarak su girişini kolaylaştırmaktadır. Böylece tüm numune hacminde DÇ etkisi şiddetlenebilmektedir. İkincisi ise çözme işlemi sonrasında çatlaklarda göllenmiş olan suyun donarak makro seviyede hasar yaratmasıdır. Büzülme çatlaklarının tetiklediği DÇ sonrası yeni çatlak dallanmalarında ve oluşumlarında birincil etki, mevcut büzülme çatlaklarının genişlemesinde ikincil etkinin baskın olduğu söylenebilir.



Şekil 11.2 İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlaklarının 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali



Şekil 11.3 UK30-I50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlağının 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali



Şekil 11.4 YFC50-İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlağının 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali

Şekil 11.5'te İ50-F2, Şekil 11.6'da UK30-İ50-F2 ve Şekil 11.7'de YFC50-İ50-F2 karışımlarından en çok hasar gören numunenin 28 gün su kürü sonrası ve 500 DÇ çevrimi geçirmiş hali sunulmaktadır. Kontrol karışımında DÇ etkisi ile dallanan bir üst yüzey çatlağı görülmektedir (Şekil 11.5).

DÇ etkisi sonucu kontrol karışımında dağılma oluşmamıştır. UK ikameli karışımında, kısıtlanmış büzülmenin yarattığı parazit gerilmelere dik yönde yüzey çatlakları genişleyerek makro boyutta görünürlükleri artmıştır (Şekil 11.6). YFC ikameli karışımında da benzer durum vardır. Fotoğraflarda görünürlüğü düşük olan çatlaklar, genişleme etkisi ile görünür hale gelmiştir.

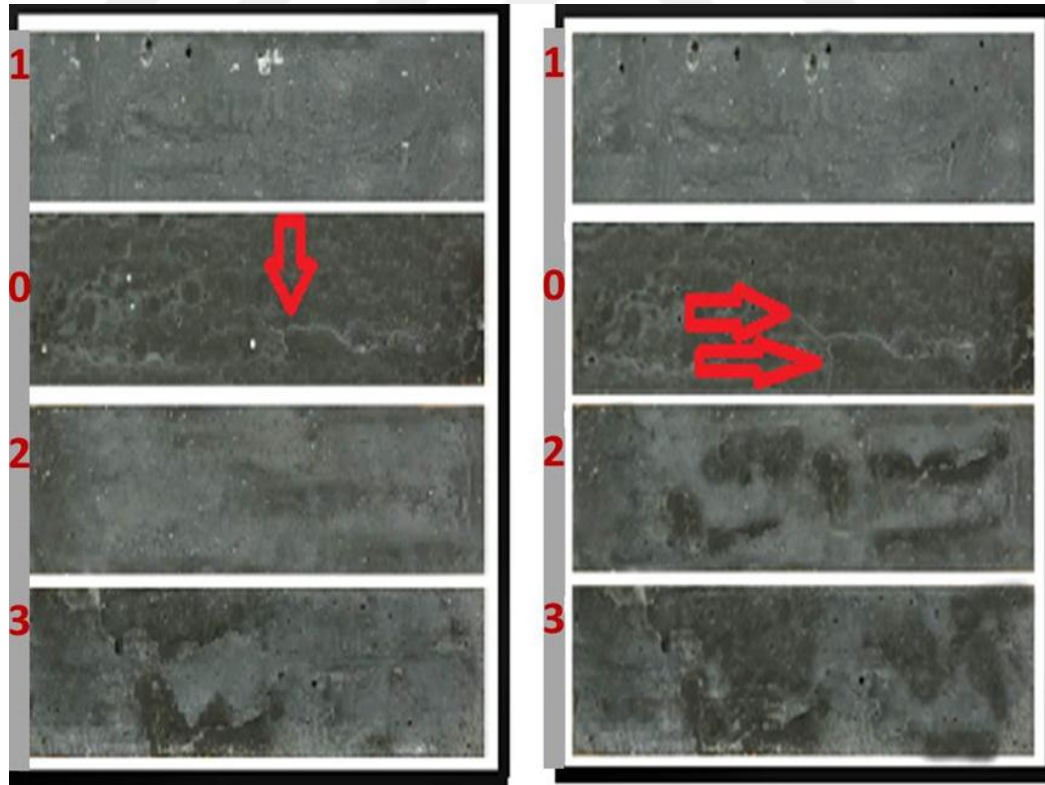
Fotoğraf makinesi ile çekilen bu fotoğraflardaki numune hasarları en belirgin hasarlar olup, 5 numune üzerinden değerlendirme yapıldığında Tablo 11.1'deki durum oluşmaktadır. Fotoğraflarda yan yüzeylerde görülen çatlaklar, 5'er numunenin çoğunda gözükmemektedir. Diğer bir ifadeyle lifli matrislerin performansının değerlendirilmesinde ortalama değerler göz önüne alınmalıdır. Bir numune üzerinden değerlendirme yapıldığında değişkenliği yüksek ve dağılımı rastgele olan çatlakların etkisini anlamak güçleşmektedir. Lifli matrislerde lifler, büzülme çatlaklarını köprülemektedir.

DÇ etkisi ile bu çatlakların uzamasını ve genişlemesini kısıtlamaktadır. Bu durum, numune yüzeyinden kalıp alt tabanına indikçe belirginleşmektedir. Yüzeyde, priz öncesinden itibaren başlayan hızlı kuruma, yüzey görünümünü bozabilmekte, kendiliğinden yerleşen kıvamdaki bu karışımlarda kalıp yüzeyinden birkaç mm aşağıya çökebilen mikro çelik liflerin yarattığı köprüleme eksikliği, numune perdah yüzeyini daha hassas hale getirmektedir. Kuru kıvamlı ve lifli karışımlarda bu durumun daha az etkili olacağı düşünülmektedir.

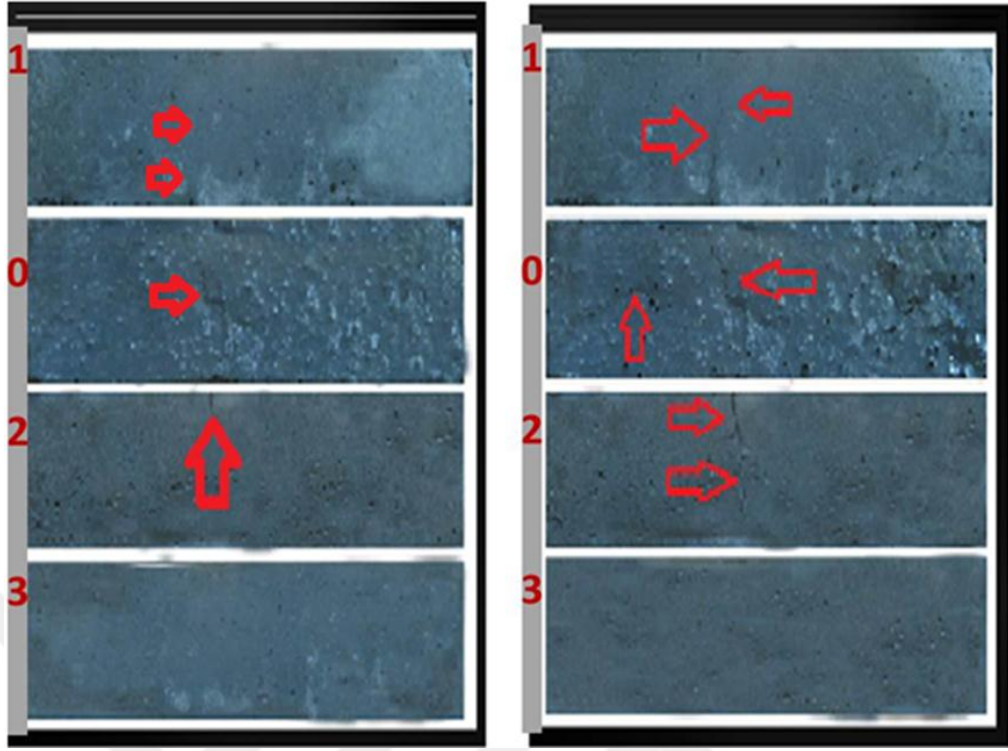
Karışımların üst yüzey çatlaklarından, büzülme parazit gerilmesine dik olmayıp, kalıp uzun kenarına paralel olan çatlaklar, hızlı kuruma etkisi ve geciken priz süresi

ile oluşan oturma çatlakları kökenlidir. Bu çatlaklar, kalıp yan yüzeyine erişememektedir. Ancak, DÇ sonrası kalıp yan yüzeyine erişebilen dallanmalar yapabilmektedir. 20°C, neme doymun ortamda serbest halde tutulan numunelerde büzülme çatlakları oluşmadığı gözlemsel incelemeler ve çatlak mikroskobu incelemeleri ile tespit edilmiştir. Sıcaklığın 30°C'ye yükselmesi ile özellikle katkı ihtiyacı yüksek UK ikameli karışım ve kontrol karışımlarında yüzey çatlaklarının önemli bir kısmı oturma kaynaklıdır.

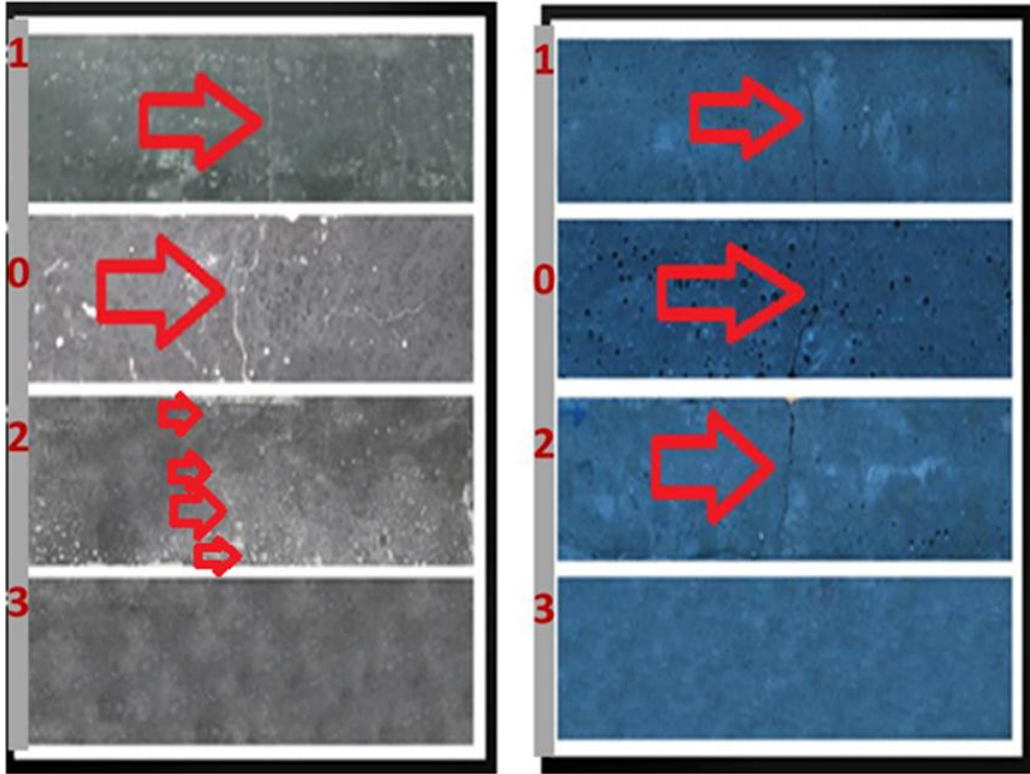
Katkı dozajı ve ortam sıcaklığı arttıkça polikarboksilat esaslı katkıların kuruma ile birlikte ilk saatlerde numune yüzeyinde kabuk oluşturmaktadır. Bu kabuk altında henüz prizini almamış taze hamurun hacimsel büzülmesi ve fiziksel su kaçışı sebebiyle oturması, yüzeyde sertleşen kabuk kısmında düzensiz oturmalar yaratarak çatlaklara sebebiyet verebilmektedir. Bu durum, ideal iklim koşullarında ve düşük katkı ihtiyacı olan YFC ikameli karışımda oluşmamaktadır.



Şekil 11.5 İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali (0: üst yüzey, 1 ve 2: kalıp yan yüzeyleri, 3: alt yüzey)



Şekil 11. 6 UK30-İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali (0: üst yüzey, 1 ve 2: kalıp yan yüzeyleri, 3: alt yüzey)



Şekil 11.7 YFC50-İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali (0: üst yüzey, 1 ve 2: kalıp yan yüzeyleri, 3: alt yüzey)

Lifsiz RPB'lerin çatlak çapı, uzunluğu ve yüzey alanları su kürü ve DÇ sonrası her karışım için Tablo 11.2'de verilmektedir. Lifli RPB'lere benzer şekilde çevrimler öncesi kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kurumaya doğrudan maruz kalan üst yüzeyde en büyük uzunlukta olduğu, çatlak açıklıklarının da bu yüzeyde maksimum olduğu belirlenmiştir.

Yan yüzeylerin çatlak açıklıkları, üst yüzeydeki çatlak açıklıklarının %33'ü ile %54'ü mertebesindedir. Yan yüzey çatlak uzunlukları, üst yüzeyin 1/3'ü ile 1/6'sı mertebesindedir.

Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kalıp alt yüzünde oluşmadığı görülmektedir. İ50-F0 karışımının ortalama toplam çatlak uzunluğu 144 mm, ortalama çatlak yüzey alanı ise 11,8 mm²'dir.

Aynı değerler sırasıyla UK30-İ50-F0 karışımı için 190 mm, 14,2 mm², YFC50-İ50-F0 karışımı için 260 mm, 38,2 mm²'dir. Lifsiz karışımlarda erken yaş büzülme ölçümleri yapılsa da, 110 M 691 numaralı TÜBİTAK projesinde, çalışmaya konu olan karışımlarda mikro liflerin, RPB'de erken yaş büzülme mertebeleri üzerinde önemli bir kısıtlayıcı etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, lifli karışımlara benzer olarak YFC ikameli lifsiz karışımın diğer karışımlardan çok daha yüksek büzülmesinin olduğu söylenebilir.

Erken yaşta okunan serbest büzülme miktarlarındaki artış ile çatlak uzunlukları ve genişlikleri artmaktadır. DÇ çevrimleri sonucu çatlak uzunluk ve açıklıkları özellikle büzülmesi fazla YFC ikameli karışımda belirgin derecede artmıştır. Ayrıca, UK ikameli ve YFC ikameli karışımlarda yan yüzey çatlakları, alt yüzeye erişmiş veya alt yüzeyde yeni çatlaklar oluşmuştur.

Toplam değerlerdeki artışlar incelendiğinde, çevrime giriş değerlerine kıyasla 95 mm çatlak uzunluğu ve 11 mm² ortalama çatlak açıklığı artışı ile en fazla YFC ikameli karışımın etkilendiği görülmektedir. Çatlak mikroskobu incelemelerinde geniş çatlakların DÇ ortamından daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir.

Şekil 11.8’de İ50-F0, Şekil 11.9’da UK30-İ50-F0 ve Şekil 11.10’da YFC50-İ50-F0 karışımlarındaki en geniş çatlaklarının olduğu bölgelerin DÇ çevrimi öncesi ve sonrası halleri aynı ölçekte sunulmaktadır.

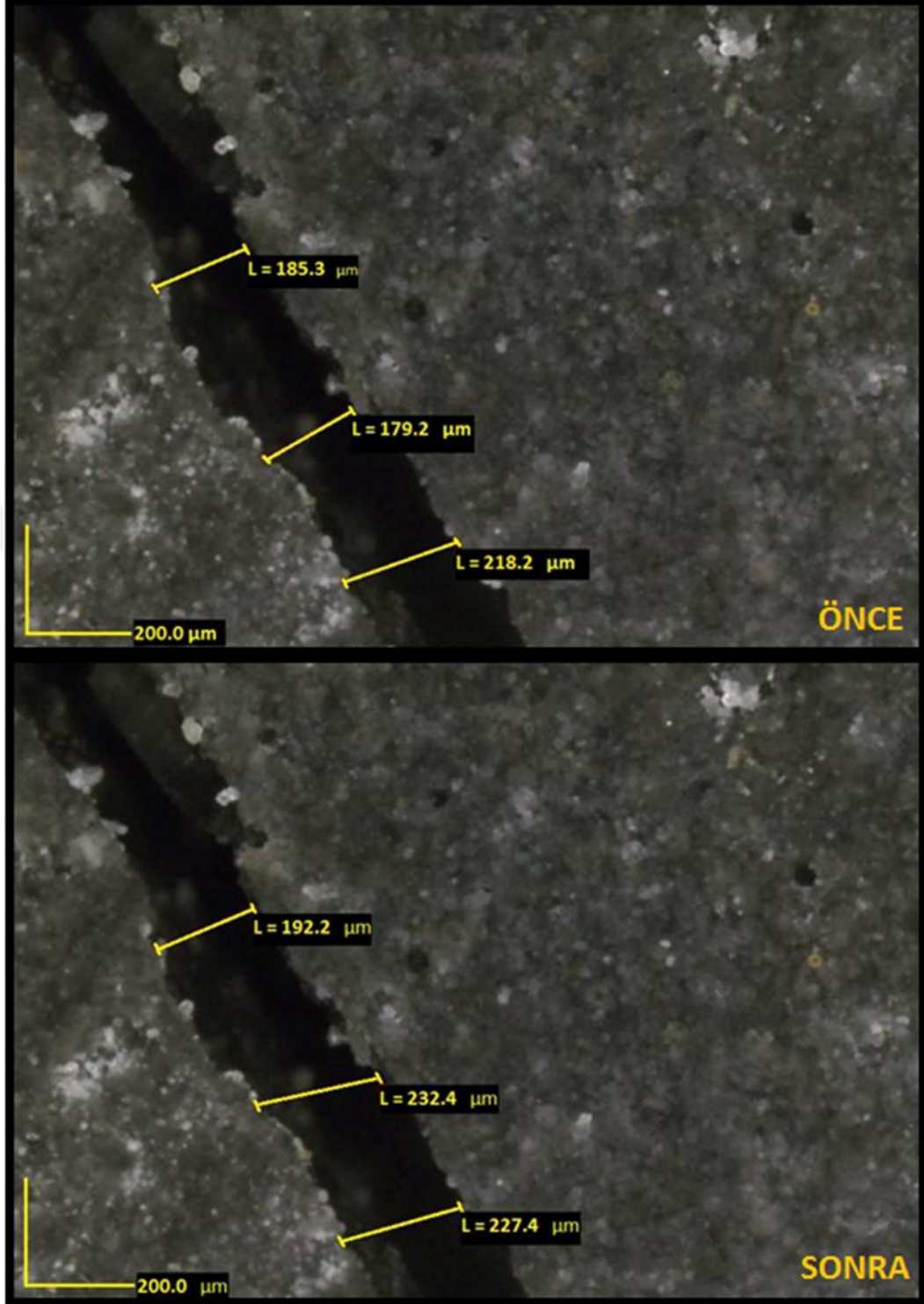
DÇ etkisi ile birim uzunluktaki çatlak yüzey alanı artmakta, diğer bir ifadeyle çatlaklar genişlemektedir. Lifsiz karışımların DÇ sonrası çatlak yüzey alanları, lifli karışımların 1,5 ila 2 katı seviyesindedir (Tablo 11.2).

Liflerin yoksunluğunda, büzülme çatlaklarında donan suyun çatlak genişliğini ve uzunluğunu artırma potansiyeli yükselmektedir.

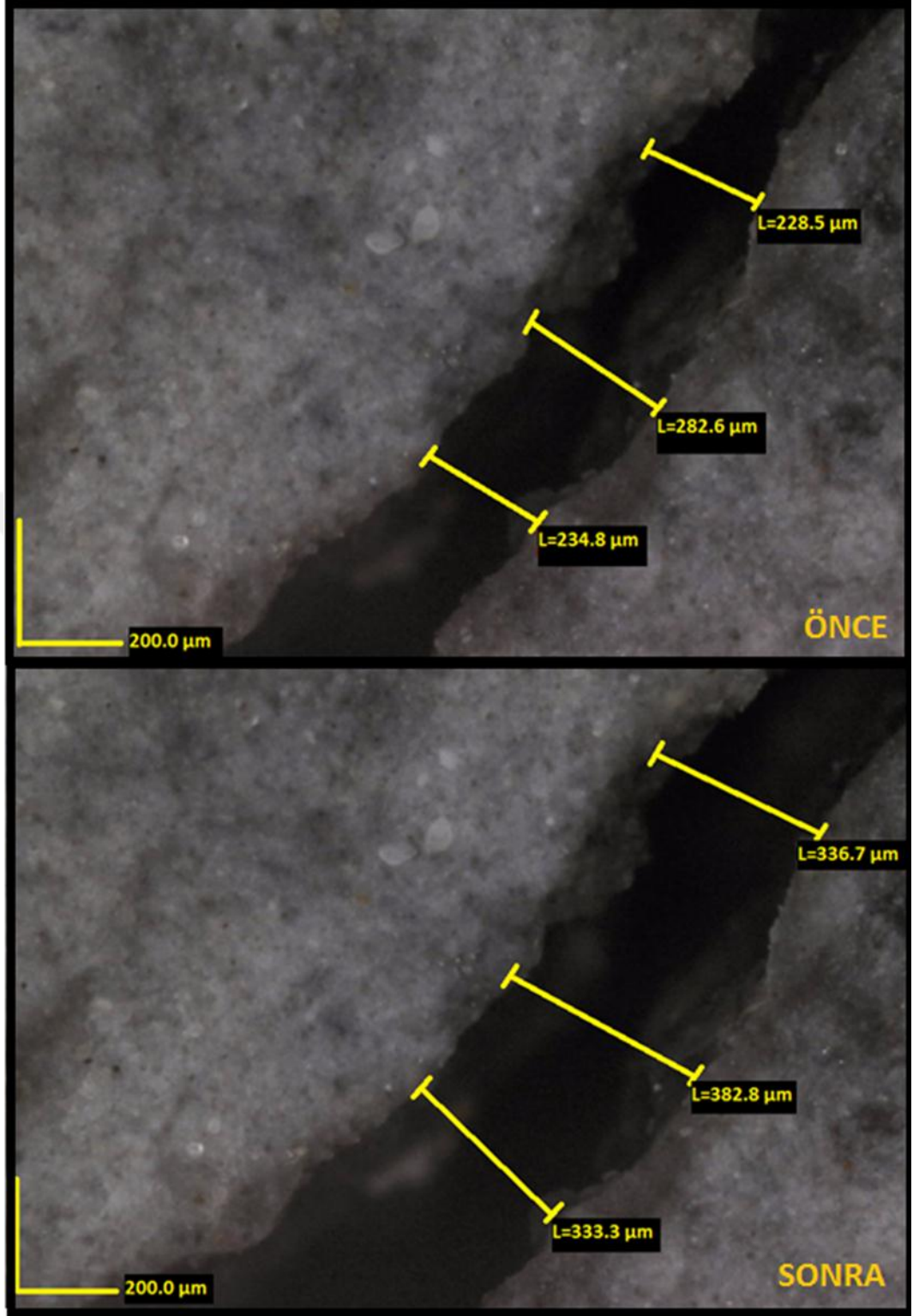
Tablo 11.2 Lifsiz RPB’lerin 28 gün ve 500 DÇ çevrimi sonrası çatlak uzunlukları ve ortalama açıklıkları

Karışım	Ölçülen Değer	28 Gün				500 Çevrim			
		Üst (0)	Yan (1+2)	Alt (3)	Toplam	Üst (0)	Yan (1+2)	Alt (3)	Toplam
İ50-F2	Çatlak Uzunluğu (mm)	122	22	0	144	134	27	0	161
	Ort. Çatlak Açıklığı (µm)	91,2	30,0	0	-	99,9	33,2	0	-
	Çatlak Yüzeyi Alanı (mm ²)	11,1	0,7	0	11,8	13,3	0,9	0	14,2
UK30-İ50-F2	Çatlak Uzunluğu (mm)	158	32	0	190	179	44	45	267
	Ort. Çatlak Açıklığı (µm)	81,0	44,2	0	-	90,4	57,2	44,7	-
	Çatlak Yüzeyi Alanı (mm ²)	12,8	1,4	0	14,2	16,1	2,5	2,0	18,6
YFC50-İ50-F2	Çatlak Uzunluğu (mm)	195	65	0	260	215	105	35	355
	Ort. Çatlak Açıklığı (µm)	170,0	77,8	0	-	187,6	84,7	70,2	-
	Çatlak Yüzeyi Alanı (mm ²)	33,2	5,1	0	38,2	40,3	8,9	2,5	49,2

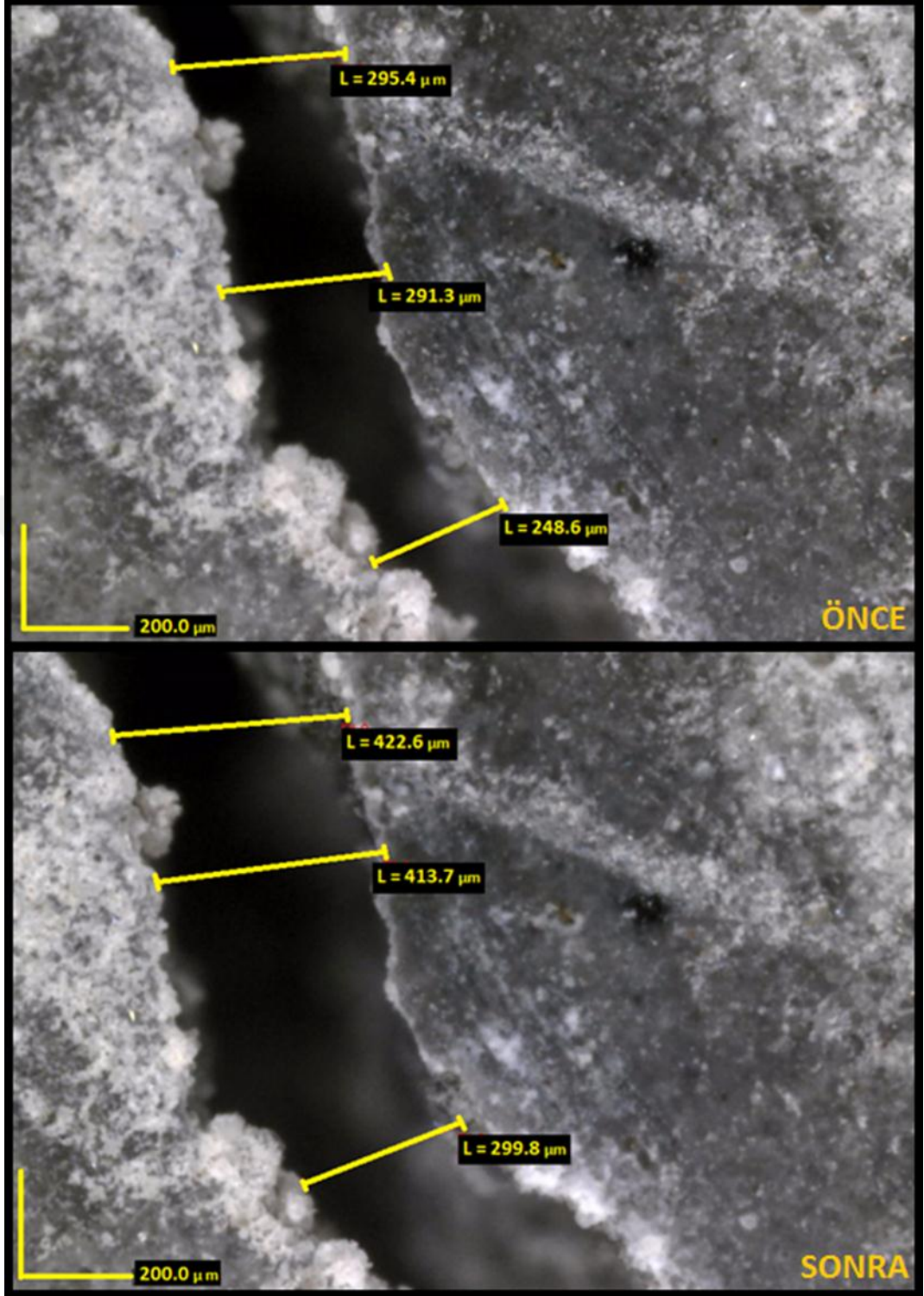
Ort. : ortalama



Şekil 11.8 İ50-F0 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali (0: üst yüzey, 1 ve 2: kalıp yan yüzeyleri, 3: alt yüzey)



Şekil 11.9 Lifsiz UK30-İ50-F0 karışımının en geniş büzülme çatlığının 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali



Şekil 11.10 Lifsız YFC50-İ50-F0 karışımının en geniş büzülme çatlağının 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali

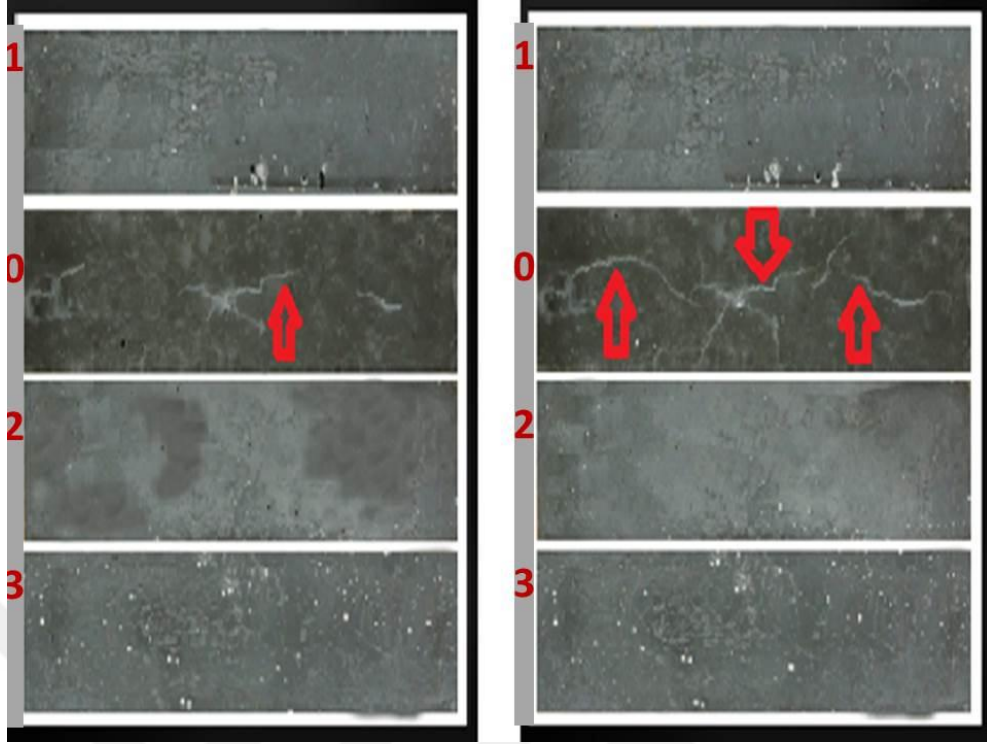
Şekil 11.11’de İ50-F0, Şekil 11.12’de UK30-İ50-F0 ve Şekil 11.13’te YFC50-İ50-F0 karışımlarından en çok hasar gören numunenin 28 gün su kürü sonrası ve 500 DÇ çevrimi geçirmiş hali sunulmaktadır. Kontrol karışımında yüzeyde görülen görülen çatlaklar genişlemiş, dallanma yapan kısımları fotoğraflarda görünür hale gelmiştir (Şekil 11.11).

Bu karışımında yan yüzeylerde çatlak oluşumunun çok kısıtlı olduğu (Tablo 11.2), alt yüzeyde ise çatlak oluşmadığı görülmektedir. UK ikameli karışımında yan ve alt yüzeylerde çatlak oluşumunun arttığı, kapak atma olayının gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 11.12).

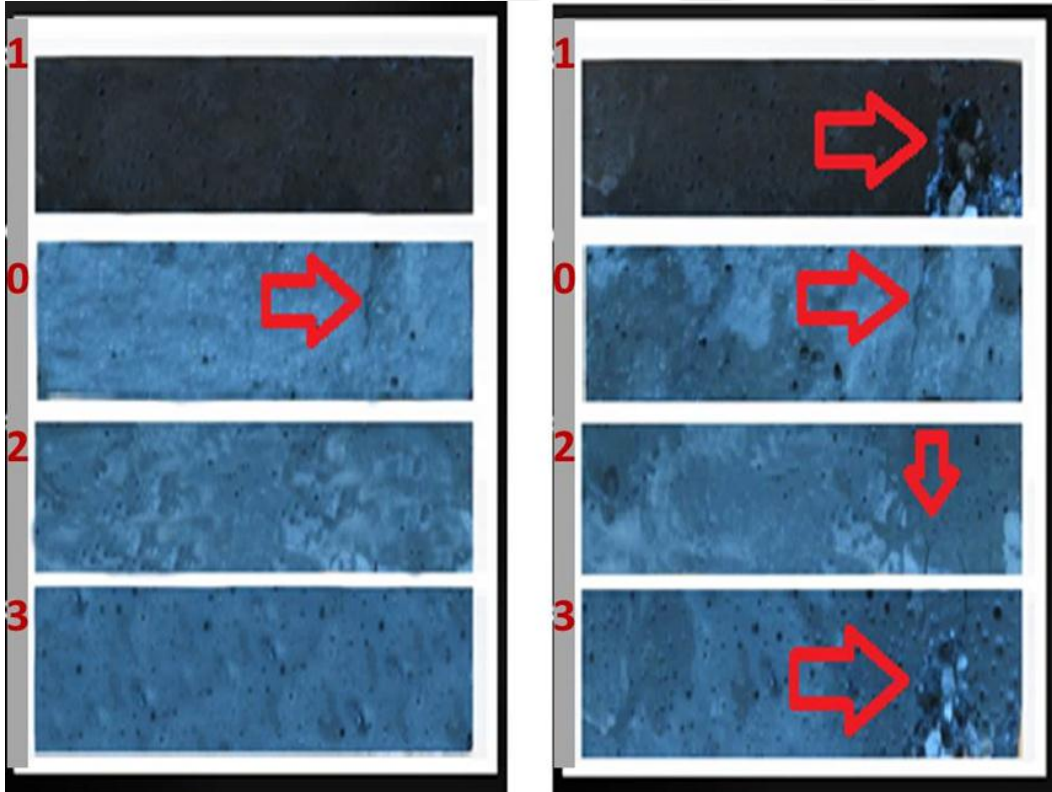
Kapak atma, duvar etkisinin en fazla olduğu kalıp köşesinde, iri agregalar çevresinde oluşmaktadır. Bu numune en çok hasar gören numune olup, tüm numunelerde bu denli hasar gözlenmemiştir.

Kapak atma eğilimi tüm numunelerde yüzeydeki şişmeler ile kendini belli etse de en belirgin hasar fotoğrafı sunulan numunededir. Şekil 11.13’te YFC ikameli örnekte genişlemenin olduğu görülmektedir. Genleşme, don hasarının son mertebelere ulaştığı şeklinde yorumlanabilir.

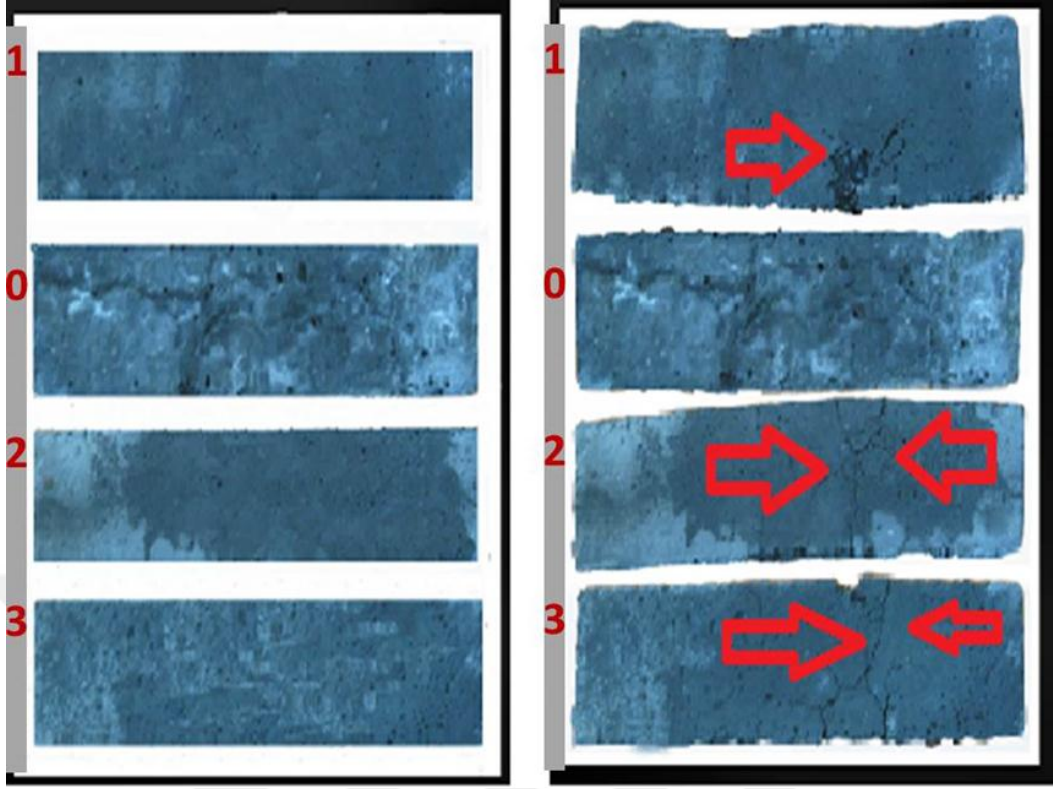
Kısıtlanmış büzülme çatlakları açısından zengin olan YFC ikameli karışımında bünyeye su girişi kolaylaştığı için tüm kesitte yeni çatlakların oluşumu ve buna bağlı don hasarı gözlenmektedir. Ayrıca, çatlakların kesişerek yoğunlaştığı köşe bölgelerde kapak atma ve pullanmaya bağlı dökülme gözükmemektedir.



Şekil 11.11 İ50-F0 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali (0: üst yüzey, 1 ve 2: kalıp yan yüzeyleri, 3: alt yüzey)



Şekil 11.12 UK30-İ50-F0 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali (0: üst yüzey, 1 ve 2: kalıp yan yüzeyleri, 3: alt yüzey)



Şekil 11.13YFC50-I50-F0 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 DÇ çevriminden önceki ve sonraki hali (0: üst yüzey, 1 ve 2: kalıp yan yüzeyleri, 3: alt yüzey)

11.1 Genel Değerlendirme

Lifli ve lifsiz RPB'ler çevrimler öncesi kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kurumaya doğrudan maruz kalan üst yüzeyde en büyük uzunlukta oluştuğu, çatlak açıklıklarının da bu yüzeyde maksimum olduğu belirlenmiştir. Erken yaşta büzülmenin artması ile özellikle katkı ihtiyacı yüksek UK ikameli karışım ve kontrol karışımlarında yüzey çatlaklarının önemli bir kısmı oturma kaynaklıdır. Katkı dozajı ve ortam sıcaklığı arttıkça polikarboksilat esaslı katkıları kuruma ile birlikte ilk saatlerde numune yüzeyinde kabuk oluşturmaktadır. Bu kabuk altında henüz prizini almamış taze hamurun hacimsel büzülmesi ve fiziksel su kaçıışı sebebiyle oturması, yüzeyde sertleşen kabuk kısmında düzensiz oturmalar yaratarak çatlaklara sebebiyet verebilmektedir. Bu durum, ideal iklim koşullarında ve düşük katkı ihtiyacı olan YFC ikameli karışımda oluşmamaktadır.

DÇ etkisi ile çatlakların bariz şekilde genişlediği görülmektedir. Bu durumun iki temel sebebi vardır. Birincisi çatlaklar RPB gövdesinin geçirimsizliğini arttırarak su girişini kolaylaştırmaktadır. İkincisi ise çözme işlemi sonrasında suya doygun çatlaklardaki suyun donarak hasar yaratmasıdır.

Erken yaşta okunan büzülme miktarlarındaki artış ile çatlak uzunlukları ve genişlikleri artmaktadır. Çevrime giriş değerlerine kıyasla çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak açıklığı artışının en fazla YFC ikameli karışımda oluşmaktadır.

Lifsiz numunelerde DÇ sonrası büzülme çatlaklarının uzunluk ve açıklıkları önemli oranda artmamıştır.

DÇ çevrimleri sonucu büzülme çatlak uzunluk ve açıklıkları özellikle büzülmesi fazla YFC ikameli karışımda belirgin derecede artmıştır.

Lifsiz UK ikameli ve YFC ikameli karışımlarda yan yüzey çatlakları, alt yüzeye erişmiş veya alt yüzeyde yeni çatlaklar oluşmuştur. DÇ çevrimleri sonrası lifli karışımlardaki üst ve yan yüzey büzülme çatlaklarının alt yüzeye erişemediği görülmüştür.

Lifsiz karışımlarda büzülme çatlaklarında donan suyun çatlak genişliğini ve uzunluğunu artırma potansiyeli yükselmektedir. Çatlakların kesişerek yoğunlaştığı köşe bölgelerde kapak atma ve pullanmaya bağlı dökülme gözükmemektedir.

Çatlak mikroskobu incelemelerinde geniş çatlakların DÇ ortamından daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir.

BÖLÜM ONİKİ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında lifli ve lifsiz olarak tasarlanan, ikamesiz, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikameli üç tür reaktif pudra betonu (RPB) karışımının; ideal iklim koşullarında herhangi bir kısıtlama olmadan ve kuruma ortamında kısıtlanmış halde tutulması ile, büzülme çatlaklarının gelişimi, mekanik özellikleri, donma-çözülme sonrası dayanıklılıkları belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen temel sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır;

- Lifsiz karışımlarda 28 günde 111 MPa olan kontrol karışımı basınç dayanımı, yüksek oranda uçucu kül (%30) ve yüksek fırın cürufu (%50) ikamesiyle sırasıyla 121 ve 132 MPa'ya yükselmektedir, lifli RPB'lerde bu değerler sırayla 162, 166 ve 177 MPa'ya yükselmektedir.

- Lifli RPB'lerde de lifsizler gibi YFC ikamesi ile erken yaş (24 saat) kuruma büzülmeleri önemli oranda artmıştır. Sahada uygulama durumunda ve özellikle kısıtlanmış elemanlarda lifli RPB'nin de çatlak hassasiyetine sahip olduğu belirlenmiştir.

- Kısıtlanmış ortamda erken yaş sıcaklığının artışı ve kısıtlama sonucu oluşan çatlaklar, RPB'nin uzun dönemli dayanımlarında düşüş yaratabilmektedir.

- Çalışma sonuçları, lifsiz karışımlarda kısıtlanmış halde oluşan büzülme nedeniyle oluşan çatlakların, mekanik özelliklerin yanı sıra donma-çözülme dayanıklılığını da lifli karışımlara kıyasla daha olumsuz etkilediğini göstermiştir. Çelik lifli karışımlarda ise donma-çözülme dayanıklılığının, kısıtlanmış büzülme çatlaklarının varlığında dahi oldukça iyi olduğu gözlenmiştir. Lifli RPB'nin ideal koşullarda kür edilerek büzülme çatlaklarının oluşumu önlendiğinde, yüksek mekanik özelliklere ve arzu edilen donma-çözülme dayanıklılığına sahip olduğu belirlenmiştir.

- Lifli ve lifsiz RPB'ler çevrimler öncesi kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kurumaya doğrudan maruz kalan üst yüzeyde en büyük uzunlukta oluştuğu, çatlak açıklıklarının da bu yüzeyde en fazla olduğu belirlenmiştir. Erken yaşta büzülmenin artması ile özellikle katkı ihtiyacı yüksek UK ikameli karışım ve kontrol karışımlarında yüzey çatlaklarının önemli bir kısmı oturma kaynaklıdır. Bu durum, ideal iklim koşullarında ve düşük katkı ihtiyacı olan YFC ikameli karışımda oluşmamaktadır.

- Erken yaşta okunan büzülme miktarlarındaki artış ile çatlak uzunlukları ve genişlikleri artmaktadır. Çevrime giriş değerlerine kıyasla çatlak uzunluğu ve ortalama çatlak açıklığı artışının en fazla YFC ikameli karışımda oluşmaktadır.

- DÇ etkisi ile lifsiz karışımlarda daha belirgin olmak üzere lifli karışımlarda da çatlakların genişlediği saptanmıştır. Bu durumun iki temel sebebi vardır. Birincisi çatlaklar RPB gövdesinin geçirimsizliğini artırarak su girişini kolaylaştırmaktadır. İkincisi ise çözme işlemi sonrasında suya doygun çatlaklardaki suyun donarak hasar yaratmasıdır. DÇ çevrimleri sonucu büzülme çatlak uzunluk ve açıklıkları özellikle büzülmesi fazla YFC ikameli karışımda belirgin derecede artmıştır. Mikro çelik lifler, DÇ çevrimleri etkisinde büzülme çatlaklarının boyları ve genişliklerindeki artışı kısıtlamaktadır.

- Lifsiz UK ikameli ve YFC ikameli karışımlarda yan yüzey çatlakları, alt yüzeye erişmiş veya alt yüzeyde yeni çatlaklar oluşmuştur. DÇ çevrimleri sonrası lifli karışımlardaki üst ve yan yüzey büzülme çatlaklarının alt yüzeye erişemediği görülmüştür.

- Lifsiz karışımlarda, DÇ etkisi ile genişlemiş ve uzamış büzülme çatlaklarının kesişerek yoğunlaştığı köşe bölgelerde kapak atma ve pullanmaya bağlı dökülme gözükmektedir. Büzülme çatlakları açısından zengin YFC ikameli lifsiz karışımlarda don hasarı, genleşme şeklinde kendini göstermiştir. Lifli karışımlarda ise kapak atma, pullanma ve genleşme görülmemiştir.

- Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının eğilme yükleri altında lifli RPB'nin tokluğunu önemli oranda düşürdüğü, düşüşün diğer mekanik özelliklerden daha belirgin olduğu görülmüştür. Yük - sehim eğrilerinin kuyruk bölgeleri D evrimleri sonucu bazı değişikliklere uğrayabilmektedir. İkincil pik yük artış kısmı çevrimlerden olumsuz etkilenebilmektedir. Kompozitin sergilediği maksimum sehim değerleri D çevrimlerinden olumsuz etkilenebilmektedir. Bu etkiler kısıtlanmış büzülme çatlaklarının varlığında şiddetlenmektedir.

- Lifsiz RPB'ler gevrek bir davranış sergilemiş, eğilme yüklemesinde tepe yükünden sonra ani kırılma oluşmuştur. D etkisinde toklukta düşüşler oluşmuştur. Tokluktaki kayıpların sebebi, tepe yükünün düşüşü ve maksimum sehim değerlerindeki düşüşüdür. YFC ikameli karışımların tokluk değerleri, UK ikameli karışım ve kontrol karışımına göre oldukça düşüktür. Serbest büzülme değeri en fazla olan YFC ikameli karışımın kısıtlanması durumunda oluşan çatlaklar, eğilme dayanımlarındaki düşüş ile birlikte tokluk değerlerini de olumsuz etkilemiştir. Kısıtlama sebebiyle YFC ikameli matriste oluşan tokluk kaybı, D etkisi ile artmaktadır.

- Karışımlarda kullanılan elik lifler, serbest büzülme miktarını azaltmaktan ziyade kısıtlanmış halde çatlak oluşumlarını sınırlandırmaktadır. elik lif katkılı karışımların bu sayede mekanik özellikleri ve D dayanıklılıkları artmaktadır. İdeal koşullarda serbest halde bekletilen lifsiz karışımların da tatminkar D dayanıklılığına sahip olduğu belirlenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda büzülme çatlaklarının, donma – zlme direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Kullanımı giderek artan yüksek performanslı imento esaslı kompozit malzemelerin erken yaş büzülme mertebeleri, uzun dönemden daha kritiktir. Bu sebeple, ilk gün alınacak nlemler, RPB'den beklenen mekanik performansın ve kalıcılığın sağlanması anahtar rol oynamaktadır.

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda RPB'nin ideal ortamlarda kür edildikten sonraki durabilite performansı araştırılmıştır. Tez çalışmalarından elde edilen sonuçlar, RPB'nin çatlak hassasiyetinin ihmal edilemeyeceğini, bu hassasiyetin sahada döküm uygulamalarının artışıyla daha da önem kazanacağını göstermektedir.

İleriki çalışmalarda RPB'nin erken yaşta prefabrik üretim koşullarındaki olumsuzluklardan (sıcak hava etkisi, yetersiz koruma, büyük kesitli elemanlarda hidrasyon ısısının etkisi ile kütle betonu davranışı vb.) nasıl etkilendiği, sahada üretim için alınması gereken önlemler, rüzgar etkisindeki davranışı ve büzülme çatlaklarının donatı içeren RPB'li betonarme elemanlardaki etkisinin araştırılması önerilmektedir.

Çalışmanın devamında ilk 24 saat ideal koşullarda ve kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilen RPB karışımlarının diğer yıpratıcı koşullar altındaki performansının araştırılması önerilir.

KAYNAKLAR

- ACI 116R (2000). *Cement and concrete terminology, manual of concrete practice*. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI.
- ACI 544.4R-88. (1999). *Design considerations for steel fiber reinforced concrete, ACI Committee Report*. American Concrete Institute, ACI.
- ACI-201.2R-92 (1992). *Guide to durable concrete. manuel of concrete practice*. American Concrete Institute, Detroit.
- ACI-318 (2000). *Building Code*. American Concrete Institute, Detroit.
- Akman, M. S. (1977). Influence de la fraction volumetrique et de la qualite du gravier sur l' inelasticite du beton. *Materials und Technik, Zürich*. N.2, 83-92.
- Asad, M., Baluch, M. H., ve Al-Gadhib, A. H. (1997). Drying shrinkage stresses in concrete patch repair systems. *Magazine of Concrete Research*, 49 (181), 283-293.
- Atiş, C. D. ve Karahan, O. (2009). Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (1), 392-399.
- Atis, C. D. ve Karahan, O. (2007). Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete. *Construction and Building Materials* article in press, doi:10.1016/j.conbuildmat.11.002.
- Aydın, S. (2013). Effects of fiber strength on fracture characteristics of normal and high strength concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 57 (2), 191-200.

- Aydın, S., Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y. ve Yiğiter, H. (2010). Effect of aggregate type on mechanical properties of reactive powder concrete, *ACI Materials Journal*, 107(5), 441-449.
- Banthia, N., ve Trottier, J.F. (1995). Concrete reinforced with deformed steel fibres. Part II: Toughness characterization, *ACI Materials Journal*, 92 (2), 146-154.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. (2010). *Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite)*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Barnett, M.N., Soutsos, S.G., Millard, J.H. ve Bungey, S.J. (2006). Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace Slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies. *Cement and Concrete Research*, 36, 434 – 440.
- Bartos, P., ve Duris, M. (1994). Effects of the inclinations of steel fibers to a tensile load on their loadbearing capacity and the SFRC fracture mechanism In: A. Brandt, V.C. Li and I.H. Marshall, Editors, *Brittle Matrix Composites 4, IKE and Woodhead, Warsaw*, 320–331.
- Nehdi, M. L. ve Bassuoni, M. T. (2008). Durability of self-consolidating concrete to combined effects of sulphate attack and frost action. *Materials and Structures*, 41, 1657-1679.
- Beglarigale, A. (2013). *Steel-fiber matrix bond characteristics of cement based composites*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Bentur, A. ve Mindess, S. (1990). *Fiber reinforced cementations composites*. Elsevier Applied Science, London and New York.
- Bijen, J. (2003). *Durability of engineering structures: design, repair and maintenance*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

- Binici, H. (2002). *PÇ-GYFC Pomza üçlü karışımlarının özellikleri*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Blais, P.Y., ve Couture, M. (1999). Precast, prestressed pedestrian bridge – world's first Ankara. Reactive powder concrete structure, *PCI Journal New Technology*, 99, 61-70.
- Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. ve Aitcin, P.C. (1997). Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. *ACI Materials Journal*. 94(4), 286-289.
- Budiansky, B. ve Cui, Y.L. (1995). Toughening of ceramic by short aligned fibers, *Mechanics of Materials*, 21, 139–146.
- Cook, J., Gordon, J.E., Evans, C.C. ve Marsh, D.M. (1964). A mechanism for the control of crack propagation in all brittle systems. *Proceedings of the Royal Society A Lond. A*, 282, 508–520.
- Coppola, L., Cerulli, T., Troli, R. ve Colleparidi, M. (1996). The influence of raw materials on performance of reactive powder concrete, *International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality Concrete Structures*, Florianopolis, 502-513.
- Copuroglu, O., Fraaij, A.L. ve Bijen, J.M. (2004). *Effect of curing conditions on freeze-thaw de-icing salt resistance of blast furnace slag cement mortars*. In: Brebbia CA, DeWilde WP, editors. High performance structures and materials II, WIT Press, 233–41.
- Corinaldesi, V. ve Moriconi, G. (2004). Durable fiber reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 249-254.

- Cwirzen, A. ve Pentalla, V. (2005). Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes. *Cement and Concrete Research*, 35, 671-679.
- Cwirzen, A. ve Penttala, V. (2006). Effects of increased aggregate size on the Mechanical and Rheological Properties of RPC. *2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*.
- Dsouza, B. (2000). *Shrinkage-reducing Admixtures*. Australia: Degussa Construction Chemicals, Pty Ltd, 1-12.
- Erdoğan, T. (2002). *Beton*. Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Erdoğan, T.Y. (1997). *Admixtures for Concrete*. Ankara. METU Press.
- Eren, Ö. ve Çelik, T. (1997). Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 11, (7-8), 373-382.
- Esping, O. (2008). Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 38 (7), 938 944.
- Fagerlund, G. (1977). The critical degree of saturation method of assessing the freeze-thaw, *Materiaux et Constructions (Paris)*, 23 231 -251.
- Gagne, R., Pigeon, M. ve Aïtcin, P.C. (1990). Durabilité au gel des betons de hautes performances mécaniques, *Materiaux et Constructions (Paris)*, 23, 103–109.

- Grassl, P., Wong, H. S. ve Buenfeld, N. R. (2010). Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 40, 85-93.
- Stang, H., (1996) Significance of shrinkage-induced clamping pressure in fiber-matrix bonding in cementitious composite materials. *Advanced Cement-Based Materials*, 4, 106–115.
- Hasholt, M.T. (2002). *Salt frost scaling — interaction of transport mechanisms and ice formation in concrete*. Doktora Tezi, Aalborg Universitesi, Aalborg.
- Holt, E. (2005). Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. *Cement and Concrete Research*, 35 (3), 464-472.
- Holt, E. ve Leivo, M. (2004). Cracking risks associated with early age shrinkage *Cement and Concrete Composites*, 26 (5), 521–530.
- Jansen, D.C., Shah, S.P. ve Rossow, E. (1995). Stress – strain results of concrete from circumferential strain feedback control testing. *ACI Materials Journal*, 92, 419 – 428.
- JCI – DFRCC Committee. (2003). DFRCC Terminology and application concepts, committee rapor. *Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute*, 1 (3), 335 – 340.
- Karabulut, A. (2006). *Reaktif pudra betonu özelliklerinin mineral katkılarla geliştirilmesi*, Yüksek lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi. İzmir.
- Kobayashi, M., Nakakuro, K., Kodama, S. ve Negami, S. (1981). American Ceramics Institute Special Publication SP-68. *American Concrete Institute, Detroit*, 269-282.

- Kovler, K. ve Zhutovsky, S. (2006). Overview and future trends of shrinkage research. *Materials and Structures*, 39 (9), 827–847.
- Lappa, E. S. (2007). *High strength fiber reinforced concrete static and fatigue behavior in bending*. Doktora Tezi, Technische Universiteit Darmstadt geboren te Darmstadt, Duitsland.
- Lawler, J.S., Wilhelm, T., Zampini, D. ve Shah, S.P. (2003). Fracture processes of hybrid fiber reinforced mortar. *Materials and Structures*, 36, 197-208.
- Lee, M.G., Wang, Y.C. ve Chiu, C.T. (2007). A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. *Construction and Building Materials*, 21, 182–189.
- Li, V.C. ve Maalej, M. (1996b). Toughening in cement based composites. Part II: Fiber Reinforced Cementitious Composites. *Cement & Concrete Composites* 18, 239-249.
- Liu, C.T. ve Huang, J.S. (2009). Fire performance of highly flowable reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 2072–2079.
- Löfgren, I. (2005). *Fiber-reinforced concrete for industrial construction – A Fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*, Doktora Tezi, Chalmers Üniversitesi, Göteborg, Sweden.
- Marchand, J., Pleau, R. ve Gagné R. (1995). In materials science of concrete: IV, edited by J. Skalny and S. Mindess. *American Ceramics Society*, Westerville, Ohio, 283–354.
- Naaman, A.E. ve Surendra, P.S. (1976). Pull-Out mechanism in steel fiber-reinforced concrete. *Journal of the Structural Division*, 102, 8, 1537-1548.

- Nawy, E. G. (2001). *Fundamentals of highperformance concrete*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, Inc.; ISBN 0-471-38555-7.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. New York: Longman Scientific and Technical.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. England: Addison Wesley Longman Limited.
- Parant, E., Rossi, P. ve Boulay, C. (2006). Fatigue behavior of a multi-scale cement composite. *Cement and Concrete Research*, 37, 12, 264-269.
- Parrott, L.J. (1989). *In materials science of concrete: I* (Jan P. Skalny, Ed.). The American Ceramic Society, Inc., Westerville, Ohio, 181–195
- Pease, B. J. (2005). *The role of shrinkage reducing admixtures on shrinkage, stress development, and cracking*. Yüksek Lisans Tezi, Purdue Üniversitesi, West Lafayette.
- Peng, G. F., Ma, Q., Hu, H. M., Gao, R., Yao, Q. F. ve Liu, Y. F. (2007). The effects of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50–60MPa grade concrete. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1034-1039.
- Pigeon, M., Pleau R. (1995). *Durability of concrete in cold climates*. London: Chapman and Hall.
- Powers, T.C. (1949). Proceedings, highway research board annual meeting. *National Academy of Sciences*, 29, 184–211.
- Powers, T.C. (1965). The mechanisms of frost action in concrete. *Stanton Walker Lecture Series on the Material Science*.

- Ramezaniyanpour, A. A. ve Malhotra, V. M. (1995). Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 17(2), 125-133.
- Ramyar, K. (2000). *Dimensional stability of concrete. lecture notes*. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Richard, P. ve Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*. 25 (7), 1501-1511.
- Rougeau, P., ve Borys, B. (2004). Ultra-high-performance concrete with ultra-fine particles other than silica fume. *International Symposium on Ultra-High-Performance Concrete*, 13-15, 213-225.
- Roux, N., Andrade, C. ve Sanjuan, M.A. (1996). Experimental study of durability of reactive powder concretes”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1-6.
- Schulson, E. M. (1998). Ice damage to concrete. *CRREL Special Report*, 98-6.
- Sellevold, E.M., Justnes, H., Smeplass, S. ve Hansen, E.A. (1994). In Advances in Cement and Concrete. *Proceedings of an Engineering Foundation Conference*, July. 562–609.
- Sengül, C., Akaya, Y. ve Tasdemir, M.A. (2006). Fracture behavior of high performance fiber reinforced self compacting concrete. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties An International Symposium*, 171 – 177.
- Setzer, M.J. (2002). Development of the micro-ice-lens model. *Frost Resistance of Concrete*, Essen, Germany: RILEM, 231-246.

- Seung Hun, P., Gum Sung, R., Kyung Taek, K. ve Dong Joo, K. (2014). Effect of shrinkage reducing agent on pullout resistance of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete, *Cement and Concrete Composites*, 49, 59-69.
- Shah, S.P. (1991). Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes. *ACI Material Journal*, 88, 6, 595-602.
- Shiotani, T., Bisschop, J. ve Van Mier, J. G. M. (2003). Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 70 (12), 1509-1525.
- Tam, C.M., Vivian, W.Y. ve Ng, K.M. (2012). Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong, *Construction and Building Materials*, 26, 79–89.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F. ve Yerlikaya, M. (2005). Yeni kuşak süper akışkanlaştırıcıların yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerdeki işlevleri. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu Bildiriler*, 201-221.
- Tjiptobroto, P. ve Hansen, W. (1993). Tensile strain hardening and multiple cracking in high performance cement based composites, *ACI Materials Journal*, 90, 16–25.
- Topçu, İ.B. ve Karakurt C. (2005). Reaktif pudra betonları, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*.
- Ünal, O. (1994). *Isıl işlem uygulamasının lifli beton özelliklerine etkisi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Vanderhorst, N.M., & Janssen, D.J. (1990). In the freezing-and-thawing environment: What is severe. Paul Klieger Symposium on Performance of

Concrete (D. Whiting, Ed.), *ACI Special Publication SP-122, Detroit, Michigan:* American Concrete Institute, p 181–200.

Wong A.C.L., Childs P.A., Berndt R., Macken T., Peng G.D. ve Gowripalan N. (2007). Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fiber Bragg grating sensors, *Cement & Concrete Composites*, 29, 490–497.

Yalçinkaya, Ç ve Yazıcı, H. (2011). Agregâ hacminin reaktif pudra betonunun mekanik ve büzülme özelliklerine etkisi, *2011-THBB Beton kongresi*, 150-159.

Yalçinkaya, Ç., Beglarigale, A. ve Yazıcı, H. (2013). Akışkanlaştırıcı dozajının ve ortam sıcaklığının ultra yüksek performanslı betonun erken yaş otojen deformasyonuna ve mukavemet gelişimine etkisi. *Yapılarda Kimyasal Katkılar 4. Sempozyum ve Sergisi*, 33 – 46, Ankara.

Yardımcı, M. Y. (2008). *Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Aydın, S., Karabulut, A.Ş. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials* –1231.