

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİNERAL KATKILI KENDİLİĞİNDEN  
YERLEŞEN LİFLİ BETONUN MEKANİK,  
DURABİLİTE VE MİKROYAPI  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Çağlar YALÇINKAYA**

**Temmuz, 2009**

**İZMİR**

**MİNERAL KATKILI KENDİLİĞİNDEN  
YERLEŞEN LİFLİ BETONUN MEKANİK,  
DURABİLİTE VE MİKROYAPI  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı**

**Çağlar YALÇINKAYA**

**Temmuz, 2009**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**ÇAĞLAR YALÇINKAYA**, tarafından **DOÇ.DR. HALİT YAZICI** yönetiminde hazırlanan “**MİNERAL KATKILI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN LİFLİ BETONUN MEKANİK, DURABİLİTE VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....  
Doç. Dr. Halit YAZICI  
\_\_\_\_\_

Danışman

.....  
\_\_\_\_\_  
Jüri Üyesi

.....  
\_\_\_\_\_  
Jüri Üyesi

\_\_\_\_\_  
Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince gerek güncel bilgisiyle gerekse bilimi sevdirici yaklaşımıyla yol gösteren değerli danışman hocam Sn. Doç. Dr. Halit YAZICI'ya şükranlarımı sunarım.

Sn. Prof.Dr. Bülent BARADAN'a, verdiği anahtar bilgiler ve danışmanlığı süresince gösterdiği ilgi için teşekkürlerimi sunarım. Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi anabilim dalı araştırma görevlileri Sn. Serdar Aydın, Sn. Dr. Burak Felekoğlu ve Sn. Dr. Hüseyin Yiğiter'e çok teşekkür ederim. Deneysel süreçte gösterdiği destek için Sn. Yard. Doç. Dr. Mert Yücel YARDIMCI'ya teşekkür ederim. Sn. Doç.Dr. Selçuk TÜRKEL ve Sn. Dr. Kamile Tosun'a teşekkürlerimi sunarım. Lisans hocam Sn. Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU'ya teşekkür ederim.

2009.KB.FEN.006 nolu bilimsel araştırma projesiyle tezime destekleri için Dokuz Eylül Üniversitesi'ne teşekkür ederim. Malzeme destekleri için AKÇANSA firması adına Sn. Muhittin TARHAN'a, SİKA firması adına Sn. Bimen KADİROĞLU'na, BEKSA firması adına Sn. Mehmet YERLİKAYA'ya, EGE Üniversitesi İnş. Müh. Böl. adına Sn. Yard. Doç. Dr. Şemsi YAZICI'ya teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince her daim yanımda olan çok değerli dostum Araş. Gör. Onur MERTER'e şükranlarımı sunarım. Her ihtiyacım olduğunda desteğini esirgemeyen kıymetli dostum ev arkadaşım Mustafa AKMAN'a teşekkür ederim. Yardımlarından ötürü kadim dostum İnş. Müh. Akif KORKMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tüm çocukluk arkadaşlarım ve memleketim Filyos adına sevgili dostum Mak. Müh. Bora KAYIKÇI'ya sonsuz teşekkürler.

Hayattaki en büyük şanslarım Annem Nursen YALÇINKAYA, Babam Cüneyt YALÇINKAYA, kardeşim Ayça YALÇINKAYA'ya sevgi dolu yürekleri, hep şaşırdığım mükemmellikleri ve tarifsiz destekleri için sonsuz teşekkürler.

Çağlar YALÇINKAYA

# MİNERAL KATKILI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN LİFLİ BETONUN MEKANİK, DURABİLİTE VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

## ÖZ

Bu çalışmada kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonun (KYÇLB) mekanik, durabilite ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Mekanik özellikler olarak eğilme ve basınç yükleri altındaki davranışlar incelenmiştir. Donma – çözülme (D-Ç) etkisinde kalan numuneler üzerinde mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çimento yerine yüzde elli oranında yüksek fırın cürufu ikamesinin, iki farklı çelik lif tipinin (makro, mikro) ve hava sürükleyici katkının kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) eğilme ve basınç yükleri altındaki performansına ve D-Ç durabilitesine etkileri incelenmiştir. Kullanılan çelik lif dozajı metreküpte kırk kilogramdır. Makro ve mikro lifin birlikte kullanıldıkları karma lif kombinasyonu da mevcuttur. Yapılan çalışmalarda YFC'nin taze hal performansını arttırdığı görülmüştür. Çelik liflerin narinlikleri arttıkça reoloji üzerindeki olumsuz etkilerinin arttığı belirlenmiştir. Çelik liflerin genellikle mekanik özellikleri geliştirdiği, cüruf içeren KYB'lerin ilerleyen yaşlarda çimentodan daha iyi mekanik performansa sahip oldukları görülmüştür. Metreküpte kırk kilogram mikro lif kullanımı eğilme yükünü fazla arttırmazken, makro lif kullanımı deformasyon sertleşmesi yaratmıştır. Çelik lifler yalın betonun kırılma davranışını tamamen değiştirmiş ve kırılma enerjilerini yirmi ila doksan katına çıkartmıştır. En iyi kırılma enerjisi performansını makro lifler sergilemiştir. Tüm KYB ve KYÇLB karışımları tatminkar durabilite performansına sahiptir. Atık bir malzeme olarak YFC'nin D-Ç çevrimlerinden önemli bir hasar görmeden KYB'de yüksek oranda kullanımı mümkün görünmektedir.

**Anahtar sözcükler:** Kendiliğinden Yerleşen Beton, Çelik Lif, Donma – Çözülme, Kırılma Enerjisi, Mikroyapı.

# **AN INVESTIGATION ON THE MECHANICAL, DURABILITY AND MICROSTRUCTURE PROPERTIES OF FIBER REINFORCED SELF-COMPACTING CONCRETE WITH MINERAL POWDERS**

## **ABSTRACT**

Mechanical, durability and microstructure properties of fiber reinforced self-compacting concrete (FRSCC) were investigated in the scope of this study. Flexural and compressive performance were determined as mechanical properties. Microstructural analyses were performed on the specimens that were exposed to the freeze – thaw (F-T) effect.

The effects of fifty percent (wt.) ground granulated blast furnace slag replacement, two different types of steel fiber (macro and micro) and air entraining admixture on mechanical performance and F-T durability were studied. Dosage of steel fiber was forty kilograms per cubic meter and hybrid usage of macro and micro fibers were also studied. Fresh state test results showed that GGBFS has an improvement effect on rheological properties. Steel fibers affected fresh state performance adversely and this negative effect gets more important with an increasing of fiber aspect ratio. Steel fiber usage generally improved mechanical properties. GGBFS replacement exhibited better mechanical performance than only cement binder usage at later ages. Steel micro fibred self-compacting concrete exhibited deflection softening but macro fiber usage caused deflection hardening behavior under flexural loading. Moreover steel fibers changed fracture behavior of plain concrete completely and fracture energy values of FRSCC were from twenty to ninety times of plain self-compacting concrete (SCC) specimens. The best performance from the point of fracture energy was exhibited by macro fiber usage. All SCC and FRSCC series showed satisfactory F-T resistance. High amount of GGBFS as an industrial by-product can be used in SCC without important mechanical loss due to F-T cycles.

**Keywords:** Self-Compacting Concrete, Steel Fiber, Freeze – Thaw, Fracture Energy, Microstructure.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
<b>BÖLÜM BİR – TEMEL YÖNLERİYLE KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON .....</b>	<b>1</b>
1.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) Tanımı ve Tarihçesi.....	1
1.2 Kendiliğinden Yerleşen Beton’un Avantaj ve Dezavantajları .....	6
1.3 Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Tasarım Yaklaşımları ve Malzeme Seçimi.....	8
1.3.1 Genel Reoloji Bilgisi ve KYB Reolojisi.....	8
1.3.2 İstenilen Özellikler.....	12
1.3.2.1 Doldurma Kabiliyeti.....	13
1.3.2.2 Ayrışma Direnci.....	14
1.3.2.3 Geçiş Yeteneği.....	15
1.3.3 KYB Tasarımı.....	16
1.3.3.1 Tasarım Yöntemleri.....	18
1.3.3.1.1 Toz Tipi Metodu.....	18
1.3.3.1.2 Stabilizatör Tipi Metodu.....	20
1.3.3.1.3 Kombinasyon Metodu.....	21
1.3.3.1.4 Japon ve CBI Tasarım Yöntemleri.....	21
1.3.3.2 KYB için Örnek Karışımlar.....	22
1.3.4 Malzeme Seçimi.....	25
1.3.4.1 Filler ve Çimento Seçimi.....	25
1.3.4.2 Agrega Seçimi.....	29
1.3.4.3 Kimyasal Katkıların Seçimi.....	30

1.4 KYB İçin Taze Hal Test Yöntemleri.....	36
1.4.1 Çökme – Yayılma , T50 Süresinin Ölçümü ve J-Halkası Testi.....	37
1.4.2 V-Kutusu Deneyi.....	39
1.4.3 L-Kutusu Deneyi.....	40
1.4.4 Elek Ayrışma Testi.....	41
<b>BÖLÜM İKİ – ÇELİK LİFLİ BETONLAR VE KENDİLİĞİNDEN</b>	
<b>    YERLEŞEN ÇELİK LİFLİ BETON.....</b>	<b>44</b>
2.1 Betonda Lif Kullanımının Tarihçesi.....	46
2.2 Çimentolu Kompozitlerde Kullanılan Lif Türleri.....	48
2.3 Lifli Betondaki İyileşmeler .....	50
2.4 Çelik Lifli Betonlar.....	51
2.4.1 Çelik Lifli Betonların Mekanik Davranışı.....	51
2.4.1.1 Basınç Etkisindeki Davranış.....	51
2.4.1.2 Çekme Gerilmeleri Etkisindeki Davranış.....	55
2.4.2 Çelik Lifli Betonların Taze Hal Davranışı.....	59
2.4.3 Çelik Lifli Betonlarda Çatlak Gelişimi, Yayılması ve Gerilme	
Köprülenmesi.....	61
2.4.3.1 Agrega ve Lifin Çatlak İlerleme Bölgesine Etkisi.....	65
2.5 Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lifli Betonlar.....	70
<b>BÖLÜM ÜÇ – BETON İÇİN TEMEL KIRILMA MEKANİĞİ.....</b>	<b>78</b>
3.1 Non-lineer Elastik Kırılma Mekanîği .....	80
3.1.1 Fiktif Çatlak Modeli (FÇM).....	82
3.2 Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi .....	84
3.3 Betonun Kırılma Parametrelerini Etkileyen Faktörler .....	86
<b>BÖLÜM DÖRT – BETONDA DONMA-ÇÖZÜLME OLAYI .....</b>	<b>88</b>
4.1 Taze Betonda Donma-Çözülme .....	88



4.2 Sertleşmiş Betonda Donma-Çözülme.....	90
4.2.1 Donma Mekanizması.....	91
4.3 Hava Sürüklenmiş Beton .....	93
4.4 Buz Çözücü Tuzların Etkisi.....	96
4.5 Donma-Çözülme Hasarını Etkileyen Faktörlere Genel Bakış.....	97
4.5.1 S/Ç Oranı.....	98
4.5.2 Sürüklenmiş Hava.....	99
4.5.3 Doğunluk Derecesi.....	101
4.5.4 Agrega.....	103
4.5.5 Çimento Tipi.....	104
4.5.6 Donma Hızı.....	105
4.5.7 Minimum Sıcaklık.....	105
4.5.8 Donmada Bekletilme Süresi.....	105
4.5.9 Kür Sıcaklığı.....	106
4.5.10 Süperakışkanlaştırıcılar.....	106
4.5.11 Alkaliler.....	107
4.5.12 Viskozite Arttırıcı Katkılar.....	107
4.5.13 Lateks Katkısı.....	107
4.5.14 Örtücüler (Sızdırmazlık sağlayıcılar-sealants).....	108
4.5.15 Mikrolifler.....	109
4.5.16 Uygulanan Yük.....	110
4.5.17 Genel Değerlendirme.....	110
4.6 Donma Hasarının İçyapı Etkileri.....	111
4.7 Kendiliğinden Yerleşen Betonun D-Ç Dayanıklılığı, Puzolanların ve Liflerin Etkisi.....	118

## **BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL ÇALIŞMA.....122**

5.1 Giriş.....	122
5.2 Deneysel Programın Tanıtılması.....	122
5.3 Kullanılan Malzemeler ve Nitelikleri.....	123
5.3.1 Çimento ve Yüksek Fırın Cürufu.....	123

5.3.2 Agregalar.....	124
5.3.3 Kimyasal Katkıları.....	125
5.3.4 Çelik Lifler.....	126
5.4 Deneysel Tasarım.....	126
5.4.1 Beton Tasarımı ve Kapsam.....	126
5.5 Deneysel Yöntem ve Gerçekleştirilen Deneyleer.....	131
5.5.1 Taze Beton Deneyleeri.....	132
5.5.1.1 Taze Halde Birim Hacim Ağırlığının (TBHA) ve Hava İçeriğinin Tespiti.....	132
5.5.1.2 Çökme – Yayılma Deneylei.....	133
5.5.1.3 V-Kutusu Deneylei.....	134
5.5.2 Sertleşmiş Beton Deneyleeri.....	135
5.5.2.1 Basınç Dayanımını ( $f_c$ ) ve Elastisite Modülünün (E) Belirlenmesi.....	138
5.5.2.3 Eğilme Dayanımının ( $f_{eg}$ ), Kırılma Enerjisinin (Gf) Belirlenmesi.....	139
5.5.2.4 Donma – Çözülme Cihazı ve Çevrimler.....	142

## **BÖLÜM ALTI – TAZE HAL PERFORMANSI.....144**

6.1 Taze Beton Sonuçlarının İrdelenmesi.....	146
6.1.1 Taze Betonun Birim Hacim Ağırlığı ve Hava İçeriği.....	146
6.1.2 Yayılma Çapının ve T50 Süresinin Değerlendirilmesi.....	148
6.1.3 V Kutusu Akış Sürelerinin Değerlendirilmesi.....	152
6.2 Bölümle İlgili Genel Değerlendirme.....	154

## **BÖLÜM YEDİ – BASINÇ YÜKLERİ ALTINDAKİ PERFORMANS .....155**

7.1 Basınç Dayanımlarının ( $f_c$ ) Değerlendirilmesi.....	155
7.2 Elastisite Modüllerinin (E) Değerlendirilmesi.....	169
7.3 Bölümle İlgili Genel Değerlendirme.....	179

<b>BÖLÜM SEKİZ – EĞİLME YÜKLERİ ALTINDAKİ PERFORMANS .....</b>	<b>183</b>
8.1 Yük – Deplasman İlişkisi.....	183
8.2 Eğilme Dayanımlarının (feğ) Değerlendirilmesi.....	188
8.3 Kırılma Enerjilerinin (GF) Değerlendirilmesi.....	204
8.4 Bölümle İlgili Genel Değerlendirme.....	212
<b>BÖLÜM DOKUZ – DONMA – ÇÖZÜLME DAYANIKLILIĞI.....</b>	<b>215</b>
9.1 D – Ç Sonrası Basınç Yükleri Altındaki Performans.....	215
9.2 D – Ç Sonrası Eğilme Yükleri Altındaki Performans.....	222
9.3 Bölümle İlgili Genel Değerlendirme.....	228
<b>BÖLÜM ON – MİKROYAPI ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>230</b>
10.1 SEM Analizleri.....	230
10.2 DTA/TGA Analiz Sonuçları.....	243
10.3 Genel Değerlendirme.....	244
<b>BÖLÜM ONBİR– SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>245</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>248</b>

## **BÖLÜM BİR**

### **TEMEL YÖNLERİYLE KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON**

#### **1.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) Tanımı ve Tarihçesi**

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kendi ağırlığı altında hiçbir vibrasyona ve yerleştirme işçiliğine gerek kalmadan kalıbını doldurabilen ve bu sırada da ayrışmaya uğramayan yüksek akıcılıkta olan teknolojik bir beton türüdür. En sık donatılı alanlardan, mimari tasarım sebebiyle oluşturulmuş geometrik şekillerin elverişsiz kesitlerinden, prefabrike elemanların hazır kalıplarının vibrasyona elverişsiz kısımlarından kolayca geçebilme ve boşluksuz şekilde yerleşebilme kabiliyetine sahiptir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 KYB'nin yerleşebilirlik kabiliyeti.

KYB hiçbir iç veya dış sıkıştırma enerjisi uygulanmadan kendi ağırlığı altında akabilen, dar donatı engelleri arasında yüksek geçiş yeteneğine sahip, ayrışmaya karşı yüksek dirençli, ayrışma ve aşırı terleme yapmadan kalıpta tüm boşlukların doldurulabildiği özel bir beton türü olarak tanımlanabilir (Okamura, 1997; PCI, 2003; Yardımcı, 2008).

Kendiliğinden yerleşen beton kullanıldığı bölgeye göre “kendiliğinden sıkışan beton” veya “kendiliğinden yüzeylenen beton” adıyla da anılabilmektedir. Türkiye de “kendiliğinden yerleşen beton” adıyla daha sık anılmaktadır.

Betonda kendiliğinden yerleşebilirlik kavramı ilk olarak Tokyo Üniversitesinde, 1986 yılında Prof. Dr. Hajime Okamura tarafından ortaya atılmıştır. Su altında beton dökümü uygulamalarında, vibrasyonsuz beton dökümlerinden edinilen tecrübe göz önünde bulundurularak KYB üretilmesi hedeflenmiştir. Okamura'nın böyle bir beton türünün gerekliliğinden bahsedip imal etme isteğiyle başlayan süreç Ozawa, Ouchi ve Maekawa tarafından devam ettirilmiştir. 1988 yılında aynı üniversitede yüksek performanslı KYB prototipi üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Japon araştırmacılar tarafından KYB'nin ilk uygulamalarının Japonya'da su altı beton dökümleriyle başladığı ileri sürülse de bu konuda değişik görüşler mevcuttur. Collepardi (2001), reoplastik beton'un KYB ile benzer nitelikte olduğunu savunmaktadır. 1974'de dönemin en yeni akışkanlaştırıcıları kullanılarak Reoplastik Beton (20 cm'den büyük çökme yapabilen) adında, kohezif kıvamlı bir tür beton üretilmiştir (Khurana ve Topçu, 2000).

Zamanın standartları beton için yüksek çökme değerlerini standart dışı tutmakta olduklarından bu tür beton çok hızlı yayılamamış ancak akışkanlaştırıcıların tanınmasıyla bu sürecin önü açılmıştır (Felekoğlu, 2003).

Kendiliğinden yerleşen beton hakkında ilk yayın Ozawa tarafından 1989 yılında Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansı'nda (EASEC) sunulmuştur. Okamura tarafından yazılan ve KYB konusunda yazılan ilk kitap niteliği taşıyan bu eser Japonca olarak yayınlanmıştır. KYB'nin dünya arenasında ses getirmesi ve yaygınlaşması Ozawa'nın 1992 yılında İstanbul'daki Uluslararası CANMET-ACI konferansında yaptığı sunumla hız kazanmıştır (Felekoğlu, 2003).

1994 yılının kasımında Bangkok'da Prof.Dr.Paul Zia evsahipliğinde yapılan yüksek performanslı betonlar seminerinden sonra KYB, rasyonel inşa sistemleri ve

betonun durabilitesi üzerine çalışan araştırmacı ve mühendislerin dünya çapında bir ilgi odağı olmuştur. Hajime Okamura'nın yanı sıra 1996 da Ferguson tarafından verilen ACI konferansında KYB üretimi Kuzey Amerika'daki araştırmacı ve mühendisler tarafından incelenmiştir. Sonuç olarak dünya çapında araştırma aktiviteleri başlamıştır. Örneğın Kanada'daki araştırmalar Aictin ve grubu tarafından başlatıldı.1997 ocağında KYB üzerine çalışan RILEM komitesi kuruldu.1998 ağustosunda ise Japonya'nın Kochi kentinde KYB konferansı yapıldı (Okamura ve Ouchi, 1998).

KYB'nin prototipinin geliştirilmesinden sonra , birçok yerde özellikle de büyük yapı firmalarının araştırma enstitülerinde, yoğun araştırmalar başlatıldı. Sonuç olarak KYB birçok pratik yapı uygulamasında kullanıldı.KYB'nin ilk uygulaması, öngerilmeli kablo ile tutturulmuş bir beton köprüde,1991 yılında uygulandı. Ardından 1992 yılında, hafif KYB kablolu köprünün ana kiriş inşaatında kullanıldı. Daha sonra KYB'nin günlük hayattaki kullanımında hızlı bir artış görüldü. KYB'nin günümüzde de kullanılma sebepleri temel olarak şu şekilde sıralanabilir:

- Daha kısa yapım süresi
- Betonun vibrasyonun zor olduğu, dar ve engelli alanlara ulaşabilmesi
- Vibrasyonun inşaat saharında oluşturduğu gürültünün giderilmesi

KYB halen günlük hayatta inşaatlarda yapım süresini kısaltmak amacı ile büyük ölçekli imalatlarda kullanılmaktadır.Japonya Kobe'de 1998 nisanında açılan dünyanın en uzun asma köprüsü olan (1991 m) Akashi-Kaikyo köprüsü ,KYB uygulamasına tipik bir örnektir. KYB'nin tam bir performansla çalışmasını ortaya koyan yeni bir inşaat tekniğı bu imalatta uygulanmıştır.

şantiye yanındaki beton üretim tesisinde hazırlanan beton, döküleceğı yere 200m boyunca borularla taşındı. Döküm bölgesinde borular, 3-5 m mesafelerde yatay bir sırada düzenlenmişti. Beton, 5 m düzenli aralıklarla yerleştirilmiş vana kapılarından akıtılmıştır. Bu vanalar otomatik olarak kontrol edildiğı için yerleştirilen betonun yüzeyi muhafaza edilebiliyordu. Bu betonda kullanılan agreganın en büyük tane çapı

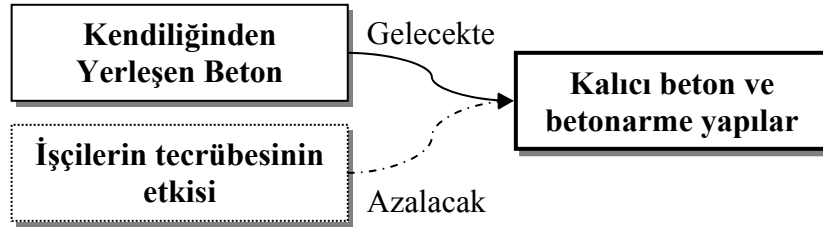
40 mm idi. Beton, 3 m'den dökülmesine ve büyük agrega çapına rağmen segregasyona uğramamıştır. Sonuç olarak KYB kullanımı ankraj yapımı süresini 2,5 yıldan, %25 oranında azaltarak 2 yıla düşürmüştür (Okamura ve Ouchi, 1998).

Kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı beton, Osaka şirketine ait geniş LNG tanklarının duvarlarının yapımında da kullanılmıştır. Buradan KYB kullanımı hakkında şu veriler elde edildi:

- Betonu yerleştiren işçi sayısı 14'ten 10'a düştü ve döküm yüksekliği arttırılabildi.
- Beton işçisi sayısı 150den 50ye düşürüldü.
- Yapım süresi 22 aydan 18 aya düşürüldü.

Bunlara ek olarak inşaat alanında kendiliğinden yerleşebilirlik için makul bir kabul edilebilirlik testi geliştirildi. Betonun dökülmesi 1998 Haziranında sona erdi (Okamura ve Ouchi, 1998).

KYB gelişimi hiperakışkanlaştırıcı katkıların gelişimiyle hız kazanmıştır. Avrupa ve Amerika'da işçiliğin pahalı olması, oluşabilecek ölümcül kazaların büyük yaptırımlara sebep olması, gelişen mimarinin elverişsiz kesitler içermesi gibi sebeplerden dolayı KYB kullanımı hız kazanmıştır. Japonya'da vasıfsız işçilikten kaynaklanan hatalar KYB kullanımı ile giderilmeye çalışılmıştır. Her coğrafyada en başta farklı ihtiyaçlarla gereksinim duyulan bu beton türü, günümüzde durabilitesi ve dayanımı ile birlikte “yüksek performanslı beton” olarak yaygınlaşmakta ve benimsenmektedir. İleride kimyasal katkıların ucuzlaması ve kalıp sistemlerinin uygunluğunun sağlanmasıyla KYB'nin geleneksel beton kullanımını önemli derecede azaltması beklenebilir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Kendiliğinden yerleşen betonun gerekliliği.

Yıkıcı depremler sonrası saptanan üç ana olguyu proje hatası, malzeme kalitesizliği ve uygulama yanlışları olarak sıralayabiliriz. Bunlardan uygulama yanlışlıkları içerisinde kolon kiriş birleşim bölgelerinde ve düşey taşıyıcı elemanlarda gözlenen vibrasyon eksikliği ile peteklenmenin kaliteli betona sahip binalarda dahi ne kadar ciddi sıkıntılara yol açtığı kolayca görülebilmektedir. Bu tür beton kimyasal katkıların ucuzlamasına paralel olarak ülkemizde de gelişmekte ve geleneksel betonun suçu olmayan ölümcül işçilik hatalarının yarattığı eksiklikleri giderebilmektedir. Bu şekilde gerçek dayanım ve dayanıklılığın ulaşmada insan elinden daha bağımsız ve daha kalıcı yapıları üretmek mümkün olacaktır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 Geleneksel betonda yetersiz vibrasyon.



Ülkemizde 2000’li yılların başından itibaren üniversitelerde hız kazanan ve Dokuz Eylül Üniversitesi’nin de öncülük ettiği çalışmalar sonucu hem prefabrike hem yerinde dökümlerde KYB kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

## **1.2 Kendiliğinden Yerleşen Beton’un Avantaj ve Dezavantajları**

KYB, yeni bir beton türü olması dolayısıyla maddi olarak ve üretim aşamasında bir takım zorluklara sahiptir. Standartlaşma yeni yeni başlamaktadır. Bu tür betonun üretim aşamasındaki zorluklar ve geleneksel betona göre pahalı oluşu dışında malzeme olarak dezavantajından pek söz etmek olası değildir.

Kendiliğinden yerleşen betonun geleneksel betondan farklı olan bu yüksek akıcılık yetisini sağlamak için kimyasal akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır. Bunun yanında viskozite artırıcı katkıları ve puzolanik olan ya da olmayan (inert) mineral katkıları da kullanılmaktadır. Çeşitli ön denemelere ve ihtiyaca göre belirlenecek optimum dizayn taze hal testlerinden geçebilmeli ve makul bir ekonomikliği sağlamalıdır. Zira ekonomiklik bu tür betonun hassas noktalarındandır.

KYB’nin üstün yerleşebilme ve sıkışabilme kabiliyeti birçok yönden betonarme inşaatlarında fayda sağladığı gibi yeni yapım teknolojilerinin de önünü açabilecek uygulama kolaylıklarını da yanında getirmiştir. KYB’nin sağladığı faydalardan bazılarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür :

- Vibrasyon ve yerleştirme işçiliğinden tasarruf
- Yapım süresinin kısaltılabilmesi
- Boşluksuz ve geçirimsiz beton elemanlar üretilebilmesi
- Vibrasyonun yarattığı gürültü kirliliğinin önlenmesi
- Dayanımı ve kalıcılığı yüksek, uzun ömürlü beton elemanların üretilebilmesi
- İşçilik hatalarından kaynaklanan çok önemli sorunların aşılması
- Estetik mimari öğelerin kolayca üretilebilmesi
- Vibrasyonun zor olduğu yoğun donatılı kesitlerde eksiksiz doldurmanın sağlanması

- Yapı ve prefabrike sektöründe kalıpların daha az zarar görerek uzun vadeli iş görebilmesi
- Güçlendirme projelerinin etkili biçimde gerçekleştirilebilmesi , dar kesitlerin kolay ıslahı
- Yüksek miktarda atık toz kullanımına uygun olması
- Yüksek yüzey pürüzsüzlüğü sağlaması
- Uygun kimyasallarla prefabrik sektöründe buhar kürü ihtiyacını giderebilmesi (Corradi vd. , 2002)

KYB'nin dezavantajlarında, üretiminde karşılaşılan zorluklar ve kalite kontrolündeki sıkıntılar büyük yer tutmaktadır. Genel manada dezavantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Kimyasal katkı fiyatları sebebiyle nispeten pahalı olması
- Tasarımının çok fazla ön deneme gerektirmesi
- Eksik standartlaşma
- Üretim koşullarına çok hassas olması (karıştırma etkinliği, agrega nemi vb.)
- Malzeme türü ve miktarındaki değişikliğin reolojiyi ve dizaynı önemli oranda değiştirmesi
- Her akışkanlaştırıcının farklı etki yaratmasının getirdiği zorluklar
- Taşıma süresinin işlenebilirlik üzerindeki olumsuz etkileri
- Yüksek oranda toz kullanımının boyutsal stabiliteyi etkileyebilmesi
- Kalıp sistemlerinin uyumsuzluğu (prefabrike elemanlar, merdivenler vb.)
- Kalifiye mühendisler kontrolünde üretilmesi ve uygulanması gerekliliği
- Pürüzsüz yüzeyin sıva tutmayabilmesi (Felekoğlu, 2003)
- Ahşap kalıpların daha dikkatli çakılmak zorunda kalınması
- Lifli beton üretiminde kendiliğinden yerleşebilirliğin zor sağlanması

Görüldüğü üzere maliyet ve üretim bakımından zorlukların bulunması KYB'nin geleneksel beton yerine geçmesine olanak vermemektedir. Ancak standartlaşmaya ve kimyasal katkı fiyatlarının düşmesine paralel kullanımı çok büyük oranda artacak ve üreticilerin tecrübesi katlanacaktır.

### 1.3 Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Tasarım Yaklaşımları ve Malzeme Seçimi

#### 1.3.1 Genel Reoloji Bilgisi ve KYB Reolojisi

Malzemelerin gerilme altındaki akış ve deformasyon davranışı reoloji bilimi içinde incelenmektedir. Yapı malzemesi olarak beton; ideal ve elastik katılara, normal akışkanlar yahut gazlara uymayan akış ve deformasyon sergilemektedir. Beton henüz prizini almamışken “taze halde” olarak nitelendirilir ve akış yaratan hamur fazı ile birlikte reolojik olarak incelenmektedir. Betonun reolojik parametreleri, gerilme altında oluşan şekil değiştirme (akış davranışı) ve şekil değiştirmenin yarattığı gerilme düzeyini işaret etmektedir. Heterojen bir malzeme olan beton için teoride kalan reoloji bilgisini deneysel verilerle düzenlemek gerekmektedir.

Reolojik parametrelerin ölçümünde reometre olarak bilinen aletler kullanılmaktadır. Taze haldeki beton, karışım suyu içerisinde katı parçacıklar olan bir süspansiyon olarak değerlendirilir. Betonun bu reolojik yaklaşıma göre değerlendirilmesinde sıklıkla UBC reometresi, BTRHEOM reometresi ve BML viskozitemetresi kullanılmaktadır. Başka türlerde reometreler ve viskozitemetreler de mevcuttur.

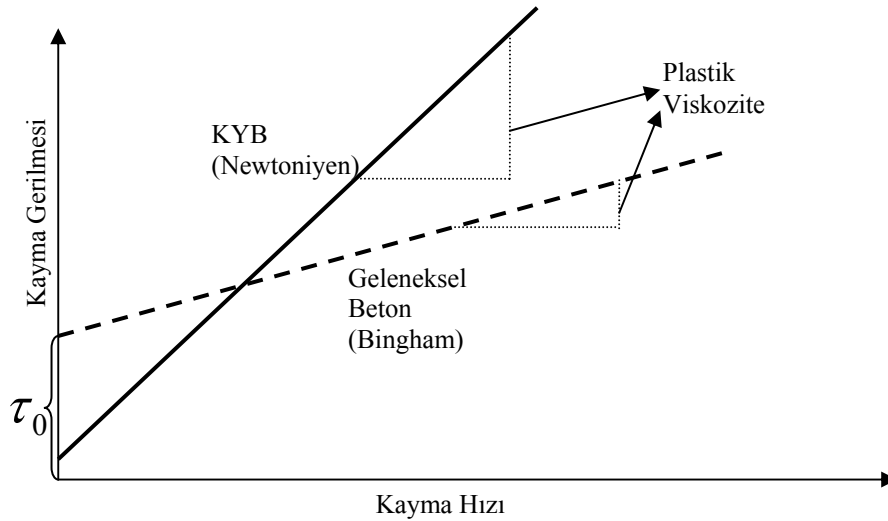
Betonun reolojisini kavramadan önce ideal bir Newtonyen olan su vb. sıvıların nasıl karakterize edildiğini açıklamak gerekir. Bu Newtonyen sıvılarında uygulanan gerilme şekil değişikliğine sebep olur. Gerilme uygulandıkça şekil değiştirme sürer. Örneğin suyun kayma gerilmesi ve kayma deformasyon hızı arasında belirli bir oran vardır. Bu davranışa “Newtonyen davranış” ve bu kurala uyan sıvılara “Newtonyen sıvısı” denmektedir. Denklem (1.1) bu davranışı özetlemektedir.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

Kayma hızının ( $\dot{\gamma}$ , 1/s) ve plastik viskozitenin ( $\mu$ , Pa.s) çarpımı kayma gerilmesini ( $\tau$ , Pa) vermektedir. Bu ifadeden anlaşılacağı üzere Newtonyen sıvılar her gerilme değerinde akışa geçebilmektedir. Diğer deyişle, bir akışkanı akışa başlatmak için aşılması gereken “eşik kayma gerilmesi” newtonyen sıvılarda yok yani “sıfır” kabul edilmektedir; ancak genelde mühendislik malzemelerinde akışa geçilmesi için aşılması gereken bir eşik kayma gerilmesi mevcuttur. Bu durum Bingham modelindeki denklem (1.2) ile ifade edilir.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.2)$$

Betonda akışın başlaması için aşılması gereken bir eşik kayma gerilmesi mevcuttur ( $\tau_0$ ). İşte bu eşik kayma gerilmesinden dolayı beton malzemesi Bingham modeline daha uygundur. Betonda bu kayma gerilmesini kohezyon ve viskozite belirler. Çimento partikülleri, agregalar ve diğer katılar ile süspansiyon olan betonda artan deformasyon hızlarında oluşan kayma direncinin artışı, düşme veya daha da artma eğiliminde olabilmektedir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 Geleneksel betonda ve KYB'de plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi.

Kayma kalınlaşması ve incilmesi olarak adlandırılabilen bu davranışlar, Bingham modelinin gelişmiş hali olan Herschel-Bulkley ile ifade edilebilmektedir. Bu modelde kayma hızının üstünde “ $e$ ” indisi tanımlanır ve  $e > 1$  ise kayma kalınlaşmasından,  $e < 1$  ise kayma incelmesinden söz edilir. Kayma kalınlaşmasında katı partiküllerin yeniden dağılması, incelmesinde ise deforme olması veya yeniden kümelenmesi söz konusudur.

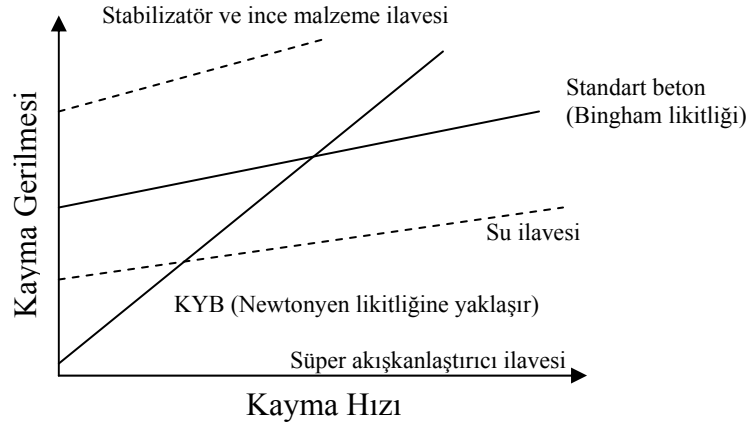
Çimento hamurunun viskozitesi daha önce maruz kaldığı kayma gerilmesinden etkilenir. Karıştırma enerjisi arttıkça plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi azalır. Williams ve arkadaşları yüksek deformasyon hızlarında viskozitenin dengelendiğini savunmaktadır. Tattersal’a göre belirli süre sabit deformasyon hızıyla karıştırıldığında taze beton viskozitesi dengeye ulaşmaktadır (Saak vd., 1999).

Kendiliğinden yerleşen betonlarda akışkanlaştırıcı ihtiva eden hamur, bekletildiğinde parçacık bağları kuvvetli haldedir ancak karıştırıldığında bu zayıf bağlar güçsüzleşir ve yeniden akıcılık gözlemlenir. Bu davranışa tiksotropik davranış denmektedir. KYB’nin eşik kayma gerilmesinin normal betona göre düşük olması ilk hareket kabiliyetini arttırmaktadır. KYB’de plastik viskozite ise daha yüksektir.

KYB aynı zamanda yalancı plastik (psödoplastik) davranış göstermektedir. Yani düşük deformasyon hızlarında yüksek, yüksek deformasyon hızlarında düşük viskozite göstermektedir. Bu sayede kolay pompalanan beton, yerinde durgunlaştığında ayrışmadan kalabilmektedir. Hem tiksotropik hem de yalancı plastik davranış KYB’yi avantajlı kılmaktadır (Yahia vd., 2002; Felekoğlu, 2002).

Taze betonun plastik davranışı Bingham Modeline yakındır. Kendiliğinden yerleşen beton gibi sıvıya yakın fakat yoğun bir süspansiyonda katı parçacıklar arası sürtünmeler deformasyon için gerekli bir eşik kayma gerilmesini meydana getirmektedir. Süperakışkanlaştırıcıların kullanımı bu eşik kayma gerilmesini azaltmakta fakat stabilite de kayıplara sebep olmaktadır. Viskozite karışım içeriğiyle oynanarak yada viskozite arttırıcı katkıları kullanarak düzenlenebilmektedir. Süper akışkanlaştırıcıların kullanımı kendiliğinden yerleşen betonu Bingham modelinden

Newtoniyen akış modeline yaklaştırmaktadır. Yani eşik kayma gerilmesini düşürmektedir. (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Betonun reolojik özelliklerinin şematizesi.

Görüldüğü üzere (Şekil 1.5) akışkan bir beton üretebilmek için akışkanlaştırıcı yahut su ilavesi gerekmektedir. Ancak su ilavesi ile betonun dayanımı düşmekte ve stabilitesi bozulmaktadır. Bunun yanında yeni nesil hiperakışkanlaştırıcıların ilavesi ile eşik kayma gerilmesi düşürülebilmektedir. Ancak viskozite de ayrışma yaratabilecek kadar düşebilmektedir. İşte KYB'nin tasarımındaki hassasiyet buradan kaynaklanmaktadır. Toz yahut ince malzeme içeriğini arttırmak veya viskozite arttırıcı kimyasallar kullanmak suretiyle akışkanlık-stabilite dengesi sağlanmaktadır.

KYB'nin akış davranışı Bingham modeli ile tarif edilebilmektedir. Ayrıca Bingham modelinin daha gelişmiş olan Herchel- Bulkey modeline de uymaktadır (De Larrard vd., 1998; Yardımcı, 2008). KYB için iki önemli parametre eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitedir. Reometre ve viskozitemetreler ile bu değerler ölçülebilmektedir. Ancak hem çok değişkenliğin olduğu hem de uygulamasının zorluğu göz önüne alındığında bu reoloji çalışmaları KYB için külfetli olmaktadır. Ayrıca şantiyede kontrole imkân tanımamaktadır. Bu yüzden EFNARC (uzman yapı kimyasalcıları ve beton sistemlerine itafen kurulmuş bir Avrupa federasyonu) KYB'nin tasarım ve test esaslarına yönelik bir rehber oluşturmuştur. Burada doldurma yeteneği, geçiş yeteneği, ayrışma direnci gibi viskozite ve reoloji ile alakalı parametreleri kolayca sınavan metotlar geliştirilmiştir. KYB tasarımı ve taze hal

testleri bir sonraki bölümde aktarılmaktadır. Burada EFNARC (2005) tavsiyeleri dikkate alınmıştır.

### ***1.3.2 İstenilen Özellikler***

Kendiliğinden yerleşen betonun ilk örnekleri 1988 yılında piyasada yerini aldı. İlk örneklerde kuruma büzülmesi, hidrasyon ıssı, sertleşmiş betonun yoğunluğu ve diğer özellikler etkin bir biçimde göz önünde bulunduruldu. Bu beton yüksek performanslı beton olarak adlandırıldı ve betonun aşağıdaki üç döneminde birtakım gerekli özellikleri sağlaması istendi.

- Taze halde: Kendiliğinden yerleşebilirlik
- Erken dönemde: Taze betonun korunmasızlığının azaltılması
- Sertleşmiş halde: Dış faktörlere karşı korunma

Aynı zamanda Aitcin tarafından yüksek dayanımlı beton, düşük su/çimento oranından dolayı yüksek performanslı beton olarak nitelendirildi. Daha sonra tüm dünyada yüksek performanslı beton terimi yüksek dayanımlı beton anlamında kullanıldı. Bu yüzden kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı beton teriminin kullanılması önerildi (Okamura ve Ouchi, 1998).

Kendiliğinden yerleşme özelliği yalnızca çimento pastası veya hamurunun yüksek deformasyon yapabilmesine bağlı olmayıp, betonun donatılar ile sınırlanmış alana yayılması sırasında iri agrega ve harç arasındaki bir segregasyon direncine de ihtiyaç duyar. Okamura ve Ozawa (1994) kendiliğinden yerleşebilirlik için aşağıdaki ipuçlarını vermiştir:

- Sınırlı agrega içeriği
- Düşük su/toz oranı
- Süper akışkanlaştırıcı kullanımı

Agrega partikülleri arasındaki çarpışma sıklığı ve temas, taneler arasındaki görelî uzaklık azalmalarını özellikle yakındaki engellerde arttırabilir, beton deforme olunca oluşan iç gerilmeler artabilir. Bu da gösteriyor ki akış için gerekli enerji, artan iç gerilmeler altında tüketilir ve agrega tanelerinin blokajına sebep olabilir. Enerji tüketimi fazla olan kaba agreganın sınırlı şekilde kullanılması bu tür blokajlardan kaçınmak için etkin rol oynar. Yüksek viskoz özellikteki çimento hamuru, beton engellerin arasından akarken kaba agreganın blokajının engellenmesi gereğini de ortaya çıkarır. Beton deforme olunca, yüksek viskoziteli çimento hamuru kaba agregaların birbirine yaklaşmasından dolayı oluşan iç gerilmedeki yerel artışları da önler. Yüksek deformasyon yeteneği, su/toz oranını düşük değerlere çeken süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasına bağlıdır.

#### *1.3.2.1 Doldurma Kabiliyeti*

KYB, tanımından da anlaşılacağı üzere kendi ağırlığı altında deforme olabilen ve başarılı doldurma yapabilen bir malzeme olmalıdır. Çökmede yayılma deneyi ile bu ihtiyaç sınanmaktadır. Deformasyon hızı ve kapasitesi arasındaki etkileşim doldurma yetisini etkiler. Bu açıdan katı partiküller arası sürtünmeler azaltılmalıdır. Ancak yüksek mertebedeki akışkanlığın getirisi olan ayrışmaya karşı önlem alınmalıdır. Öncelikle ayrışmayan ve bunun yanında yüksek akıcılıkta olan KYB başarılı bir KYB'dir.

Öncelikle çimento hamurunun akıcılığı ve deformasyon kabiliyeti arttırılmalıdır. Süperakışkanlaştırıcılar kullanılarak bu hedefe ulaşılır. Ancak su/bağlayıcı oranı da dengelenerek hamurun kusması engellenmelidir.

Tanecikler arası sürtünme betonun içsel bir gerçeğidir. Bu sürtünmeyi azaltmak için iri agreganın içeriği geleneksel betona kıyasla düşürülmelidir. Ayrıca agreganın yahut çelik lif gibi kaba taneleri taşıyacak olan iskelet, harç ve hamur fazıdır. Hamur fazının arttırılması anahtar rol oynamaktadır. Ayrıca kullanılan agregaların gradasyon uygunluğu önemlidir. Köşeli agregalar, hatalı agregalar içsel sürtünme artışını ve blokajı yaratabilir (Şekil 1.6).





Şekil 1.6 Geleneksel betonun yetersiz sıkışması.

### 1.3.2.2 Ayrışma Direnci

Beton malzemesi heterojen ve çok bileşenli bir kompozit olmasına rağmen değerlendirmelerde homojen gibi kabul edilmektedir. İşte bu kabule en yakın biçimde kalmak için betonun olabildiğince her bölgede eşdeğerlilik sağlaması istenir. Taze betonda ayrışma olayı beton bir engelle maruz kalmadan olabilecek sedimentasyonlardan yahut yetersiz karıştırmadan kaynaklanabileceği gibi, bir engelle karşılaştığında (örneğin donatılar) akıcı ve akıcı olmayan fazın ayrı hareket etmesi şeklinde de gözlemlenebilir.

KYB’de katı partiküller ile sulu fazın durağan halde bütünlüğünü koruyamaması durumunda kuma olayı yaşanır. Kuma olayı karışım suyunu tutabilecek yüzey değerlerinde veya miktarlarda toz maddenin olmayışından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden uygun su/toz oranı seçilmelidir. Ayrıca akışkanlaştırıcı katkıların bu su/toz oranında kumaya imkan verecek dozajların üzerinde kullanılmamasına dikkat edilmelidir. Şayet kumaya sebebiyet vermeyen maksimum katkı dozajı kullanıldığı halde yeterli akışkanlık sağlanamıyorsa su/toz oranı ve su içeriği yeniden gözden

geçirilmelidir. Bunun yanı sıra kusmaya sebebiyet veren viskozite eksikliği, viskozite arttırıcılar kullanarak da sağlanabilir.

Katı maddelerin ayrışmasını önlemek için düşük kaba agrega içeriği, düşük agrega maksimum çapı ve düşük su/toz oranı seçmek faydalıdır. Viskoziteyi arttıran önlemler kusmayı da azaltacaktır. Bu önlemlerin en faydalılarından biri de yüksek yüzey alanına sahip ince malzemelerin kullanılmasıdır. Ayrıca iri agregalar her zaman bir miktar çökerek yüzeye su hareketine sebebiyet vermektedir. KYB gibi çok akıcı bir betonda bu durumu engellemek için uygun miktarda harç fazının yaratılması şarttır. Böylelikle hem çelik lif hem de iri agrega gibi ağır katılar bu harç fazına tutunacaklardır.

Donatılar arasında iri agregaların yarattığı takılma sebebiyle hamur fazı geçerken agrega fazı donatılar ardında kalabilir. Bu durumu engellemek yine uygun viskozite ve düşük agrega çapı ile sağlanabilir. Bu durum yapıda düşük basınç dayanımlı bölgeler, peteklenmeler, rötre çatlaklarının artması ve üniform olmayan dayanım dağılışına sebebiyet verebilmektedir.

### *1.3.2.3 Geçiş Yeteneği*

Geçiş yeteneği, KYB'nin bir bütün halde sık donatılı veya dar kesitli bölgelerden geçebilmesidir. Bu yetiyi kazandırmada en önemli parametre ayrışma direncinin sağlanmasından sonra limitli iri agrega içeriği ve düşük maksimum tane çapının teminidir. Zira projedeki donatı aralıklarına uygun olarak maksimum agrega çapının seçilmesi yeterli olmamakta, aynı zamanda iri agregaların içsel sürtünmelerden kaynaklı yaratacağı blokajı önlemek gerekmektedir.

İri agrega içeriğinin düşük tutulması KYB tasarımının anahtar parametrelerinden biridir. Bunun yanı sıra agregaların uygun gradasyonda olması gerekmektedir. Ayrıca köşeli agregaların içsel sürtünmeyi arttırıcı etkisi unutulmamalıdır.

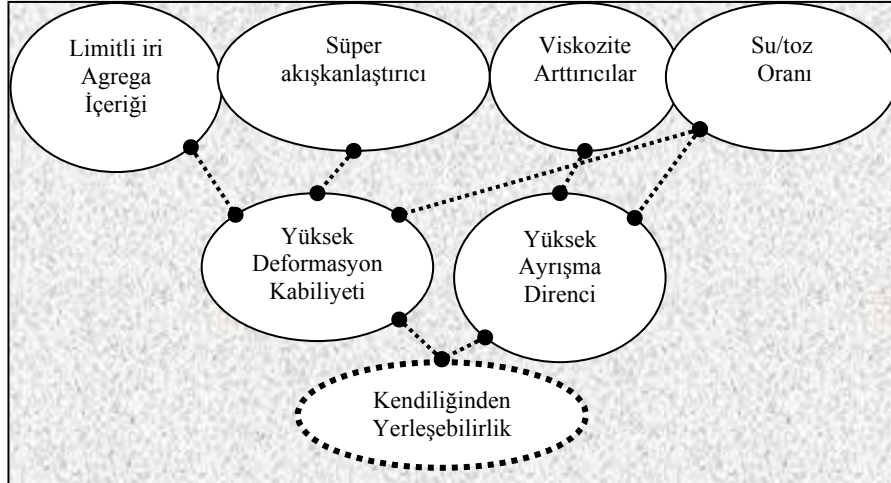
Çelik lifler gibi narınlığı yüksek katların beton içerisinde olması KYB tasarımında geleneksel betona kıyasla alınan önlemleri bir kat daha arttırmaktadır. Hem akıcılığı hem de geçiş yeteneğini blokaj olmadan sağlayabilmek için arttırılmış hamur miktarına ve akıcılık ile segregasyon arasında bir denge sağlayacak uygun viskoziteye ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 1.7).



Şekil 1.7 KYB'nin sık donatılar arasından geçişi.

### **1.3.3 KYB Tasarımı**

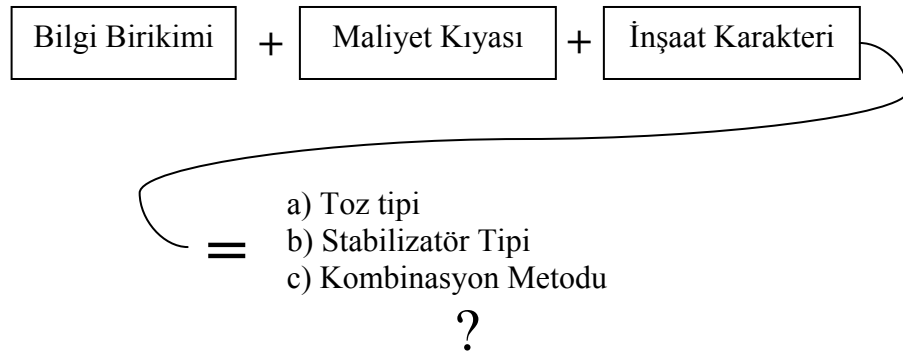
Hiçbir sıkıştırma işlemi uygulanmaksızın kalıbına yerleşebilirken, ayrışma ve blokaja karşı dirençli olan bir betonun imalatı da geleneksel betona göre daha fazla dengeleyici parametre kullanmaktan geçmektedir. KYB tasarımı çok sayıda ön deneme gerektirmektedir. İstenilen dayanım için gerekli su/bağlayıcı oranının tespitine paralel su/toz oranı da dikkate alınmalıdır. Ardından seçilecek metoda göre (toz tipi, viskozite modifiye veya ikisinin kombinasyonu) uygun karışım, harç deneylerinden elde edilecek verilerle yapılabileceği gibi tecrübe halinde doğrudan iri agrega fazıyla da belirlenebilmektedir. Birçok kritik dengeyi sağlaması beklenen bu beton türü için anahtar parametreler su/toz oranı, akışkanlaştırıcı miktarı, viskozite arttırıcı miktarı ve iri agrega içeriğidir. Bu dört parametre kullanılarak uygun viskozite, yüksek deformasyon kabiliyeti ve ayrışma direnci sağlanabilmektedir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 Kendiliğinden yerleşebilirliğe uzanan yol.

KYB'den bu kadar çok beklenti varken pratikte üretimi çok zordur. Bu yüzden uygulanacak inşaata yönelik tasarım yapılması daha mantıklıdır. Tüm beklentilerin karşılanması gerekmeyebilir (Khayat ve Daczko, 2002).

Genel olarak kendiliğinden yerleşebilirliği sağlamada üç ana yol bulunmaktadır. Bunlar toz tipi metodu, stabilizatör tipi ve her iki yöntemin uygulandığı kombinasyon tipi metodudur. Uygun olan metodun seçilmesi için yapı karakterinin ve maliyet hesaplarının yanı sıra bilgi birikiminin olduğu yöntemi seçmek doğru olacaktır. (Şekil 1.9).



Şekil 1.9 KYB üretiminde uygun yöntemin seçilmesi.

### 1.3.3.1 Tasarım Yöntemleri

1.3.3.1.1 *Toz Tipi Metodu.* Toz tipi yönteminde viskozite puzolanik veya inert fillerler kullanılarak sağlanır. Geleneksel betona kıyasla yüksek oranda toz madde içeriği mevcuttur. Temel yaklaşım toz hacminin toplam hacmin %36'sından fazla olmasıdır (Felekoğlu, 2002).

Kullanılan toz maddeler değişirse tüm karakteristik değişmektedir. Bunun sebebi gerek kullanılan tozun yüzey alanı gerekse kimyasal katkı ile uyumu ve su emme kapasitesi ile alakalıdır. Daha uzun karıştırma işlemi gerektirmektedir.

Toz malzemeyi 125 mikron altı olan inorganik her türlü malzeme olarak tanımlayabiliriz. Toz maddeler KYB'de viskozite arttırmak amacıyla kullanılırlar. Parçacık boyutunun küçülmesi parçacıklar arası etkileşimin artmasına sebep olur ve bu etkileşim viskoziteyi artırır (Sari vd., 1999). Toz malzeme olarak kullanılabilen bazı malzemeler şunlardır;

- Uçucu kül
- Doğal&yapay cüruflar
- Silika dumanı
- Kireçtaşı tozu
- Kuvartz kumu tozu
- Cam tozu

Filler kullanımı karışımın iskeletini kuvvetlendirecek, hamurun agregaya olan kenetlenmesini arttıracak, hamur hacminin çimento dozajı arttırılmadan yükseltilmesini sağlayıp gerek ekonomi gerekse büzülme karakteristiği açısından pozitif etkileyecektir.

EFNARC komitesi tarafından (2005) kohezyonu ve segregasyon direncini arttırmada kullanılan inert/puzolanik (hidrolik) katkılar aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır (Tablo 1.1):

Tablo 1.1 Su ile reaktiflik kapasitelerine göre mineral katkıları

TİP-1	TİP-2	
<i>İnert veya yarı inert</i>	<i>Puzolanik</i>	<i>Hidrolik</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mineral filler (kireçtaşı, dolomit vb.)</li> <li>▪ Pigmentler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Uçucu kül</li> <li>▪ Silika dumanı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Öğütülmüş yüksek fırın cürufu</li> </ul>

Kesin bir karışım oranı verilmemekle birlikte “the European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC)” komitesi tarafından aşağıdaki limitler önerilmiştir (Tablo 1.2):

Tablo 1.2 Önerilen karışım oranları (EFNARC, 2005)

BİLEŞENLER	Tipik Kütle Oranları ( $kg/m^3$ )	Tipik Hacim Oranları ( $litre/m^3$ )
Toz	380–600	-
Pasta	-	-
Su	150–210	-
İri agrega	750–1000	-
İnce agrega (kum)	<i>İçerik diğer bileşenleri hacmine göre belirlenmelidir. Genel olarak toplam agrega ağırlığının %48-55'i</i>	
Su/toz oranı (hacimsel)	-	0,85–1,10

Hughes vd. (2002) geleneksel beton ve toz tipi metoduyla üretilen KYB'nin tasarım açısından farklılığını aşağıdaki şekilde kıyaslamıştır (Tablo 1.3):

Tablo 1.3 Önerilen karışım oranları (EFNARC,2005)

Parametreler	Geleneksel Beton	KYB
Harç (%)	55~60	60~67
Kum/tüm agrega	0,42~0,50	0,5~0,57
Su/toz (hacimce)	1,2~1,3	1~1,16
Su/çimento (ağırlıkça)	0,37~0,4	0,37~0,41

KYB'de toz tipi metodu hakkında yapılan öneriler dışında da beton üretmek mümkündür. Yapılan çalışmalar ışığında esnek tasarımlar yapılabilmektedir. KYB'nin ilk tasarım yöntemi olan Okamura Yöntemi, toz tipi metodunu kullanmaktadır. Bu yöntemde iki ana başlık mevcuttur. İlk bölümde KYB dizaynı,

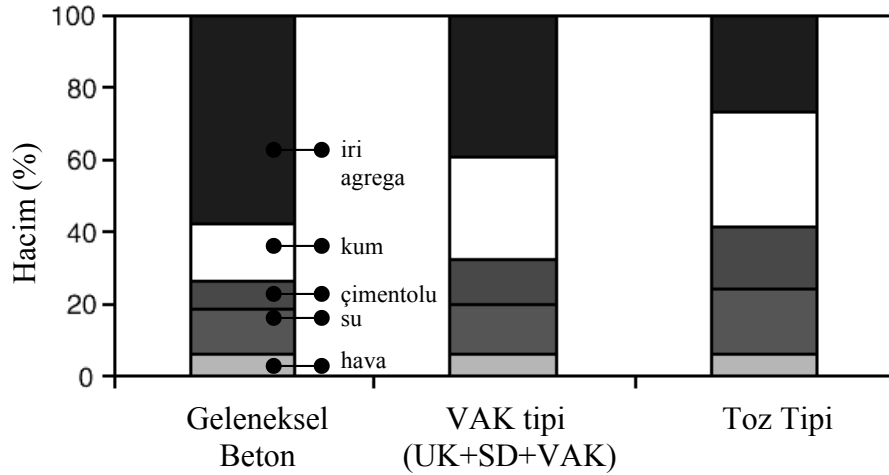
ikinci bölümde üretim ve yerleştirme hakkında bilgiler verilmiştir. Okamura yönteminde ilk etapta hamur ve harç tasarımları sınanmakta ve ardından beton dizaynına geçilmektedir (Felekoğlu, 2002). Ancak bu yöntem yoğun tecrübe ve mini aparatlarla test yapılmasını gerektirmektedir. Çoğu üretim tesisi bu metodu zahmetli bularak kullanmamaktadır.

*1.3.3.1.2 Stabilizatör Tipi Metodu.* KYB üretiminde viskozite tozlarla arttırılabileceği gibi çeşitli kimyasallarla da arttırılabilmektedir. Bu katkıları viskozite arttırıcı katkıları (VAK) veya stabilizatörler denmektedir. VAK'lar genelde taze betonun yerleştirme ve üretim aşamalarında kalitedeki değişkenliği azaltabilmek, stabilite sağlamak amacı ile kullanılır (Berke vd., 2002).

VAK'ları geleneksel pompalanabilirlik sağlayıcı katkılarından olan modifiye selüloz ve nişasta türevleri ile polietilen glikol ve biopolimerler olarak iki ana sınıfa ayırmak mümkündür (Collepari, 2001). Modifiye selüloz ve nişasta türevlerinin çimento tanecikleri yüzeyine birikerek akışkanlaştırıcının etkisini azalttığı ve priz geciktirdiği bilinmektedir (Nagataki, 2000). Ayrıca yine Collepari (2001)'e göre ikinci grup VAK'lardan olan Welan Gum ve Diutan Gum daha etkilidir.

Bu kimyasalları kullanarak toz tipine göre önemli ölçüde daha az toz ile KYB üretilebilmektedir. 300-350 kg/m<sup>3</sup> toz içeriğinde ve bol miktarda iri agrega ile (>1000 kg/m<sup>3</sup>) KYB üretilebilmektedir (Bury ve Christensen, 2002).

Geleneksel betonda kullanılan iri agrega miktarı KYB'de azaltılmaktadır. Toz tipi metodunda bu azalma en büyük miktardaiken, stabilizatör tipinde biraz daha fazla iri agrega kullanılabilmektedir (Şekil 1.10).



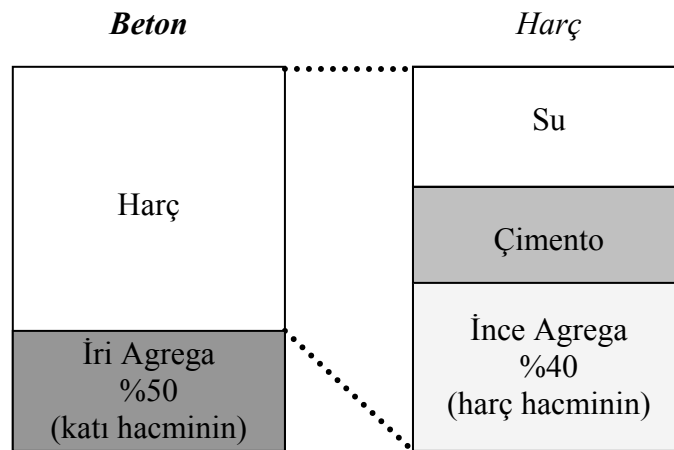
Şekil 1.10 Yaklaşık aynı dayanımdaki geleneksel beton ve KYB'nin farklı dizayn tipinde bileşen dağılımı (Okamura ve Ouchi, 1998).

*1.3.3.1.3 Kombinasyon Metodu.* Hem toz tipinde olduğu gibi nispeten yüksek toz madde içeriğinin hem de viskozite arttırıcı kimyasalların kullanıldığı metottur. Uygun VAK ve kimyasal katkıının tespiti için çok sayıda ön deneme yapılması gerekmektedir. Ayrıca iki metod hakkında da bilgi ve tecrübe sahibi olmayı gerektirdiğinden zor bir yöntemdir.

Felekoğlu vd. (2003-a), KYB üretiminde taş tozu ve uçucu kül kullanılarak viskozite arttırmanın, kimyasal VAK'lara göre daha başarılı olduğunu deneysel olarak göstermişlerdir. Ayrıca mineral katkıları açısından zengin KYB karışımların daha az mineral katkı içeren ancak, organik veya yarı organik VAK içeren karışımlara göre yerleşebilirlik, priz süresi ve basınç dayanımı gelişimi açısından daha iyi performans sergilediğini vurgulamışlardır.

*1.3.3.1.4 Japon ve CBI Tasarım Yöntemleri.* Okamura ve Ouchi (1999) tarafından oluşturulan bu yaklaşımda hamur ve harç fazı amaca göre belirlenir ve betona geçiş yapılır. Hamur, harç ve sonrasında beton taze hal testleri yapılır. Japon tasarım yönteminde maksimum agrega çapı 20 mm'den küçüktür ve kaba agrega maksimum doluluk oranı hesaplanmaktadır. Belli bir hazneyi dolduran iri agrega miktarının hacmen %50'si kullanılır. Kalan %50'lik hacim ise harç fazıdır. Harç fazı sırasıyla %60 ve %40 hamur ve ince agrega ile teşkil edilir (Şekil 1.11).





Şekil 1.11 Japon metodunda KYB.

İsveç Çimento ve Beton Araştırma Enstitüsü (CBI) tarafından önerilen dizayn yöntemi de sıklıkla kullanılmaktadır. Agregalar arası boşluk miktarını ve dar engellerden geçişte agrega etkisi temeline dayanan bu yöntemde L-kutusu deneti sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde bloklanma değeri, agrega çapı ve engel açıklığı arasındaki ilişki ile değerlendirilmektedir. Bu yöntemin de başarılı olduğu bilinmektedir (Petersson vd., 1998).

### 1.3.3.2 KYB için Örnek Karışımlar

Toz tipi metodunda KYB dizayn ederken uygun toz türü ve miktarı seçilmelidir. VAK veya kombinasyon metotları kullanılacaksa arttırılmış toz hacminde uygun dozajda VAK'ın seçilmesi önemlidir. Bu seçim sırasında yapısal durumlar, mevcut malzeme stoku, beton üretim tesisinin kapasitesi gibi unsurlar göz önünde tutulmalıdır. Sıradaki tablolarda KYB'nin projenin gereklerine uygun bazı karışım tasarımı örnekleri sunulmaktadır. Geleneksel betona kıyasla yüksek toz içeriği ve yüksek katkı gereksinimi göze çarpmaktadır.

Tablo 1.4'te Japonya'da kullanılan tipik karışım oranları verilmiştir. Burada "J1" karışımı toz tipi metoduyla üretilmiştir ve LNG tanklarında kullanılmıştır. "J2" karışımı bir keson temel uygulamasında kullanılmıştır. "J3" tipi ise alışlagelmiş bir betonarme inşaatında kullanılmıştır.

Tablo 1.4 Japonya’da kullanılan KYB örnekleri

Malzemeler	Karışım J1 (Toz-tipi)	Karışım J2 (VAK-tipi)	Karışım J3 (Kombine)
Su, kg	175	165	175
Portland Çimentosu, kg	530*	220	298
Uçucu Kül, kg	70	0	206
Granüle Yüksek Fırın Cürufu, kg	0	220	0
Silika Dumanı, kg	0	0	0
İnce Agregası, kg	751	870	702
Kaba Agregası, kg	789	825	871
Hiperakışkanlaştırıcı, kg	9.0	4.4	10.6
VAK, kg	0	4.1	0.0875
Çökmede Yayılma Çapı, (mm)	625	600	660

\*Düşük hidratasyon ısıklı Portland çimentosudur.

Tablo 1.5’te ve 1.6’da Avrupa ve amerikada kullanılan üçer farklı tasarım verilmiştir. Verilen bu karışımlarda da Japonya’dakine benzer biçimde nispeten düşük su miktarı ve yüksek toz miktarı gözlemlenmektedir. Yörelere bilgi birkimi ve malzeme stokuna göre değişen karışımlar olduğu söylenebilir. Ayrıca farklı işlerde farklı KYB metotları kullanıldığı söylenebilir.

Tablo 1.5 Avrupa’da kullanılan KYB örnekleri

Malzemeler	Karışım E1	Karışım E2	Karışım E3
Su, kg	190	192	200
Portland Çimentosu, kg	280	330	310
Uçucu Kül, kg	0	0	190
Kireç Taşı Tozu, kg	245	0	0
Granüle Yüksek Fırın Cürufu, kg	0	200	0
Silika Dumanı, kg	0	0	0
İnce Agregası, kg	865	870	700
Kaba Agregası, kg	750	750	750
Hiperakışkanlaştırıcı, kg	4.2	5.3	6.5
VAK*, kg	0	0	7.5
Çökmede Yayılma Çapı, (mm)	600–750	600–750	600–750

\*viskozite arttırıcı katkı

Tablo 1.6 Amerika’da kullanılan KYB örnekleri

Malzemeler	Karışım U1	Karışım U2	Karışım U3
Su, kg	174	180	154
Portland Çimentosu, kg	408	357	416
Uçucu Kül, kg	45	0	0
Granüle Yüksek Fırın Cürufu, kg	0	119	0
Silika Dumanı, kg	0	0	0
İnce Agregası, kg	1052	936	1015
Kaba Agregası, kg	616	684	892
Hiperakışkanlaştırıcı, kg	1602	2500	2616
VAK, kg	0	0	542
Çökmede Yayılma Çapı, (mm)	710	660	610

\*viskozite arttırıcı katkı

### 1.3.4 Malzeme Seçimi

KYB'yi oluşturacak malzemelerin seçimi, tasarımında olduğu gibi önemli bilgi birikimi isteyen bir iştir. Hem olağanüstü reolojik gereksinimler karşılanacak, hem ekonomiklik göz önünde tutulacak hem de kalıcılık özellikleri hesaba katılacaktır.

Taze halde kendiliğinden yerleşebilirlik yetisini sağlarken, kalıbın içinde durağan hale gelen betonun ayrışmamasını ve terlememesini sağlamak yeterli miktarda deformasyon kabiliyeti ve yeterli derecede viskozluk gerektirmektedir. Ayrışarak kendiliğinden yerleşebilen betona KYB demek doğru değildir. Kullanılan bağlayıcının ve tozların inceliğinden, yüzey karakterine kadar birçok parametre viskoziteyi ve şekil değiştirme yeteneğini etkilemektedir. Bu açıdan hedef dayanım sınıfı belirlendikten sonra, uygun bağlayıcı miktarı ve türü belirlenmelidir. Bu bağlayıcı ve toz içeriğinin oluşturduğu hamur ile agregaların etkileşimi diğer bir konudur. Uygun agrega içeriği, ince-kaba dağılımı ve agrega türleri belirlendikten sonra tüm sistemin ayrışmadan üstün reolojik özellik gösterebilmesi için gerekli kimyasal katkı dozajı ve türü belirlenmelidir.

#### 1.3.4.1 Filler ve Çimento Seçimi

Kullanılacak çimento ve mineral katkıları kalıcılık özelliği de dikkate alınarak seçilmelidir. EFNARC (2005) kullanılacak çimento dozajının büzülmeyi arttıracak gereğiyle  $500 \text{ kg/m}^3$  dozajının altında olmasını tavsiye etmektedir. Yine aynı tavsiyelerde toplam toz madde miktarının  $500 \text{ kg/m}^3$  değerinin altında olmaması önerilmektedir. Bu durumda ilave puzolanik veya inert tozlar kullanılmalıdır. Eğer VAK kullanılacaksa bu toz dozajının altında tasarımlar yapılabilmektedir. Çevresel etki faktörleri dikkate alınarak uygun çimento dozajı ve uygun mineral katkı seçilmelidir.

$C_3A$  bileşeni yüksek olan çimentolarda erken dayanım kazanma özelliği artsa da taze halde birtakım sıkıntılar yaratabilmektedir.  $C_3A$ 'sı yüksek çimento kullanmak akışkanlaştırıcı etkisini azaltabilmekte ve daha yüksek maliyetlere sebep

olabilmektedir (Felekoğlu, 2003; EFNARC, 2002; Kadri vd., 2000). Hızlı işlenebilirlik kaybı yaratması muhtemel bu tür çimentolar aynı zamanda durabilite problemlerine (sülfat saldırısı) sebep olabilmektedir. Taze hal için düşük hidratasyon ısılı çimentoların kullanılması avantaj olabilmektedir. Ancak kış ayları gibi donma etkisi altında KYB için uygun çimentoların hidratasyon ısısının fazla olması istenebilir.

Çimento üretiminin çevreye verdiği zararları ve tonlarca endüstriyel atığı göz önüne aldığımızda mümkün olan en fazla miktarda taş tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. toz malzemeyi birlikte kullanmak ve çimento dozajını minimize etmek doğru olacaktır (Tang vd., 2000).

KYB için en önemli malzeme şüphesiz toz malzemelerdir. 125 mikrondan daha ufak boyutlu malzemelere toz denmektedir. Bunun dışında bazı araştırmacılar 100, 80, 75 mikronluk malzemeleri toz olarak tanımlamıştır. Artan toz malzeme ile viskozite artmaktadır. Parçacıklar arası sürtünme ve su emme kapasiteleri ile betonu daha viskoz hale getirirler. Puzolanik özellikte olan uçucu kül, silis dumanı, doğal ve yapay cüruflar çimentoya ikame edilebilmekte ve hem çevresel hem ekonomik hem de beton özellikleri açısından birçok fayda sağlayabilmektedirler. Bunun dışında bağlayıcılığı olmayan fakat hamur fazını arttırmada kullanılan inert tozlar vardır. Bunlara örnek olarak kuvars, kireçtaşı, cam tozları verilebilir.

Toz malzemeler için Blaine inceliği değeri yeterli olmamaktadır. Bu açıdan çalışmalarda parçacık boyut analizi değeri de verilmektedir. Bu küçük parçacıklar agregalar arasına girerek doldurucu etki yaparlar. Mekanik ve kalıcılık özelliklerini bütünüyle etkilerler. Kendiliğinden yerleşen betonlar için  $650 \text{ kg/m}^3$  dozajlarına kadar toz malzeme kullanılmaktadır. Aşırı toz malzeme katkı gereksinimini arttıracığından, toz miktarı optimize edilmesi gereken bir değiştir.

Toz malzemelerin seçiminde kalıcılık ve geçirimsizlik göz önüne alınmalıdır. Çevresel etkilere göre uygun puzolanik malzeme seçilmelidir. Mineral katkıların mekanik özellikleri ve performans değerlendirmelerine göre KYB içerisinde ne

dozajda kullanılacağı ön denemeler ile belirlenmelidir. Örneğin, silis dumanı toplam toz miktarının (çimento+silis dumanı)  $400\text{--}450\text{ kg/m}^3$  olduğu bir KYB dizaynında  $50\text{ kg/m}^3$  dozajda kullanılırken, uçucu kül toplam toz miktarının  $500\text{--}600\text{ kg/m}^3$  olduğu bir KYB dizaynında  $100\text{--}150\text{ kg/m}^3$  dozajda kullanılmaktadır (Felekoğlu, 2003).

Yazıcı (2007) tarafından yapılan çalışmada yüksek oranda uçucu kül ikamesi ve bu ikameye ek olarak %10 silis dumanı ikamesinin durabilite ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Çalışmada uçucu külün yüksek performanslı KYB üretiminde bol miktarda (%60'lara kadar) kullanılabileceği, durabilite (donma-çözülme, klor işleme rezistansı) açısından tatminkar sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Silis dumanı ile birlikte uçucu kül daha da iyi performans sergilemiştir. Mekanik özellikler açısından da tatminkar sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca yüksek miktarda Portland çimentosu kullanımına göre büzülmenin ve hidrasyon ısısının önemli oranlarda düşürülebileceği vurgulanmıştır.

İnert ve puzolanik malzemelerin çok farklı karakteristikleri vardır. İnert malzemeler sadece iyi doldurucu malzemeler ve su emici malzemeler olarak çalışmaktadırlar. Ancak puzolanik özellikteki mineral katkıların bunun yanı sıra bağlayıcı etkisi vardır. Tablo 1.7'de bazı araştırmacılar tarafından elde edilmiş toz malzeme etkileri özetlenmiştir. Puzolanların etkinliğinin öğütülüşünden, üretiminde maruz kaldığı birçok işleme göre değişebildiği unutulmamalıdır. Tüm toz maddeler KYB için vazgeçilmez bileşenlerdir. Toz malzemeler kullanılmadan üretilecek KYB'de yeterli hamur hacminin sağlanması için  $650\text{--}750\text{ kg/m}^3$  çimento kullanılması gerekebilirdi. Bu şekilde hem büzülme çatlakları önemli derecede artar, hem gerekli kimyasal katkı miktarı artar, hem de maliyet çok fazla artar. Bu açıdan KYB, tüm endüstri atığı tozların değerlendirilebileceği ve ileriki yıllarda daha farklı tozların kullanım potansiyelinin sınanabileceği bir üründür.

Tablo 1.7 Mineral katkıların bazı etkileri

Toz	<i>Olumlu&amp;Olumsuz Bazı Etkiler</i>
KT	<p>(-)agrega yüzeyine yapışması sonucu ara yüzey zayıflatması ve dayanım düşüşü yaratması (Peterson, 2002; Ho vd., 2002)</p> <p>(-)KYB’de eşik kayma gerilmesini bazı puzolanlara kıyasla arttırması (Baoju, 2000;Felekoğlu, 2003)</p> <p>(-)Dolomit kökenliyse alkali-karbonat reaksiyonu yaratabilmesi (Felekoğlu,2003)</p> <p>(+)Granit tozuna kıyasla daha az kusurlu tane içermesi (Felekoğlu,2003)</p> <p>(+)KYB’de su değişkenliğinin olumsuz etkilerini azaltması (Westerholm vd., 2002)</p> <p>(+)KYB’de kür hassasiyetini azaltması, erken dayanımı hızlandırması (Ho vd., 2002;Pettersson, 2002)</p> <p>(+)Yüzey rengini açması (Felekoğlu, 2003;Khurana&amp;Topçu, 2000)</p> <p>(+)Atık malzeme tüketimi neticesinde olumlu çevresel etki yaratması</p> <p>(+) KYB’de ucuz bir viskozite arttırıcı olarak bol miktarda kullanılabilmesi</p>
UK	<p>(-)KYB’de düşük erken dayanım yaratması (Bouzoubaa&amp;Lachemi, 2001; Shadle&amp;Somerviller, 2002)</p> <p>(-)KYB’de çimentoya ikame durumunda inceliğe bağlı olarak akıcılık üzerinde kararsız etki yaratabilmesi (Jacobs&amp;Hunkeler, 1999)</p> <p>(+)KYB’de hidrasyon ürünlerini arttırması,poroziteyi azaltması, gradasyon düzenlemesi, optimim sıkışma sağlaması, dayanıklılığı arttırması (Jianxiong vd., 1999)</p> <p>(+)KYB’de hidrasyon ısını ve hızını azaltarak rötre çatlaklarını azaltması (Bouzoubaa&amp;Lachemi, 2001; Shadle&amp;Somerville, 2002)</p> <p>(+) Artık bir ürün olarak KYB’de bolca kullanıma ve ekonomik&amp;çevresel faydalara sebep olması</p> <p>(+)Ucuz bir viskozite arttırıcı olması</p> <p>(+)Zeta potansiyelini arttırarak akışkanlaştırıcı gibi çalışması (Termkhajornkit, 2002)</p> <p>(+)Atık malzeme tüketimi neticesinde olumlu çevresel etki yaratması</p> <p>(+) KYB’de ucuz bir viskozite arttırıcı olarak bol miktarda kullanılabilmesi</p>
SD	<p>(-)Yüksek yüzey alanı yüzünden kimyasal katkı absorpsiyonu yaparak katkı etkinliğini azaltır (Punkki vd., 1996)</p> <p>(-) %15 (ağırlıkça) ikamesi üzerinde kullanılırsa hızlı işlenebilirlik kaybı yaratması ve hidrasyon ısını yükseltmesi (Kadri vd., 2000)</p> <p>(+)Düşük çimento dozajlarında (300-350 kg/m<sup>3</sup>) KYB için etkili bir viskozite arttırıcıdır (Türkel&amp;Felekoğlu, 2003)</p> <p>(+)Puzolanik reaksiyon hızı diğer puzolanlara göre yüksek olması (Skarp vd., 2002)</p> <p>(+)İlave kristal yapı oluşturarak erken dayanımı arttırıcı etkisi (Sari vd., 1999)</p> <p>(+)Yüksek performanslı KYB üretiminde sık kullanılan bir malzeme olması</p>
YFC	<p>(-)Artan YFC ikamesiyle erken dönem basınç dayanımı ve KYB yayılma çapı düşüşü (Fang vd., 1999)</p> <p>(+)Hızlı puzolanik reaksiyona girerek erken dayanımı arttırıcı etkisinin olması (Fang vd., 1999)</p> <p>(+)Boşluksuz kalıp yüzeyi yaratması ve poroziteyi azaltması (kalıcılık faydaları)</p> <p>(+)Klor geçirimsizliğini azaltması</p> <p>(+)KYB üretiminde en yüksek ikamelerde kullanılabilen bir puzolan olması (%50-60'lara kadar)</p> <p>(+)Kendi başına da bir miktar bağlayıcılığının olması</p> <p>(+)Atık bir ürün olarak bol miktarda değerlendirilebilmesi</p> <p>(+)KYB’de akışkanlaştırıcı tasarrufu yaptırabilmesi</p>

(+)Olumlu etki, (-)Olumsuz etki, KT: kireçtaşı tozu,UK:uçucu kül, SD:silis dumanı, YFC:öğütülmüş yüksek fırın cürufu

### 1.3.4.2 Agregaya Seçimi

KYB bileşeni olarak agregaya geleneksel beton ile aynı minerolojik özellikte olmalıdır. İstenilen mekanik özelliklere göre kireçtaşı, bazalt gibi agregaya türleri kullanılabilir. İnce agregaya olarak doğal ve kırma kum tek başına veya harman şeklinde kullanılabilir. Doğal kum ve doğal iri agregaya daha yuvarlak ve köşesiz yapıda olduğundan işlenebilirliğe olumlu katkı sağlamaktadır. Ayrıca tozu daha ince ve bol miktarda olan kırma kum dozajı çok fazlaysa bu da aşırı viskozite artışına sebep olmaktadır. Bu açıdan ince agreganın harman kullanılması daha elverişli gibi gözükmektedir.

Geleneksel betondan farklı olarak KYB bileşeni olarak kullanılacak iri agreganın daha düşük maksimum tane çapına sahip olması istenmektedir. Sari vd. (1999)'ne göre KYB'de en büyük agregaya çapı 5 ila 20 mm arasında değişir ama V-hunisinde bloke olma riski hesaba katılarak 15 mm seçilmesi uygundur. Benzer bir öneri de Collepari (2001)'dendir. Ayrışma direncini arttırmak için 15 mm maksimum çapı uygun bulunmuştur.

İnce agregaya/ kaba agregaya oranı gerek taze hal özellikleri açısından gerekse kırılma parametreleri açısından önemli bir parametredir. Fang vd. (1999), kum oranının toplam hacmin %45-48'i arasında tutulması halinde ideal kendiliğinden yerleşebilirlik değerinin en yüksek basınç dayanımında sağlanacağını öne sürmüşlerdir. Ayrıca kum miktarı artıp, kaba agregaya miktarı azaldıkça, azalan içsel sürtünme ile yayılma çapları yükselme eğilimi göstermektedir. KYÇLB tasarımında KYB'ye göre nispeten düşük miktarda iri agregaya kullanılması faydalı olacaktır. KYÇLB'de en iyi reolojik özelliklere, en yüksek mekanik özellikler ile en yüksek sünekliğe sahip ve ekonomik karışımların oluşturulması için seçilmesi gereken optimum ince agregaya/ kaba agregaya oranının, kullanılan lif narınlığına göre değiştiği ortaya konmuştur (Yardımcı, 2008).

İnce gradasyonlu iri agregaya KYB'nin hareket kabiliyetini arttıracaktır. Ayrıca kusurlu agregalardan arınmış kaliteli malzeme kullanımı çok önemlidir. Kesikli



gradasyonun akış yeteneği arttıracakını savunanlar olduğu gibi (EFNARC, 2002), sürekli gradasyonu da önerenler mevcuttur (Hughes vd., 2002).

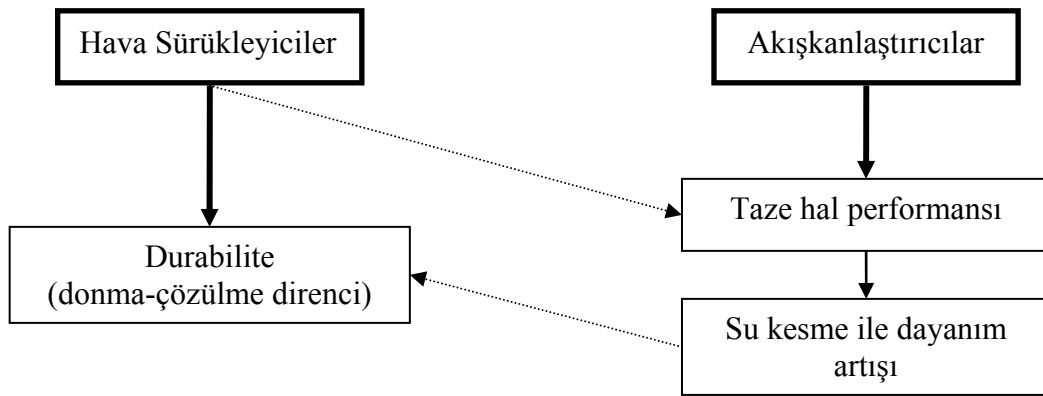
Agregaların saklanma koşulu KYB için geleneksel betondan daha kritiktir. Nem tayininin düzenli yapılması esastır. Hatta agregadaki fazla/az su içeriğinin karışım suyundan ayarlanması, taze hal özelliklerini ve katkı etkinliğini çok önemli derecede etkileyebilmektedir. Bu açıdan, sürekli kullanılan karışım reçeteleri mevcutsa bu reçetelerin kuru yüzey doygun agregalara göre tasarlanması ve stoktaki agregaların da kuru yüzey doygun halde tutulması üretim kontrolü açısından kolaylık sağlayacaktır.

#### *1.3.4.3 Kimyasal Katkıların Seçimi*

Kimya alanındaki teknolojik gelişmelerle üreticilerinin ihtiyaç duyduğu beton özellikleri, geleneksel yaklaşımdan uzaklaşarak sağlanabilmeye başlamıştır. KYB bu örneklerin belki de başında gelmektedir. Hem üstün deformasyon kabiliyeti, hem yüksek dayanım ve dayanıklılık, su azaltıcı akışkanlaştırıcılar ile kolayca sağlanabilmektedir. Bunun yanında viskozite arttırıcı kimyasallar da KYB için başka tasarım teknikleri oluşturulmasına imkan vermektedir.

Kimyasal katkıların betonlarda sıklıkla kullanılanları; akışkanlaştırıcılar, hava sürükleyiciler, priz hızlandırıcı ve geciktiriciler, viskozite arttırıcılar, büzülme engelleyiciler, renk pigmentleri, alkali aktivatörler olarak özetlenebilir. Tüm bu katkıları ticari olarak üretilebilmektedir. Bu katılardan birden fazlasının aynı anda kullanımı söz konusuysa üreticinin belirttiği uyumluluk listelerine muhakkak dikkat edilmelidir. Ayrıca kimyasal katkıları için üretici tarafından belirtilen dozajlar sadece fikir verici olduğundan, uygun dozajlar deneme dökümleri ile belirlenmelidir.

Kimyasal katkıların hem mekanik özelliklere hem de kalıcılık özelliklerine dolaylı veya doğrudan etkisi bulunmaktadır. KYB üretiminde sıklıkla kullanılan hava sürükleyici ve hiperakışkanlaştırıcı katkıların eşzamanlı etkileri mevcuttur (Şekil xx.)



Şekil 1.12 Kimyasal katkıların yarattığı sinerji.

Akışkanlaştırıcı katkıları ile çimento arasındaki etkileşim fizikseldir. Katkısız çimento hamuru, karma oksitlerinin elektro-potansiyellikleri gereği, birbirlerini elektrostatik etkiyle çekerek kümelenir. Çimentodaki karma oksitlerin oranı bu etkiyi artırır veya azaltır.  $C_3S$  ve  $C_2S$  negatif zeta potansiyeline sahipken,  $C_3A$  ve  $C_4AF$  pozitif zeta potansiyeline sahiptir. Bu da çimento taneciklerinin su veya nem ile temas ettiğinde topaklaşmasına sebep olur. Katkı ilavesi ile tüm çimento karma oksitlerinin negatif zeta potansiyeline sahip olduğu deneysel olarak ortaya konulmuştur (Yoshioka vd., 2002 ; Tandırlı vd., 2000; Felekoğlu, 2002). Tüm bileşenlerin negatif yüklenmesi topaklaşmayı önler. Yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar olarak da isimlendirilen polikarboksilik asit bazlı katkıları kullanıldığında, çimento taneciklerinin beton içerisinde dağıtılması yalnızca elektiriksel itki ile değil, aynı zamanda uzun yan dallar içeren polimer zincirlerinin çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten fiziksel bir itki oluşturması ile de sağlanır (Sağlam, 2000).

Son 30 yılda akışkanlık sağlama ve su kesme amaçlı en yaygın kullanılan kimyasal katkıları; melamin, naftalin formaldehit kondensatları, modifiye lignosülfonatlar ve suda çözülebilen sentetik polimerlerdir (Felekoğlu, 2003). KYB'nin gelişimine paralel olarak alternatif kimyasal katkıları da geliştirilmiştir. Bunların geliştirilmesinde amaç, mevcut katkıları bazı yetersizlik ve dezavantajlarını (hızlı işlenebilirlik kaybı, su kesme kapasitelerinin düşüklüğü)

ortadan kaldırmaktır. İşlenebilirlik kaybı, geleneksel katkıların en büyük problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıcaklık, çimento tipi ve dozajından bağımsız olarak işlenebilirliğini uzun süre koruyan beton üretmek için akrilik polimer tabanlı katkılar, geleneksel melamin ve naftalin sülfonat bazlı katkılara göre daha etkilidir (Collepari, 2001). Pratikte taze beton uzun süre taşınacaksa, normal dozaj dışında düşük dozajlarda süperakışkanlaştırıcı ilavesi yapılarak karışımın işlenebilirliği korunabilir. Katkı ilavesine, karışım istenen kıvama şantiyede ulaşmaya kadar devam edilir (Al-Manaseer & Albert, 1995). Melamin ve naftalin sülfonat bazlı katkılarda yaşanan bu sorun, karıştırma sonrası katkı ilavesi ile çözülebilmekte fakat bu da ilave katkı maliyeti getirmektedir. Akrilik polimer bazlı katkıların kullanılması ile ek maliyet ortadan kalkar (Collepari, 2001).

KYB dizaynında kullanılan polikarboksilat bazlı katkı dozajının düşük olması, (ağırlıkça toplam toz miktarı olarak % 1'in altında) işlenebilirlik kaybının hızlanmasına sebep olmaktadır (Shi vd., 2002). Uzun süre işlenebilirlik gerektiren işlerde betona sonradan kontrollü biçimde katkı katılması yahut ilk dizaynda belirli oranda fazladan katkı konulması faydalı olacaktır. KYB'de kullanım alanına göre, farklı işlenebilirliği koruma süreleri talep edilmelidir. Örneğin, hazır betonda 90 dakika, prefabrike betonda 45 dakika işlenebilirliğin korunması beklenmektedir (Khurana ve Topçu, 2000).

Kimyasal katkıların etkinliği özellikle çimentonun katkıyı absorbe etme kapasitesine de bağlıdır. Bu da zaman ve çimento tipinin bir fonksiyonudur. Yapısı gereği,  $C_3A$  ve  $C_4AF$ , diğer iki bileşen olan  $C_3S$  ve  $C_2S$ 'e göre çok daha fazla katkı absorbe ettiği için, çimento tipi işlenebilirlik açısından oldukça etkilidir. Çimento seçimi bölümünde sözü edildiği gibi  $C_3A$  içeriği fazla olan çimentolar hızlı işlenebilirlik kaybederler (Felekoğlu, 2002).

VAK'lar ise genellikle taze betonun yerleştirme ve üretim safhalarında kalitedeki dalgalanmaları azaltmak, stabilite sağlamak amacı ile kullanılır (Rols vd., 1999 ; Sağlam, 2000 ; Berke vd., 2002). Terlemeyi önleyerek yapılacağı olan viskozite

arttırma işlemi, KYB için kritik önemdedir. Viskozite arttırıcılar bu aşamada kullanılan ürünlerdendir.

Selüloz ve doğal sakız türevleri uzun zincirleri ile su molekülleri emerek genişlerler ve suyun jelimsi kıvama gelmesini sağlayarak sakızlaşma eğilimi yaratırlar. Bu fiziksel etki dışında, akrilik tabanlı karışımlar kullanılırsa moleküller arasında elektriksel itki genişlemeye ve viskozite artışına sebep olur. Fakat betondaki tuz yoğunluklarının çeşitliliğinin bu etkiyi azalttığı kabul edilmektedir. Viskozite artışındaki asıl faktörün iyonik olmadığı, su absorbe ederek genişen polimerler olduğu kabul edilmektedir (Khayat, 1995-a). Selüloz tabanlı katkıları bir miktar karışım suyu emdiğinden dolayı KYB üretiminde akışkanlaştırıcı katkı ile kullanılması gerekebilmektedir. Ancak uyumsuzluğun olup olmadığı kontrol edilmelidir (Tablo 1.8).

Tablo 1.8 VAK ile uyumsuz olabilecek katkı tipleri (Felekoğlu, 2002)

<i>VAK tipi</i>	<i>Hava Sürükleyici&amp;Akışkanlaştırıcı</i>
Selüloz	Polikarboksilat veya melamin bazlı
Akrilik	Naftalin veya melamin bazlı
Glikol	Polikarboksilat veya melamin bazlı

Hava sürükleyici olarak sentetik deterjanlar, reçine tuzları, petrol asidi tuzları, protein içeren malzeme tuzları, organik hidrokarbon tuzları gibi kimyasallar kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları sentetik deterjanlar ve reçine tuzlarıdır. Hava sürüklenmiş beton uygulamasında ana amaç donma hasarının önlenmesi yahut azaltılmasıdır. Değişik tiplerdeki hava sürükleyici ajanlardan KYB için uygun olanının seçimi denemeler ve literatür ışığında yapılmalıdır.

Sürüklenen havanın mertebesi çevresel etki sınıflarına göre seçilmelidir. Sürüklenecek hava miktarı için gereken katkı dozajı denemeler ile belirlenmektedir (Tablo 1.9). Ayrıca kimi üreticiler tarafından KYB’de düşük dozajda hava sürükleyiciler, işlenebilirlik arttırıcı olarak kullanılabilir.

Tablo 1.9 TS EN 206-1 donma-çözülme etki sınıfları ve minimum koşullar

Çevresel etki sınıfı	XF1	XF2	XF3	XF4
Çevrenin tanımı	Buz çözücü madde içermeyen suyla orta derecede doymun	Buz çözücü madde içeren suyla orta derecede doymun	Buz çözücü madde içermeyen suyla yüksek derecede doymun	Buz çözücü madde içeren su veya deniz suyuyla yüksek derecede doymun
En büyük S/Ç oranı	0.55	0.55	0.50	0.45
En küçük dayanım sınıfı	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37
En az çimento (kg/m <sup>3</sup> )	300	300	320	340
En az hava içeriği (%)	-	4.0		

Beton içindeki tüm bileşenlerin özellikleri sürüklenen hava miktarını etkilemektedir. Sürüklenen havanın miktarı ve birbirleri arasındaki mesafe D-Ç direnci açısından en önemli faktördür. Bu karakteristikleri etkileyen faktörler Tablo 1.10'da verilmiştir.

Tablo 1.10 Sürüklenen hava miktarını etkileyen faktörler ve etkileri (Erdoğan, 1997)

Etkili Faktörler	Kısaca Etki
Çimento miktarı	Çimento miktarı arttıkça belirli bir hava yüzdesi için gereken katkı dozajı artar
Çimento kompozisyonu	Diğer faktörler sabitse genel olarak alkali içeriğindeki artış ile sabit bir katkı dozajında hava içeriği artar
Çimento inceliği	İncelik arttıkça hava sürüklemek güçleşir
Maksimum iri agrega çapı	Maksimum agrega çapı arttıkça harç hacmi düşmektedir. Düşük harç miktarında sürüklenen hava artar
İnce agrega miktarı ve gradasyonu	Sabit bir toplam agrega miktarı için ince agrega ve incelik arttıkça hava sürüklemek güçleşir
Mineral katkıların varlığı (puzolanlar)	Uçucu kül, cüruf, silika dumanı gibi puzolanlar hava miktarını düşürmektedir
S/Ç oranı	Oran arttıkça hava içeriği artmaktadır
Karışımın ilk kıvamı	Hava içeriğindeki artış ile çökme değerleri artmaktadır. 15-18 cm çökme değerinden sonra bir çok karışım havayı tutamayacak kadar akıcıdır.
Karıştırıcı türü	Karıştırıcı aşırı doldurulduysa betonun hava yüzdesi artmaktadır. Tersisi durum da söz konusudur.
Karıştırma süresi	İlk 2 dakika karıştırmaya kadar hava içeriği artmakdayken, transmikserlerde 15 dakika taşıma sonrasında bu değer sabitlenmektedir.
Kimyasal katkı kullanımı	Bir çok kimyasal katkı çok azdan belirgin miktarlara kadar hava içeriğini arttırmaktadır.
Beton sıcaklığı	Sıcaklıktaki belirgin artış, sürüklenen havayı yarı yarıyaya kadar azaltabilmektedir.
Vibrasyon	Aşırı vibrasyon ve pompalama sürüklenen havayı azaltmaktadır.

#### 1.4 KYB İçin Taze Hal Test Yöntemleri

Taze betonun reolojik özelliklerinin tanımlanmasında en önemli iki parametre eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitedir. Taze betonun harekete geçmesi için aşılması gereken gerilme olarak tanımlanabilen eşik kayma gerilmesi ile plastik viskozite geleneksel betonda Bingham davranışına uygunken, kendiliğinden yerleşen betonlarda daha bir Newtoniyen hal almaktadır. Eşik kayma gerilmesi betonun işlenebilirliği ile ilgili bir parametredir ve çökme deneyi ile ilişkilendirilmektedir. Plastik viskozite ise betonun akışa karşı içsel sürtünmelerinden kaynaklı gösterdiği dirençtir. Bu kavram ise betonun akış süresi ile ilişkilendirilebilmektedir. Bu kıyasal deney yöntemlerinin geliştirilme sebebi, ölçümü çok pahalı ve teknik aletler gerektiren parametreleri hızlı ve kolayca değerlendirebilmektir.

KYB, birçok yetiye sahip bir betondur. Bu yetilerin sınılanması geleneksel betona göre daha karmaşık irdemeler gerektirmektedir. Akıcılık, viskozite, doldurma kabiliyeti, dar alanlardan geçiş yeteneği gibi bir çok parametrenin tespitine yönelik ayrı ayrı deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin bir test metodu altında birleştirilememesi KYB'nin standartlaşamamasına sebep olmaktadır.

Genel olarak akıcılık, viskozite, geçiş yeteneği ve ayrışma direnci özellikleri KYB için sınılanan en önemli özelliklerdir. Geliştirilen test metotları bu özelliklerden birini yada birkaçını sınavabilmektedir. En yaygın test metodu olan çökmede yayılma deneyi tüm parametrelerin analizine yetecek bir metot değildir. Bu açıdan Tablo 1.11'de sık kullanılan deney yöntemleri ve sınıdığı kabiliyet özetlenmiştir.

Tablo 1.11 KYB özellikleri ve sınaama yöntemi (EFNARC, 2005)

Özellik	Test Metodu	Ölçülen Değer
<b>Akıcılık&amp;Doldurma Kabiliyeti</b>	Çökme – yayılma	Yayılma çapı
	Kajima kutusu	Görsel doldurma
<b>Viskozite&amp;Akıcılık</b>	T <sub>50</sub>	Akış süresi
	V-kutusu	
	O-kutusu	
	Orimet Deneyi	
<b>Geçiş Yeteneği</b>	J-halkası	Yükseklik farkı – çap
	L-kutusu	Geçiş oranı
	U-kutusu	Yükseklik farkı
	Kajima kutusu	Görsel geçiş yeteneği
<b>Ayrışma Direnci</b>	Elek ayrışması	Yüzde ayrışma (ağırlık)
	Oturma kolonu	Ayrışma oranı
	Penetrasyon	Derinlik

#### 1.4.1 Çökme – Yayılma , T<sub>50</sub> Süresinin Ölçümü ve J-Halkası Testi

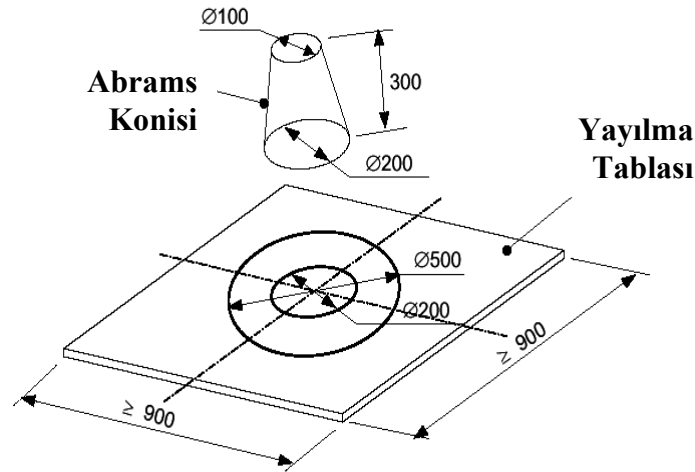
Bu deney çökme (ASTM C143-90a) deneyinin kendiliğinden yerleşebilirliği sınamak için modifiye edilmiş bir halidir. Çökme davranışının yerine yayılmış beton çapının irdelenmesi esasına dayanır. Deneyin yapılışı şöyle özetlenebilir: Kesik koni şeklindeki standart çökme hunisi yatay yüzeydeki yayılma tablasının merkezine yerleştirilir ve betonla doldurulur. KYB’de sıkıştırma enerjisine ihtiyaç olmadığı için, standart şişleme yapılmaz ve huni bir kap vasıtasıyla, beton serbest düşürülerek doldurulur. Huninin hidrostatik basınç etkisiyle yukarı kalkmasını ve betonun sızmasını engellemek için doldurma sırasında huniyi iyice bastırmak gerekir. Huni, doldurulduktan sonra yukarı kaldırılarak betonun yayılmasını tamamlaması beklenir. Viskozitesi yüksek karışımlarda yayılmanın tamamlanması için birkaç dakika beklemek gerekebilir (Khayat, 1995). Yayılma durunca birbirine dik iki çap ölçülerek deney tamamlanır. (Ferraris, 1999). Bu çaplar arasındaki fark 5 cm’den fazla ise deney tekrarlanmalıdır (Aggoun vd., 2002). Kendiliğinden yerleşen harçlar için mini aparatlar kullanılmaktadır.



$T_{50}$  süresinin ölçümü, betonun koniden tamamen ayrılıp yayılma tablası üzerindeki 50 cm çaplı halkaya kadar ulaşması için geçen süreyi belirleme esasına dayanır. Bu süre viskozite ve akıcılık için ölçüttür.

J-halkası testinde, koninin kaldırılmasından sonra KYB donatı yerini tutan parmaklıklı bir halkanın arasından geçer. Halkanın iç ve dış bölge arasındaki kot farkından betonun akış ve donatılar arasından geçiş kabiliyeti ortaya konmaktadır. Hamur hacminin artması, iri agrega miktarı ve çapının azalması ile bu farkın azalması beklenmektedir. Özkul ve Dogan (2006) yaptıkları bir deneysel çalışmada  $550 \text{ kg/m}^3$ 'lük toz madde içeren KYB'lerde halkalı ve halkasız yayılma deneylerinde elde edilen yayılma çaplarının birbirlerine yakın olduğunu göstermişlerdir (Yardımcı, 2008).

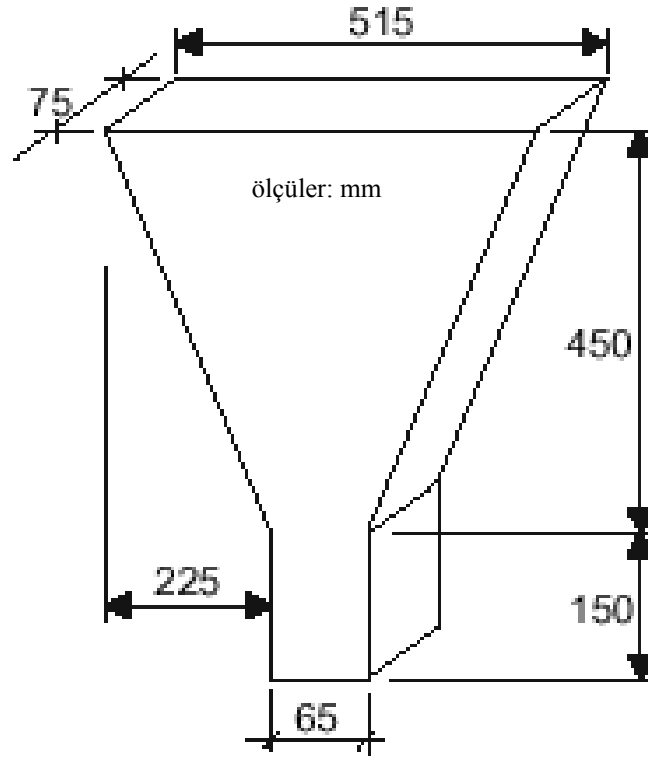
Çökme yayılma deneyinde sonucu etkileyebilecek değişkenlikler daha çok deneyi yapan kişinin kullandığı aparat ve yonteme (koniye çekme hızı ve doğrultusu, yayılma tablasının malzeme sürtünme katsayısı, huni ve tablanın yüzey nem durumu), karışım oranlarındaki elde olmayan değişkenliklere (stok sahasında agrega nem değişkenliği, agrega gradasyonundaki değişkenlikler) bağlıdır (Felekoğlu, 2003). Deney düzeneği Şekil 1.13'te gösterilmektedir.



Şekil 1.13 Yayılma tablası ve hunisi (EFNARC, 2005).

### 1.4.2 V-Kutusu Deneyi

“V” şeklinde köşeli bir paslanmaz çelik huniden betonun akış süresinin ölçümü esasına dayanan Japonyada geliştirilmiş bir deneydir (Şekil x.x.). Akıcılık ve viskozite hakkında fikir veren bir deneydir. En büyük agrega çapı ve miktarı, plastik viskozite, hamur hacmi, lif miktarı ve narinliği bu deney sonucunu etkileyen parametrelerden bazılarıdır. En büyük agrega çapı 20 mm’den büyük betonlar için uygun değildir.



Şekil 1.14 V-Kutusu deney aparatı (EFNARC, 2005).

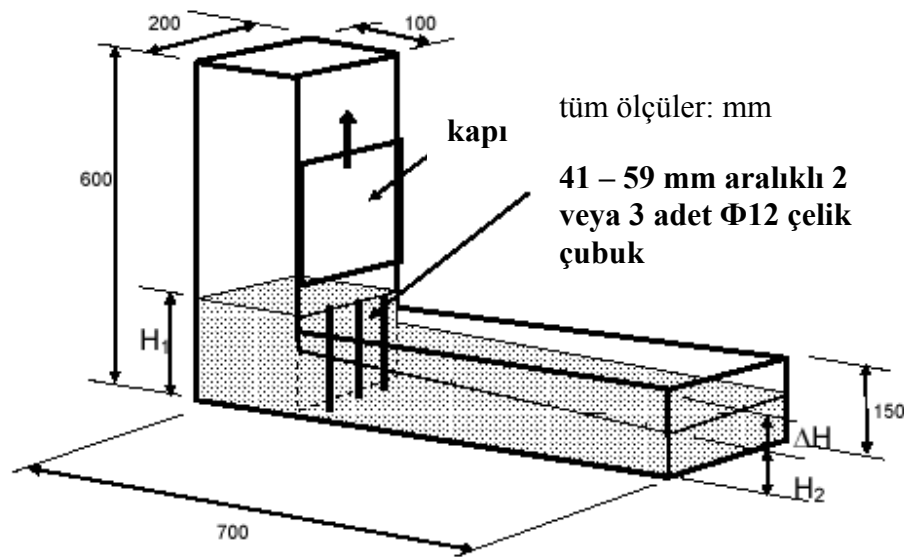
Yaklaşık 12 litre KYB, hiçbir sıkıştırma ve şişleme işlemi uygulanmaksızın tek seferde kutuya doldurulur. Çok beklemeden alt ağızdaki mafsallı kapak açılır. Açılma anından, üst kısımdan ışık gözlenene kadar geçen süre V-kutusu akış süresi ( $V_t$ ) olarak kaydedilir.

Deneyin yapılışı sırasında beton akıyorsa yani tıkanma varsa, bunun iki nedeni olabilir; eşik kayma gerilmesi betonun ağırlığının yarattığı gerilmeden büyüktür. Bir

başka tıkanma sebebi de betonun yeterli stabiliteye sahip olmaması durumunda ortaya çıkan ayrışma ile agrega tanelerinin çıkış ağzında birikerek kenetlenme yarattığı tıkanmadır. Bu yüzden V kutusu deneyi ayrışma ile ilgili gözlemsel sonuçlar elde edilebilecek bir deneydir (Su vd., 2001).

### 1.4.3 L-Kutusu Deneyi

Geçiş yeteneğinin ve doldurma kabiliyetinin ölçülmesine yönelik bir deneydir. “L” şeklinde bir kutuda dikey haznedeki betonun yatay hazneye ağırlığı altındaki akışı ile gerçekleşir. Dikey bölmeye vibrasyonsuz ve şişmesiz biçimde KYB doldurulur. Ardından ara bölgedeki kapı açılarak betonun engeller arasından geçerek seviyelenmesi beklenir. Ancak tam seviyelenme her zaman mümkün değildir. Dikey bölmede ve yatay bölmenin en ucunda oluşan malzeme yükseklikleri değerlendirilerek donatıların geçişini sınırladığı beton miktarı hakkında fikir edinilmiş olur. Bu yükseklikler arası oran ( $H_2/H_1$ ) hesaplanır. Bu değer L-kutusu oranı (bloklanma oranı) olarak adlandırılır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15 L-Kutusu aparatı (EFNARC, 2005).

Bloklanma oranı su gibi bir akışkan için 1 olacaktır. Ancak içsel sürtünmesi ve plastik viskozitesi olan beton için bu değer minimum kabul edilebilir değeri 0,80'dir. Ancak bu değer 0,60 olduğu halde bile bloklanma yaratmayabileceği rapor

edilmiştir (Tviksta, 2000). 20 ve 40 cm (kapıdan itibaren) uzaklıklarına erişme süreleri de kaydedilir ve değerlendirilir. Bu değer akıcılıkla ilgilidir. Ancak optimize edilmiş kesin değer aralıklarına sahip olmayan bir veridir. Bunun yanında alış sonrası L-kutusu içinde betonun sertleşmesine izin verilirse kalıp alındığında görülecek yüzey kalitesi de doldurma kabiliyeti olarak düşünülebilir.

Çelik liflerin narinliğine ve miktarına bağlı olarak KYÇLB karışımlarının testinde bu deney sorun yaratabilmektedir. Tıkanmalar kaçınılmaz olabilmektedir. Bu açıdan tek donatılı modifiye bir deney bu tür betonlar için daha sağlıklı olacaktır (Yardımcı, 2008).

#### ***1.4.4 Elek Ayrıştırma Testi***

KYB'nin ayrıştırma direncinin belirlendiği bir deneydir. Agregaların, bağlayıcı matristen ayrılması bir elek vasıtasıyla sınıranır. 30 cm çaplı ve 5 mm kare delikli bir elek 10-12 litrelik aynı çaplı bir kovanın üzerine yerleştirilir. Kovanın altında hassas bir terazi bulunmaktadır. Kova ve elek daraları alınır. Ardından yaklaşık 15 dakika kapalı bir kaptaki betonun yüzeye doğru olan su ve hamur hareketi gözlenir. Gerekli ön yorumlar yapılır. Bu üst kısımdan 5 kg ağırlığında beton alınır. Eleğe 50 cm yükseklikten düşürülür. Tüm ağırlık alttaki tartıdan okunur. 2 dakika kadar sonra elek kaldırılır, tartılır ve elek altı beton değeri tekrar okunur. Elek altında kalan betonun, elek üstündeki beton miktarına bölünmesiyle yüzde olarak ayrıştırma elde edilir (Şekil 1.16).



Şekil 1.16 Elek ayrıştırma testinin uygulanması (EFNARC, 2005).

Bu deneyler göz önüne alınarak çeşitli KYB sınıflandırmaları yapılabilir. EFNARC (2002)'de daha katı sınırlandırmalar varken, EFNARC (2005)'te KYB daha geniş yelpazede değerlendirilmiştir ve özellikleri daha net biçimde işlenmiştir (Tablo 1.12).

Tablo 1.12 KYB deneylerine göre taze hal sınıfları (EFNARC, 2005)

<b>Yayılma Sınıfı</b>	<b>Yayılma Çapı (mm)</b>	
SF1	550 – 650	
SF2	660 – 750	
SF3	760 – 850	
<b>Viskozite Sınıfı</b>	<b>T<sub>50</sub> (s)</b>	<b>V<sub>t</sub> (s)</b>
VS1/VF1	≤2	≤8
VS2/VF2	>2	9 – 2,5
<b>Geçiş Yeteneği Sınıfı</b>	<b>Bloklanma Oranı (H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub>)</b>	
PA1	≥0,80 (2 donatılı engelde)	
PA2	≥0,80 (3 donatılı engelde)	
<b>Ayrışma Direnci Sınıfı</b>	<b>Ayrışma Direnci (%)</b>	
SR1	≤20	
SR2	≤15	

Görüleceği üzere birçok türde KYB üretilebilmektedir. İhtiyaca yönelik KYB üretmek daha akılcı bir çözüm olacaktır. Örneğin yoğun donatılı bir alanda PA2 sınıfı KYB gerekmektedir. Ekonomiklik açısından inşaat karakterine uygun en az maliyetli KYB sınıfını seçmek gerekmektedir. Örneğin aşırı yayılmanın gerekmediği yüzeysel beton dökümleri için az hamur içeren, dolayısıyla az akışkanlaştırıcı ihtiyacı olan sınıfları seçmek uygun olacaktır.

EFNARC (2005)'de değişik yapı türlerinde kullanılacak KYB'lerde dikkate alınması gereken reolojik gruplandırmalar Tablo 1.13'te gösterilmiştir. Bu sınıflama Walraven (2003)'in çalışmaları doğrultusunda hazırlanmıştır.

Tablo 1.13 Değişik türde uygulamalar için reolojik gruplandırma (EFNARC,2005)

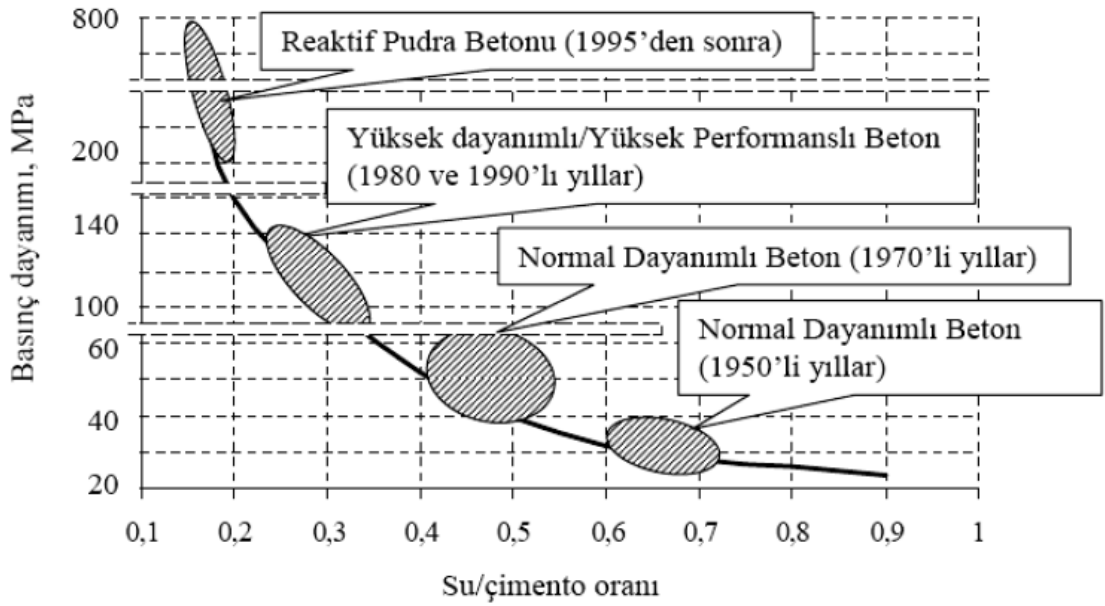
Viskozite				Ayrışmaya karşı direnç / Geçiş yeteneği
VS2 VF2	Rampalar			SF1 ve 2 için geçiş yeteneği tanımlanmalı
VS1 veya 2 VF1 veya 2 Yada hedef değer		Duvarlar ve kazıklar	Uzun ve narin elemanlar	SF3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
VS1 VF1	Yer betonları ve döşemeler			SF2 ve 3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
	SF1	SF2	SF3	
	Çökme - yayılma			

## BÖLÜM İKİ

### ÇELİK LİFLİ BETONLAR VE KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN ÇELİK LİFLİ BETON

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.

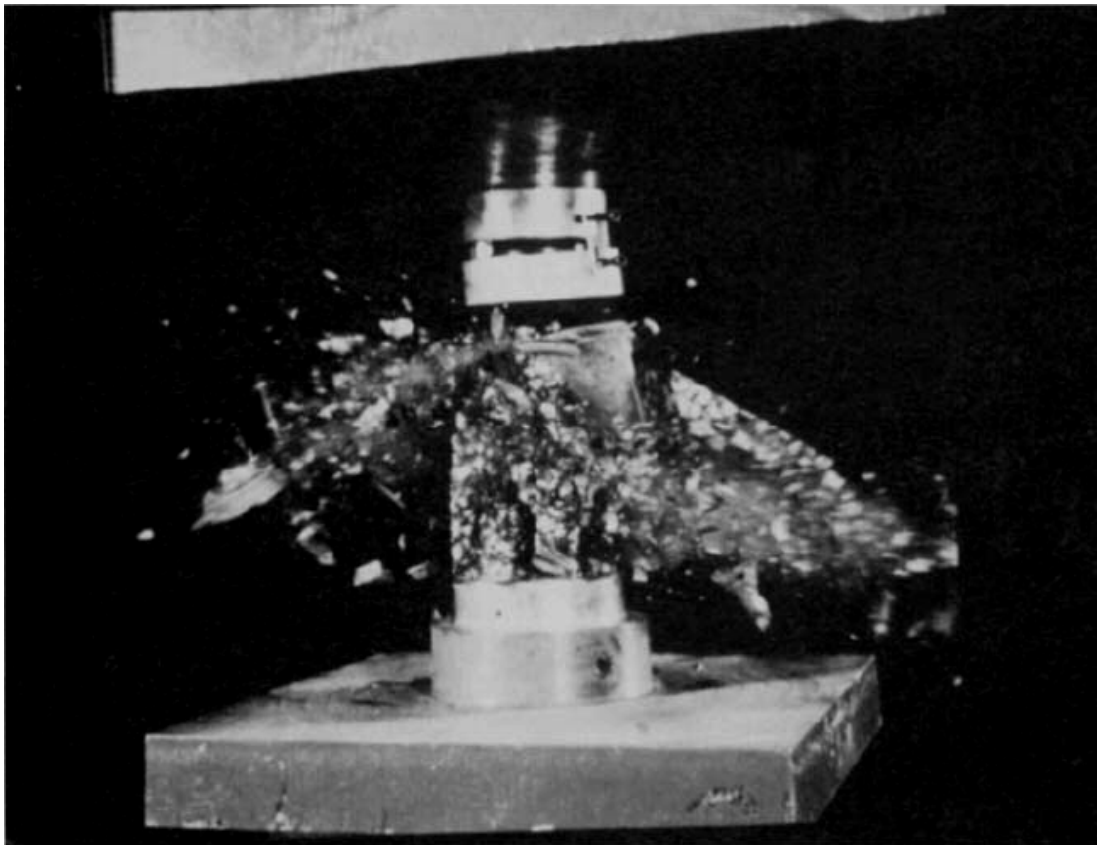
Kimyasal katkıları ile yüksek akıcılıkta betonların su kullanılmadan yapılabilir olması beton dayanım sınıflarını da önemli derecede arttırmıştır. Giderek gelişen akışkanlaştırıcı teknolojisiyle su/çimento oranı 0,7'lerden günümüzde 0,15'lere kadar indirilmiştir. Dolayısıyla çok yüksek dayanımlı ve performanslı beton ürünleri üretilmektedir. Bu teknolojik gelişim Şekil 2.1'de açık biçimde gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Beton teknolojisine paralel ulaşılan dayanımların mertebesi (Taşdemir ve Bayramov,2002).

Artan su kesme oranlarında beton basın 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 vd. , 1995). Taşdemir ve ark. (1998) de benzer biçimde dayanım sınıflarının çok üst düzelerle 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 2.2).

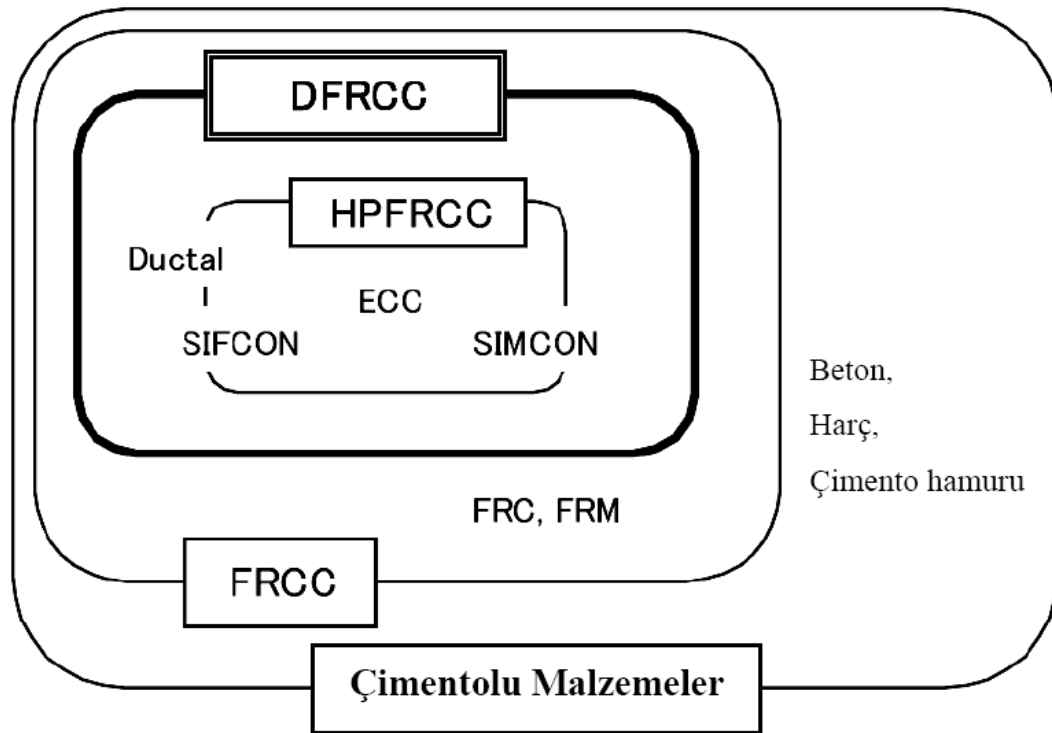


Şekil 2.2 Yüksek dayanımlı bir silindirin basınç deneyi esnasında gevrek kırılması.

Japon Beton Enstitüsü (JCI) çimentolu malzemeleri Şekil 2.3'teki 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 2.3 Japon Beton Enstitüsüne göre çimentolu kompozitlerin sınıflandırılması (JCI, DFRCC Committee, 2003).

## 2.1 Betonda Lif Kullanımının Tarihçesi

İlk insanların saman çöpü, keçi kılı ve insan saçını kullanarak tuğla ve harcı kuvvetlendirme çabaları, yapı malzemelerinin doğasını geliştirmeye yönelik girişimlerin oldukça eskilere gittiğini göstermektedir. Gerçekte, lifli betonlara esin

kaynağı olan saman takviyeli kıl harcı (kerpiç) 4500 yıl öncesinden beri yapı malzemesi olarak kullanılmaktaydı. Yapı malzemelerinin sürekli donatılarla kullanılması, ancak betonarme betonu kadar eskidir (Arslan, 1993).

Roma Collosium inşaatı sırasında o devrin sıvası olarak adlandırabileceğimiz balçık karışımlarına çeşitli hayvanlara ait kuyruk ve yele kıllarının ilave edildiğini biliyoruz. Türk Mimarisinde Mimar Sinan Usta'nın yapılarında kullandığı Horasan Harcı da içerisinde saman gibi doğal lifler içermekteydi.

Basit bir çimento, agrega ve su karışımı olan beton, İkinci Dünya Savaşı yıllarına kadar büyük bir değişim göstermemiştir. Uzun yıllar boyunca da betonda görülen çatlaklar ürünün doğasından kaynaklandığı düşünülerek dikkate alınmadı. Ancak bu çatlakların dayandığı tek neden, çok özel bir dönemde betonun, iç bünyesinde oluşan gerilmeleri taşıyacak dayanımının yeterli olmaması idi (Erbaş, 1999; Yiğiter, 2002).

1960'lı yılların başında Amerikan Silahlı Kuvvetleri Mühendisleri Birliği, betonda oluşan çökme ve büzülme çatlaklarına yönelik bir araştırma programı başlatmıştır. Betonda yapısal olmayan çökme ve büzülme çatlaklarının azaltılması için kullanılan geleneksel yöntemler, yüzeyin bir sıvı kür malzemesi ya da bir örtü kullanılarak kapatılmasını kapsamaktadır, ancak bu önlemler çatlakların kılcal olmasını sağlıyor, yine de betona yük bindiğinde çatlakların genişlemesini önlemiyordu. Araştırma programının sonunda "plastik büzülme çatlaklarının, betonun tasarlandığı mukavemet değerine ulaşmaya kadar maruz kaldığı dinamik iç gerilmelerden kaynaklandığı" sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen bir diğer sonuç "beton içerisine konulacak liflerin betonun balistik, enerji sönmeme ve darbe dayanımını arttırdığı" şeklinde olmuştur (Erbaş, 1999).

Lifli betonlar üzerindeki çalışmalar, 1963'lü yıllarda beton içerisine cam liflerin katılmasıyla devam etmiştir. Daha sonraları farklı lif tipleri kullanılarak beton mukavemeti üzerine liflerin etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda; beton içerisinde süresiz dağılı bulunan liflerin genellikle betonda oluşan çatlakları

en aza indirerek lifli betonun sekil değiştirme özelliğini arttırmakta olduğu görölmüştür (Ünal, 1994).

Günümüzdeki bilinen şekle sahip lif patentleri 1927’de ABD’de G. Martin tarafından, 1939’da İngiltere’de Zitkeviç ve yine İngiltere’de 1943’de G. Constantinesco tarafından alınmıştır (Naaman, 1985; Beddar, 2004). 1960’ların başlarında günümüzde bilinen anlamıyla çelik liflerin betonda kullanımına yönelik çalışmalar başlamıştır (ACI 544, 1997; Romualdi ve Baston 1963). Günümüzde geleneksel çelik teller endüstriyel zemin betonları ve tünel uygulamalarında kullanıldığı gibi yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel segmanları gibi prefabrike elemanların üretiminde de kullanılmaktadır (Taşdemir ve ark., 2002; Yardımcı, 2008).

## **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.

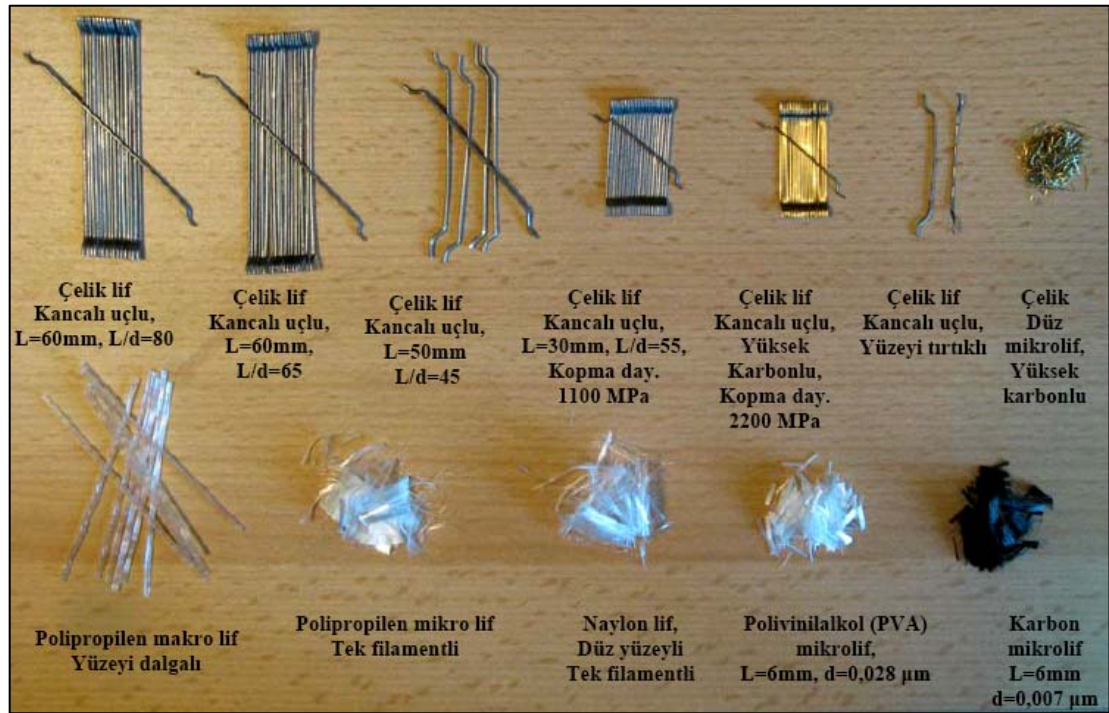
Çelik lifler değişik narinlik, geometrik şekil ve uç tasarımlarında üretilebilmektedir. Karbon içeriğine bağlı olarak 1100 MPa (düşük karbonlu) veya 2200 MPa (yüksek karbonlu) olarak farklı dayanımlarda üretilebilmektedirler.

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 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.

Sık kullanılan liflerin sıralı halde fotoğrafı Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Buradan da görülebileceği gibi birçok geometrik yapı, dayanım, hammadde ve narinliğe göre sayısız lif türleri üretebilmek mümkündür. Bu lifler genellikle suda eriyen yapıştırıcılarla tutturulmuş demetler halinde satılmaktadır.



Şekil 2.4 Çeşitli boyutlarda çelik ve sentetik lif türleri (Yardımcı, 2008).

Çimentolu matrislerde kullanılan liflerin bazıları çatlak genişliğinin sınırlandırılması ve tokluk arttırmak içinken (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 Lifli Betondaki İyileşmeler

Karışım oranları, çimento türü, puzolanların varlığı, kür cinsi, kimyasalların varlığı, agrega türü ve miktarı gibi birçok parametrenin ayrıntılı etkisi göz önünde bulundurulmadan yapılan çalışmalar irdelenerek liflerin betona kattığı iyileşmeler Tablo 2.1'deki gibi özetlenebilir.

Tablo 2.1 Lifli betondaki iyileşmelerin kaba oranları (DSİ, 1994)

<b>Mekanik Özellik</b>	<b>Artış (%)</b>
Basınç Dayanımı	±25
Eğilme Dayanımı	50 – 100
Elastisite Modülü	±25
Tokluk	100 – 1200
Çekme Dayanımı	25 – 100
Deformasyon Kapasitesi	50 – 100
Kavitasyon Dayanımı	300
Yorulma Dayanımı	50 – 100
Darbe Dayanımı	100 – 1200
İlk Çatlak Dayanımı	25 – 100

Bu değerlerin deney metodundan ve betonun karışım özelliklerinden tamamen bağımsız çok kaba bir yaklaşımla verildiğini vurgulamak gerekmektedir. Görüldüğü üzere lifler betonun basınç özellikleri üzerinde olumsuz etki yapabilmektedirler. Bunun yanında eğilme – çekme performansına katkıları önemli mertebelere sahiptir. Ayrıca darbe dayanımı, kavitasyon ve yorulma dayanımı gibi uzun dönem sürekli etkilerine karşı lifler çok büyük avantajlar sağlamaktadırlar.

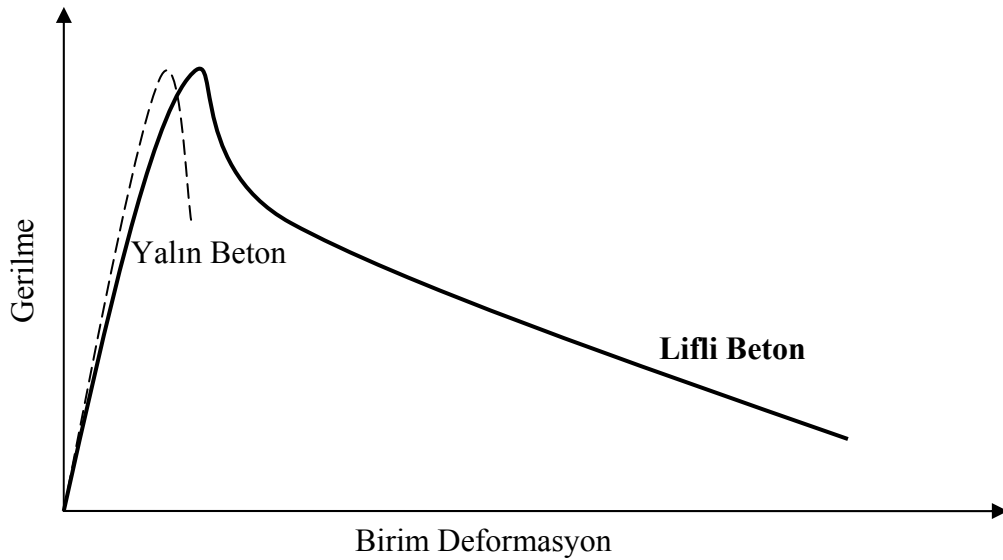
## 2.4 Çelik Lifli Betonlar

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 agregaya barındırmasıdır.

### 2.4.1 Çelik Lifli Betonların Mekanik Davranışı

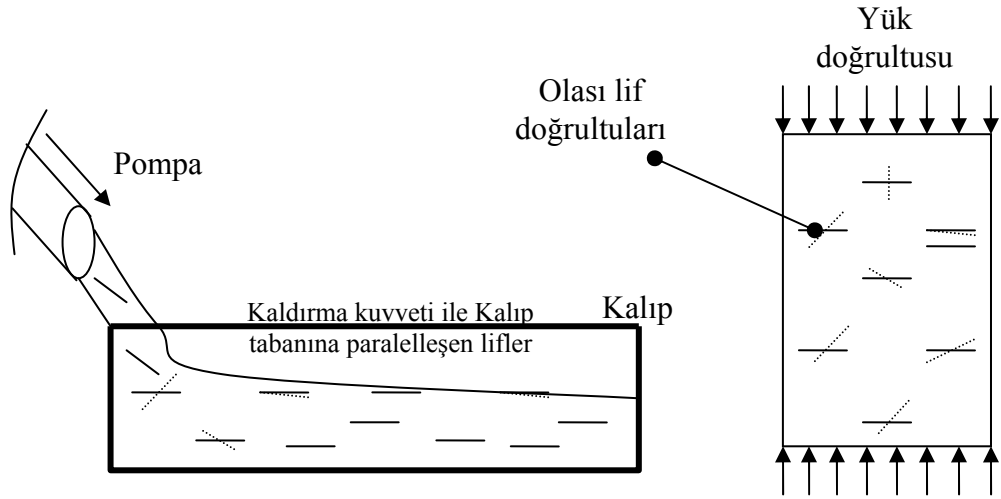
#### 2.4.1.1 Basınç Etkisindeki Davranış

Betona eklenen çelik lifler basınç dayanımının artışından ziyade çökme mekanizmasındaki sünekliği arttırmaktadırlar. Bu şekilde, dayanım yükü aşılardan beton işaret vererek, yüksek oranda deformasyon yaparak dağılmaktadır. Bu da yapıların göçme anında enerji sönmülmesi 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 (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Maksimum basınç yükü aşıldıktan sonra lifli betonun uzayan kuyruk bölgesi.

Liflerin yük doğrultusuna göre konumu da çok önemli bir değişkendir. Yük doğrultusu boyunca konuşlanmış liflerin beton basınç dayanımına etkileri fazla olmamaktadır. Ancak uçları çengelli veya çıkıntılı liflerin yük doğrultusunda olsa dahi bir miktar kenetleyici etki yaratması beklenebilir. Yükleme doğrultusuna dik lifler ise gerilme aktarılmasına önemli oranda yardımcı olmaktadır. Lifler, taze beton içinde genellikle kalıp tabanına paralel şekilde asılı kalma eğilimindedirler. Tüm lifler incelendiğinde liflerin taban düzlemiyle çeşitli açılar yaparak asılı kaldığı söylenebilir. Agreganın çapı ve miktarına göre liflerde yataydan sapmalar oluşmaktadır. Bu durum elle dizilmiş lifler için değil, beton içerisinde rastgele agregaya gibi karıştırılan lifler için geçerlidir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Döküm sonrasında liflerin tabana paralel doğrultuda yönelme eğilimi (sol) ve yüklemeye göre alabilecekleri doğrultular (sağ).

Çelik liflerin karışımlara  $30 - 120 \text{ kg/m}^3$  miktarında ilave edilmesi, beton ve diğer harçların mühendislik özelliklerinin birçoğunda önemli düzelmeler sağlamaktadır. Betonun çarpma, eğilme, yorulma, parçalanma ve kırılma dayanımlarını arttırmaktadır. Çelik liflerin beton içerisine katılma oranı hacimsel olarak %0,5 - %2,5 arasında olabilmektedir. Ancak yapılan araştırmalar göstermiştir ki optimum fayda, hacimsel oranın %1-2 olması halinde sağlanmaktadır. Bu değerden daha az katılması halinde normal beton özelliği üzerine çok büyük bir olumlu gelişme sağlanamamaktadır. Daha yüksek oranda katılma durumunda ise, normal betonun basınç dayanımından daha düşük bir değer elde edilmektedir. Buna en büyük etken

de yüksek oranda katılmış liflerin karışımı sırasında daha çok topaklaşmasıdır. Buna paralel olarak da yer yer beton içerisinde zayıf bölgeler ve hava boşlukları oluşmaktadır (Arslan, 1993).

Normal dayanımlı betona çelik lif ilave edilerek yapılan basınç testlerinde, şahit numuneler ile çelik lif katkılı beton ile üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük dayanımları arasında çok fazla farklılık tespit edilememiştir. 90 günlük basınç dayanımı testleri çok az da olsa basınç dayanımı artışı olduğunu göstermiştir. Ancak çelik lif oranı hacmen %1'in altında iken 90 günlük basınç dayanımlarında düşüşler dahi gözlemlenmiştir. Normal dayanımlı betona ilave edilen çelik liflerin eğilme dayanımını önemli oranda arttırdığı saptanmıştır (Yıldırım, 2002).

El-Nieama, normal dayanımlı lifli betonlar ile yaptığı basınç deneylerinde genel olarak lif takviyesinin % 3 – 10 arasında basınç dayanımı kaybına sebep olduğunu saptamıştır. Sınırlı sayıda numunede de basınç dayanımında artışlar gözlemlenmiştir. Silindir yarma deneylerinde çelik lif takviyesinin yarma dayanımını %35'e varan değerlerde arttırdığı görülmüştür (El-Nieama, 1993).

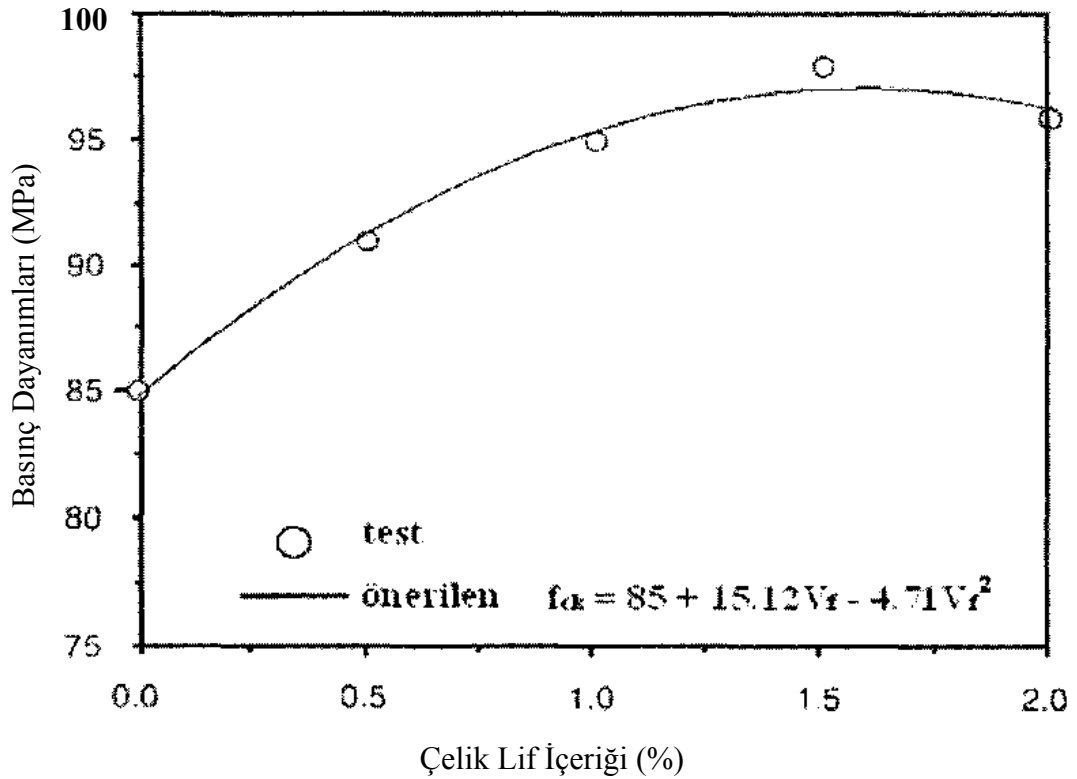
Betona farklı ebatlarda ve farklı oranlarda çelik lif ilave edilerek üretilen numunelerin testi sonucunda 0,5 mm çapında ve 30 mm uzunluğundaki çelik liflerin kullanım dozajı arttırıldıkça basınç dayanımı 40'dan 30 MPa'ya kadar düşmüştür. Aynı çaplı fakat 50 mm uzunluğundaki çelik lif kullanımı ise basınç dayanımını 50MPa mertebelerine çıkarmıştır. Deney numunelerine ait gerilme – birim deformasyon eğrileri incelendiğinde, lif içeriğinin artmasıyla eğri yataya daha da yaklaşmıştır. Yani kırılma anına kadar yaptığı birim deformasyonun artışı lif içeriği ile doğru orantılı olarak artmıştır. Bu olay çelik liflerin yarattığı sünek davranışla ilgili temel bir göstergedir (Craig vd., 1986).

Bayramov (2004), narinliği 65 olan çelik liflerle donatlandırılmış çelik lifli betonda lif miktarının 20 kg/m<sup>3</sup>'den 60 kg/m<sup>3</sup>'e çıkarılması ile basınç dayanımının % 30 arttığını saptamıştır. Ancak narinliği 55 ve 80 olan lifler kullanılması durumunda lif miktarındaki artma ile basınç dayanımının az değiştiğini, böylece çelik lif



miktarının basınç dayanımına etkisinin net bir etkiye sahip olmadığını vurgulamışlardır.

Çelik liflerin her zaman kararlı biçimde dayanım artırıcı özellikte olduğu ya da basınç dayanımını azaltıcı etkiye sahip olduğu kesin bir cümleyle söylenebilecek kadar net değildir. Song ve Hwank (2004) yaptıkları çalışmalarda 85 MPa basınç dayanımı mertebelerindeki betonlarda lif içeriğinin artmasıyla dayanımın da arttığını görmüşlerdir. Ancak hacmen %2 lif içeriğine çıkıldığında basınç dayanımındaki artış, azalma eğilimine geçmektedir (Şekil 2.7).

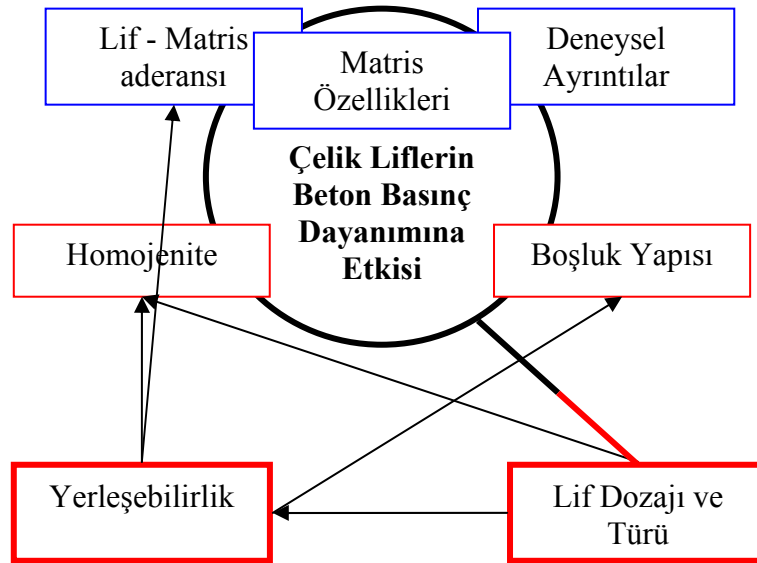


Şekil 2.7 Yüksek dayanımlı betonlarda çelik lif içeriği – basınç dayanımı ilişkisi (Song ve Hwank, 2004).

Eren ve Çelik (1997), % 10 silika dumanı içeren yüksek dayanımlı betonlarda hacimce % 1 oranında narinliği 60 olan uçları kancalı çelik lif kullanımı ile basınç dayanımının yalın betona göre yaklaşık % 28 arttığını görmüşlerdir. Ancak aynı araştırmacılar narinliği 75 olan çelik liflerin hacimce % 2 oranında kullanımı ile basınç dayanımında % 40'a varan düşüşler olduğunu da rapor etmişlerdir.

Betona eklenen çelik lifler, işlenebilirliği etkileme düzeylerine, karşım özelliklerine, kullanılan lif tipi, narinliği ve miktarına bağılı olarak basınç dayanımını arttırıp azaltabilmektedir. Ancak, önemli olan nokta basınç dayanımından çok, göçme birim deformasyonununun lif miktarındaki ve lif narinliğindeki artış ile belirgin bir şekilde artmasıdır. Basınç yüklemeleri altında kompozitin enerji yutma kapasitesindeki artış, lifli yapı elemanlarında statik yüklemeler altında ani ve patlama şeklindeki göçmenin önlenmesi ve dinamik yüklemeler altında ise enerjinin sönümlenmesi açısından önemlidir (Yardımcı, 2008).

ÇLB karışımlarında liflerin basınç dayanımlarında yarattığı tutarsız gibi görünen etki aslında sadece matris özelliklerinden değil; büyük oranda işlenebilirlik, homojenlik, sıkışık hava içeriği gibi taze hal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 2.8’de şematize edilmiştir.



Şekil 2.8 Liflerin basınç dayanımına etkisinin karmaşık mekanizması.

#### 2.4.1.2 Çekme Gerilmeleri Etkisindeki Davranış

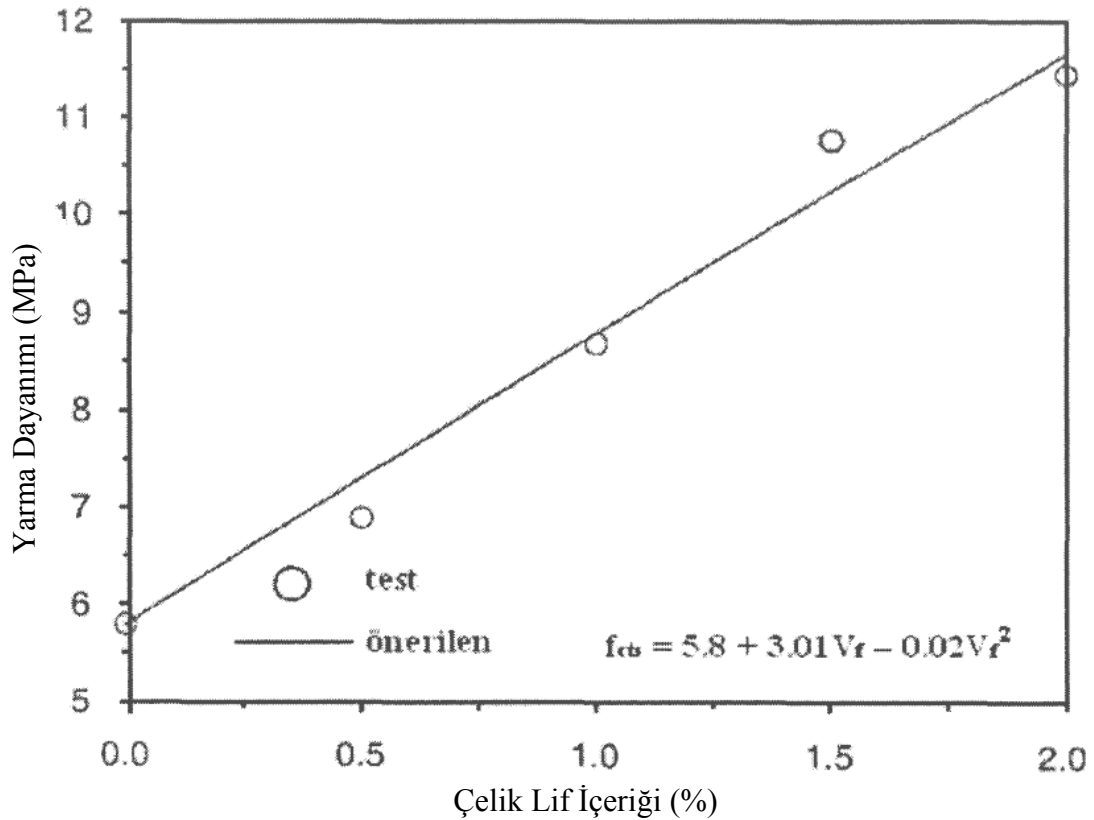
Çelik lifler betona katılırkenki ana hedef gevrek bir malzeme olan betonun çekme altındaki zayıf davranışını geliştirmektir. Yüksek çekme dayanımına sahip çelik lifler

gibi malzemeler beton içerisinde kullanılarak çekme – eğilme dayanımında artış sağlanabilmektedir. Ancak daha da önemlisi dayanımdaki artış değil, kırılma esnasında artan muazzam enerji yutma kapasitesidir. İlk çekme çatlağında taşıma gücünün %100'e yakını kaybeden beton, içerisinde lifler barındırdığında gerilme köprülenmesi sayesinde gerek lif gövdesinin taşıdığı gerekse betonun sağlam bölgelerine lifler tarafından aktarılan gerilmelerin sayesinde yüksek çekme performansı sergileyebilmektedir.

Ağır taşıt yüklerine maruz endüstriyel zeminlerde çelik lifli betonla, hası donatıya alternatif oluşturabilmektedirler. Beton matrisi içerisinde çatlak azaltıcı ve ilerlemesini önleyici etkisi olan lifler, ağır taşıt yükleri ve darbe tesirleri altında betona süneklik katarak servis ömürlerini arttırabilmektedirler.

Yazıcı ve ark. (2007), uçları kancalı tipte çelik liflerin miktarı ve görünüm oranının basınç, yarma ve eğilme dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çelik lifli betonun yarma dayanımının lifsiz betona göre % 11 ile % 54 arasında, eğilme dayanımının ise % 3 ile % 81 arasında daha yüksek olduğunu ve lif miktarı ile lif narinliğindeki artış ile özellikle eğilme dayanımındaki artış oranının arttığını göstermişlerdir.

ÇLB'lerin yarmada çekme dayanımı üzerinde lif miktarı ve narinliğinin belirgin bir etkisi mevcuttur. Lif miktarı arttıkça yarmada çekme dayanımının artmaktadır (Song ve Hwang, 2004). Ancak, lif narinliği arttıkça yarmada çekme dayanımının her zaman artmayabileceği belirtilmektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Lif içeriğinin artmasıyla artan yarma dayanımı (Song ve Hwang, 2004).

Bayramov (2004), lif narinliğinin 55'den 65'e çıkması ile yarmada çekme dayanımının arttığını ancak narinliğin 80 olması ile yarmada çekme dayanımında azalma olduğunu belirlemiştir. Buna benzer sonuçlar Eren ve Çelik (1997) tarafından yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir. Hacimce %0,5 çelik lif içeriğinde, lif narinliğinin 60'dan 75'e çıkarıldığında yarmada çekme dayanımının artış gösterdiği, narinliğin 75'den 80'e çıkarılması ile de azaldığı gözlenmiştir. Eren ve Çelik'in çalışmalarında benzer sonuçlar %5 silika dumanı içeren ve lif dozajının hacimce %1 olduğu karışımlarda da gözlenmektedir. Çelik lif narinliğindeki artış ile öncelikle yarmada çekme dayanımının artıp daha sonra azalma göstermesinin lif – matris arasındaki mekanik uyumsuzluktan kaynaklandığı belirtilmektedir (Bayramov, 2004). Lif narinliğindeki artışın lifin çapının azalması ile oluştuğu durumda, başka bir ifade ile aynı boyda ancak daha küçük çapta lif kullanılması ile özellikle yüksek dayanımlı matriste lifler kopabilmektedir. Böylece narinlik arttıkça yarmada çekme dayanımı azalabilmektedir. Literatürde yüksek dayanımlı betonlarda normal

dayanımlı (1000 MPa civarı) çelik lifler yerine yüksek dayanımlı liflerin (2000 MPa) kullanılması önerilmektedir (Grünwald ve Walraven, 2002c; Bayramov, 2004).

ÇLB'lerde lif miktarı ve narinliğinin betonun eğilme tokluğu, kompozitin kırılma enerjisi ve karakteristik boyu üzerinde büyük etkisi vardır (Grünwald ve Walraven 2002; Bayramov, 2004; Bayramov ve ark. 2004; Song ve Hwang 2004; Yardımcı, 2008).

Bayramov (2004), üç farklı narinlikteki (55, 65 ve 80) olan kancalı uçlu tipte çelik liflerin 20, 35 ve 50 kg/m<sup>3</sup> dozajda kullanılmasının, geleneksel vibrasyon görmüş betonun kırılma enerjisi ve karakteristik boyu üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bayramov (2004)'un deneysel programında, çelik lifli beton kirişlerin kırılma enerjileri çentikli örnekler üzerinde RILEM 50- FMC (1985)'e göre üç noktalı eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Araştırmacının çalışmasının sonuçlarına göre çelik lif miktarı ve narinliğinin artışı ile kırılma enerjisi de belirgin bir şekilde artmaktadır. Aynı çalışmada fiktif çatlak modelindeki biçimde kırılma enerjisi, elastisite modülü ve çekme dayanımı kullanılarak karakteristik boylar bulunmuştur. Lif miktarı ile karakteristik boy önemli derecede artmaktadır. Ayrıca bu artışın lif narinliğinin artışına paralel daha da hız kazandığı görülmüştür.

Literatür çalışmaları araştırıldığında çelik liflerin betonların eğilme davranışını büyük ölçüde geliştirdiğini, lif miktarı ve narinliğindeki artışla özellikle eğilme dayanımı, tokluk, kırılma enerjisi ve karakteristik boyun belirgin bir şekilde arttığını; lifsiz betonun yarı-gevrek yapısının sünek bir kompozite doğru geliştiğini göstermektedir. Ancak, çelik lifli betonların eğilme davranışını yükleme doğrultusunun kuvvetli bir şekilde etkilediği de belirtilmektedir (Yardımcı, 2008).

Aynı basınç dayanımında olduğu gibi, eğilme performansında yükleme doğrultusu önemli olmaktadır. Yapılan araştırmalar liflerin eğilme yükü doğrultusunda olmaları durumunda kırılma parametrelerinde kötüleştirmelerin dahi gözlemlendiğini göstermişlerdir.

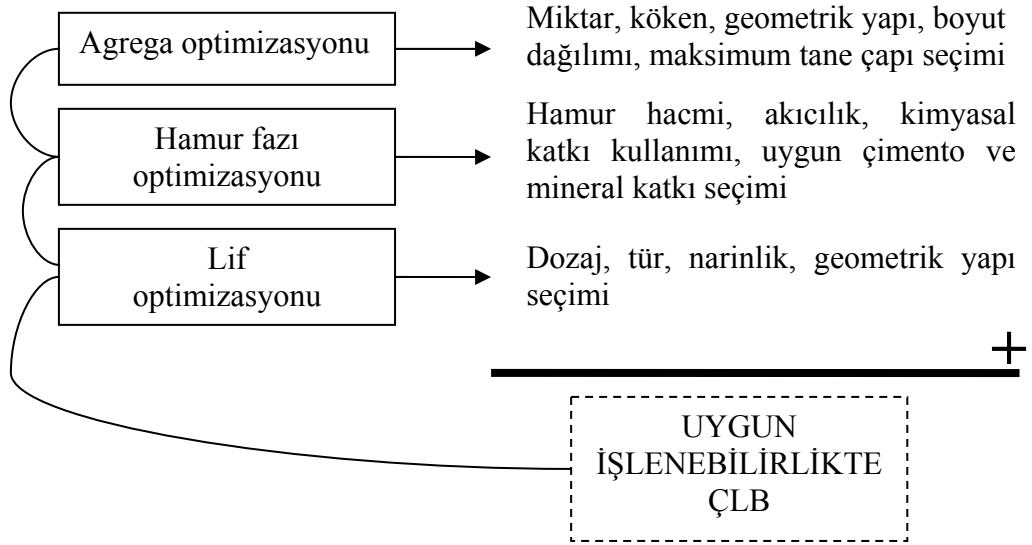
Toutanji ve Bayasi (1998) çelik lifli betonların üretim tekniğinin eğilme davranışı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Eğilme testinde yükleme doğrultusunun örneğin döküm doğrultusuna dik olması halinde eğilme dayanımı ve toklukta, yükleme doğrultusunun döküm doğrultusuna paralel olması durumuna kıyasla azalmalar olabileceğini belirtmişlerdir.

İşlenebilirlik ÇLB'nin lif dağılımını önemli derecede etkilemektedir. Aşırı yüksek işlenebilirlik değerlerinde çelik liflerin matrise tutunamayarak kalıp dibine doğru çöktüğü bilinmektedir. Bu çökme numunelerin eğilme performansını ve kırılma parametrelerini değiştirmektedir. Aynı zamanda yükleme doğrultusuna göre eğilmeye çalışan kesite giren lif sayısında önemli farklılıklar olduğundan literatürde bu sorun çok sayıda çalışma ile vurgulanmıştır.

#### ***2.4.2 Çelik Lifli Betonların Taze Hal Davranışı***

Çelik lifler dozaja, narinliklerine ve geometrik özelliklerine, hammaddesine bağlı olarak betonda işlenebilirlik düşürücü etki yaratmaktadır. Liflerden beklenen bu düşürücü etki optimum tasarım parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesiyle sağlanabilir. Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle çelik lifli betonlar için matematiksel modellemeler ile taze hal için en uygun karışım tahmin edilmeye çalışılsa da betonda kullanılan malzemelerin karakteristiği yöreden yöreye farklılık gösterdiği için denemeler ile tasarıma gidilmesi halen en geçerli yöntemdir.

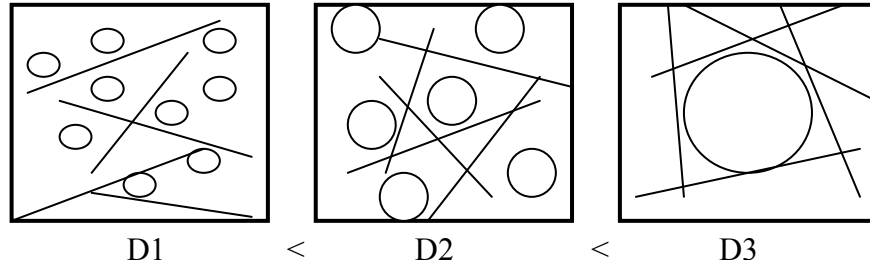
ÇLB tasarım rehberlerinde (ACI 544, 1999) geleneksel bir tasarıma sahip normal betonlarda dahi çelik liflerin kullanılabileceği belirtilmektedir. Fakat işlenebilirliğin iyileştirilmesi ve liflerin performanslarını tam olarak gösterebilmeleri için bir takım önlemler alınmalıdır. Karışımın en büyük agrega boyutunun düşürülmesi, granülometrinin ayarlanması, çimento miktarının (hamur fazının) arttırılması ve özellikle işlenebilirliğin geliştirilmesine yönelik olarak uygun mineral katkıların kullanılması tavsiye edilmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 ÇLB işlenebilirliğinin sağlanması.

Lifli betonlarda işlenebilirliğin sınanması için Ve-Be testi veya ters çökme deneyi önerilmektedir. EM 1110 – 2 (2000)'de çelik lifli betonlarda, normal şekilde uygulanan çökme deneyinde çökme miktarı yeterli görülmediğinde karışıma kontrollü olarak eklenen su ile çökme değerinin artırıldığı ancak bunun işlenebilirliğin arttığı anlamına gelmediği belirtilmiştir. Bu nedenle lifli betonların hareketliliğinin de değerlendirilmesi için ters çökme deneyi önerilmektedir (EM-1110-2, 2000; Yardımcı, 2008).

Aynı lif tür ve dozajına sahip betonların agrega çapı büyüdükçe işlenebilirliğinde azalmalar görülmektedir. Bunun sebebi artan agrega çapının liflerin birbiri arasındaki etkileşimini de arttırmasıdır (Şekil 2.11). Bu durum sonucu işlenebilirlikteki azalmaya paralel artan makro boşluklar ve peteklenmeler hem matrisin ve yapının dayanımını düşürmektedir hem de liflerden beklenen performansın sağlanamamasına sebep olmaktadır. Duvar etkisiyle agregaların kalıp köşelerine harç girişini engellemesi durumu lifli betonda daha belirgin olacaktır. 20 mm ve üzeri maksimum agrega çapları ÇLB dizaynı için akılcı bir seçenek değildir.



Şekil 2.11 Maksimum agrega çapının (D) artmasıyla artan sürtünme yaratıcı lif etkileşiminin şematik hali.

### 2.4.3 Çelik Lifli Betonlarda Çatlak Gelişimi, Yayılması ve Gerilme Köprülenmesi

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 büzölmelerden veya otojen büzölmelerden kaynaklanan 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 büzölme ile genişleme sırasında agregaların matrisi kısıtlayıcı etki yapması sebebiyle agrega çevresinde mikro çatlak yoğunluğunun arttığı söylenebilir.

Mikro çatlak oluşturucu etmenler arasında şüphesiz durabilite zorlamaları da bulunmaktadır. Alkali – silika veya alkali – karbonat reaksiyonları, donma – çözölme 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).



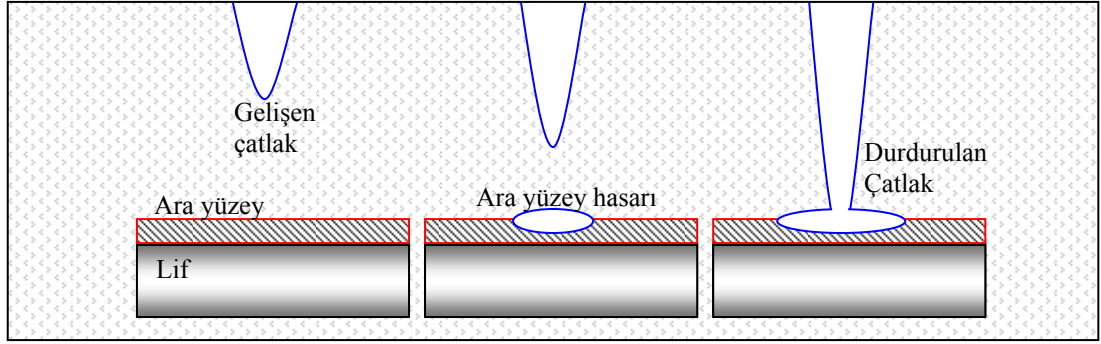
Çimentolu kompozitlerde liflerin donatı etkisi matris çatladıktan sonra belirginleşmektedir. Lif donatılı çimentolu kompozitlerde liflerle birlikte agregalar ve boşluklar da bulunmaktadır ve lifli kompozitte bunların da birbirleri ile etkileşimi söz konusudur ve bu nedenle davranış karmaşıktır. Bunun 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).

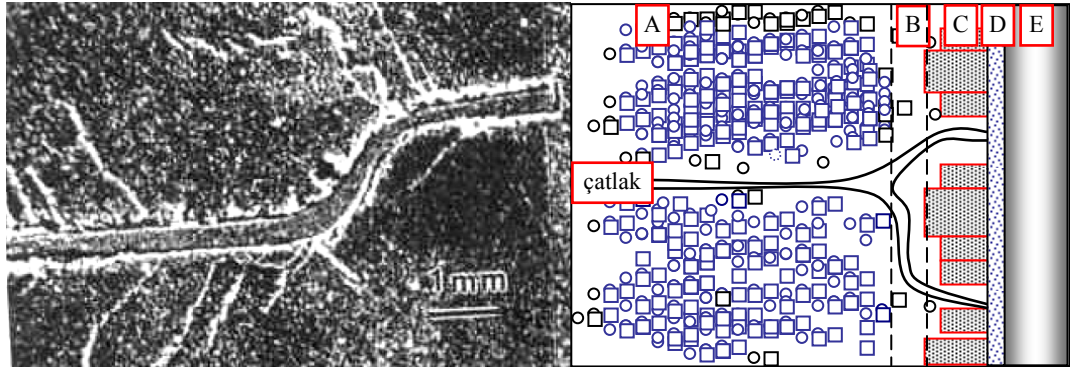
Kötü beton tasarımı sonucu oluşacak kabul edilemez derecedeki terleme sonucu ayı agregalarda olduğu gibi liflerin de altında su dolu yapıların oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu yüzden lif – matris aderans bölgesi boşluklu ve hidrasyon ürünlerince fakir olabilmektedir. Yardımcı (2008) bu konuyu 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 2.12'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 devam etmektedir. Oluşan bu maksimum gerilme lif – matris ara yüzeyine geldiğinde burada ara yüzey hasarı gelişmektedir. Gelişen bu hasar ile çatlak birleştiğinde "T" şekilli bir sonlanmış çatlak gözlemlenmektedir. Oluşan lif – matris ara yüzey hasarı lif tarafından engellenmiş olmaktadır.



Şekil 2.12 Matris içerisinde ilerleyen çatlakın liflerce yakalanması ve bu sırada oluşan ara yüzey hasarının gelişimi.

Ara yüzeyde oluşan bu zayıflama daha önce bahsedildiği gibi terleme suyunun zayıflatıcı etkisi gibi etmenler yüzünden hidrasyon ürünlerince zayıf bölgede oluşmaktadır. Bu en zayıf bölgenin hemen lif yüzeyinde olmadığı, daha boşluklu geçiş bölgesinde olduğu ve bu bölgede çatlakın dallanma yapabildiği Bentur ve ark. (1985) tarafından söylenmektedir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Lifin çatlak sönümlendiği gerçek fotoğraf (sol) ve Bentur ve ark.(1985)'nin bahsettiği çatlak ilerleme mekanizması (sağ) (A: çimento hamuru, B: boşluklu tabaka, C: kalsiyum hidroksit tabakası, D: dubleks film, E: lif).

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 çatlakı köprüleyerek çatlakın 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.

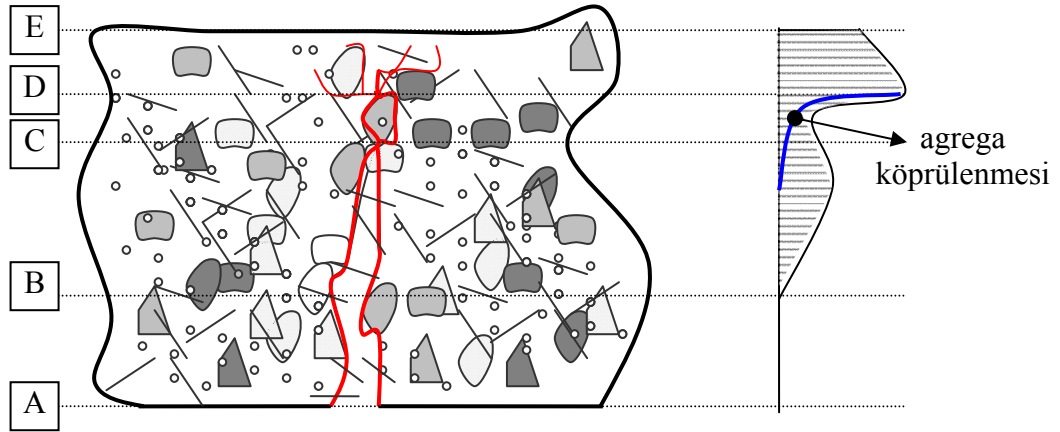
Çatlak açıldıkça çatlağı köprüleyen lifler üzerinden gerilmelerin geçtiği gerilme köprücükleri olarak görev yaparlar. Bu süreçte, yeterince uzun ve rijit olan lifler (örneğin, mezo ve makro boyutta çelik lifler) matristen sıyrılır ve bir miktar enerji sönümlenir. Bu sıyrılmanın daha zor olmasını sağlamak 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. Banthia 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 matrinden 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 Agregaların Liflerin Çatlak 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 yük köprülemedikleri ayrık bölge, diğeri lif ve agregaların matristen sıyrılmaya çalıştıkları ve bu sırada gerilme köprüledikleri köprüleme bölgesi ve son olarak makro çatlakların ve çatlağın en uç kısmında mikro çatlakların oluştuğu çatlak ilerleme bölgesidir (Şekil 2.14).

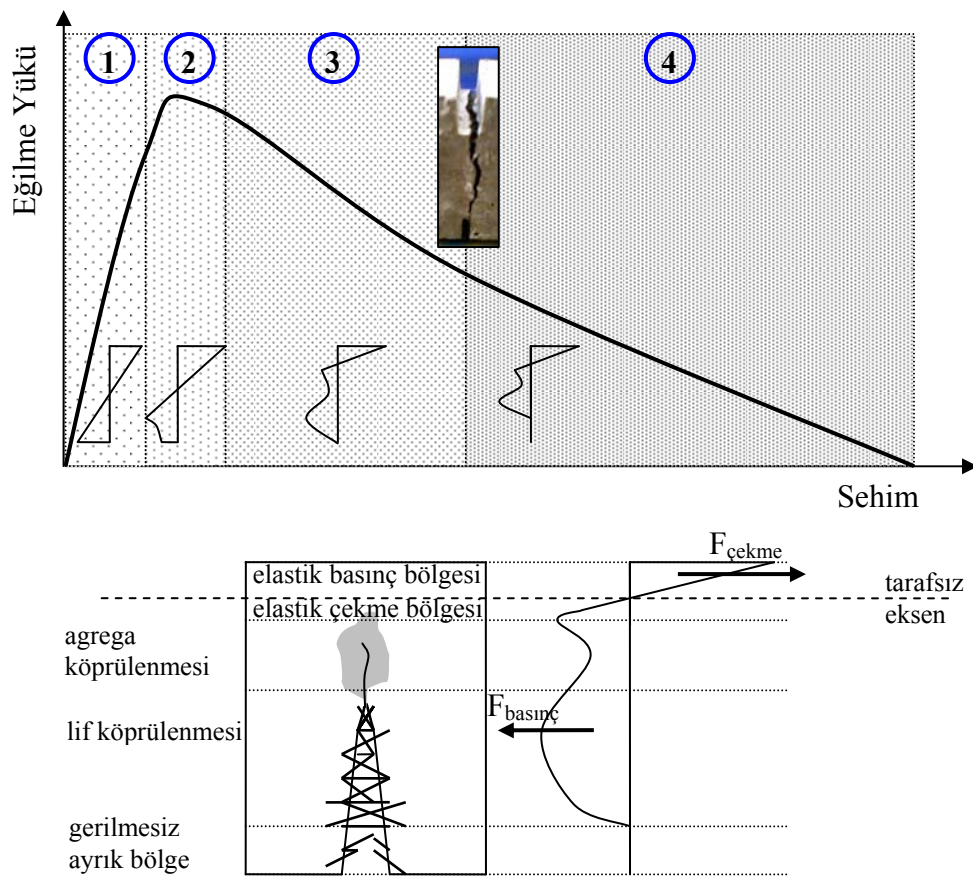


Şekil 2.14 Tek eksenli çekme altında kırılma zonu ve liflerin etkisi (Löfgren 2005'ten esinlenerek çizilmiştir).

Şekilden görüldüğü gibi A – B arası lif ve agregaların matristen sıyrıldığı gerilmesiz bölgedir. B – C arası ayrık matrisin iki tarafına saphı olan liflerin ve az da olsa agregaların gerilme köprülediği bölgedir. Bu aşamada lif boyutları, tipi, miktarı ve agregaların özellikleri çok etkilidir. Özellikle kancalı uçların kullanımında bu bölgede yük tekrar artabilmektedir (Löfgren, 2005). Yük – deformasyon eğrisi liflerin sıyrılmaya 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 oluştuğu bölgedir. Bu oluşum matrisin ilk hasar gördüğü noktadır. Bu açıdan durabilite yahut büzülme ve genişleme 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 yüksüzleştirmesi (Şekil 2.15)



Şekil 2.15 Çelik lifli kiriş numunelerinde eğilme yükü – deplasman eğrisi (üst) ve gerilmesiz ayrık bölgenin şematik hali (alt) ( Robins ve ark., 2001'den esinlenerek çizilmiştir).

Şekil 2.15'ten görüldüğü üzere 1. bölge lineer elastik davranışın olduğu yani henüz matriste çatlakın 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 aşama aslında 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 çatlağın 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.

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

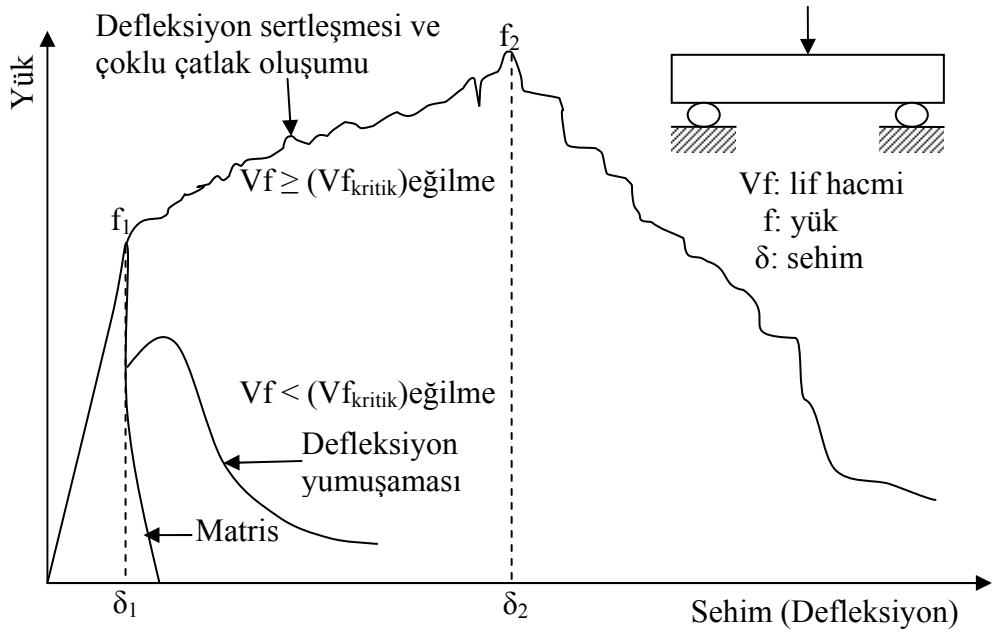
Lif boyutları küçüldükçe belirli bir hacimde daha büyük boyutlu liflere göre en kesitte daha fazla lif bulunmaktadır. Böylece mikro lifler kullanıldığında lifler arasındaki mesafe azalır. Bu durumda mikro çatlakların, mikro lifler tarafından karşılanma olasılığı da artmaktadır. Ancak, mikro liflerin etkili olabilmesi için görünüm oranı yüksek olmalı ve yeterli rijitlikte olmaları gerekir (Yardımcı, 2008). Mikro liflerin diğer 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 diğer 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 ark., 1995). Kısa boylu ve yüksek narinlikli lifler dayanım geliştirmede daha etkindir. Ancak bu mikro liflerin yeterli narinlikte olmasıyla alakalıdır.

Lawler ve ark. (2003), mikro liflerin varlığının maksimum yükten önce mikro çatlak genişliğini sınırladığını ve mikro çatlakların birleşerek tekil büyük çatlağa 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 diğer büyük lif türlerine göre daha çok çatlağın 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 2.16). Eğilme etkisinde bu davranış düşük lif içeriklerinde sağlanabilirken, doğrudan çekme etkisinde yüksek lif içerikleri gerekmektedir (Lappa, 2007).



Şekil 2.16 Lifli çimentolu kompozitlerde eğilme etkisi altında lif hacmine bağlı olarak sergilenebilecek davranışlar (Şekil Naaman and Reinhardt, 2005'ten esinlenerek çizilmiştir).

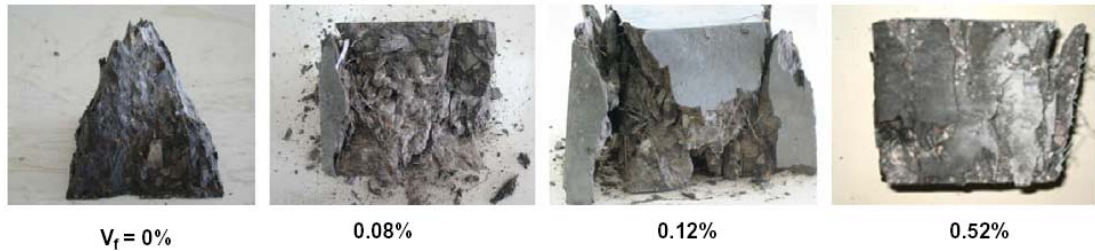
Şekil 2.16'dan görüleceği üzere matrisin kırılmasına sebep olan ilk çatlak yükünden ( $f_1$ ) sonra defleksiyon sertleşmesi oluşması için gereken kritik lif hacmi ( $V_{f_{kritik}}$ )eğilme, beton bünyesinde mevcut olmalıdır. Defleksiyon sertleşmesi ile taşınan yük  $f_1$  değerini geçerek  $f_2$  gibi 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 defleksiyon sertleşmesi kavramına göre daha güvenilir olduğunu, bunun sebebinin eğilme altında numune



boyutu, kalınlığı ve deney metodu gibi etkilerin büyük değişkenlik yaratması olduğunu vurgulamıştır.

## 2.5 Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lifli Betonlar

Sertleşmiş halde tıpkı geleneksel beton gibi gevrek davranış içinde olan KYB içinde çeşitli liflerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Şekil 2.17). Ancak geleneksel betondan farklı olan kısım, KYB’de lif kullanımının yarattığı işlenebilirlik kaybının giderilmesinin zor oluşudur. Geleneksel betonda lif kullanımı sonrasında oluşan çökme kayıpları daha fazla yerleştirme işçiliği ile giderilebilirken, kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonlarda (KYÇLB) yerleşebilirlik sorunu vibrasyon uygulanmadan çözülmesi gerektiği için taze hal davranışını optimize edecek karışım dizaynına ulaşmak gerekmektedir. Bu da büyük tecrübe ve reoloji bilgisi isteyen bir mühendislik problemidir.



Şekil 2.17 Yüksek dayanımlı KYÇLB’de çelik lif kullanımı ve artan çelik lif hacmiyle ( $V_f$ ) deney sonrası dağılımın azalması (El-Dieb, 2009).

Yüksek oranda lif kullanımının gerektiği beton tasarımlarında kendiliğinden yerleşen beton tasarım felsefesinin kullanılması, daha yüksek işlenebilirlikte lifli beton kompozitlerin oluşturulması açısından yararlı olabilir. Bu açıdan bakıldığında, kalıba kolayca yerleşebilen ve etkili sıkıştırmanın herhangi bir ek vibrasyon enerjisine gerek duyulmadan başarılabilirdiği kendiliğinden yerleşen betonların kullanımı, daha yüksek performanslı ve ekonomik lifli kompozitlerin oluşturulması açısından daha yararlıdır (Yardımcı, 2008).

KYÇLB’den tıpkı KYB’den olduğu gibi beklenen yetenekler vardır. Ayrışmadan dar alanlardan geçebilen ve kalıbını eksiksiz doldurabilen KYÇLB karışımları kabul

edilebilirdir. Tabii vibrasyona gerek kalmadan tüm bu işlevler sağlanmalıdır. Aksi taktirde yüksek yerleşebilirlikli çelik lifli betondan söz edilebilir fakat KYÇLB'den söz edilemez. Ancak bu reolojik gereklilikler sağlanırsa taze hal, mekanik ve durabilite performansından söz edilebilir.

Taze halde KYÇLB'nin tıpkı KYB'den istenen şartlara haiz olabilmesi için alınması gereken ek önlemler vardır. Bu önlemler KYB'ye göre nispeten daha düşük iri agrega / ince agrega oranı, daha çok hamur hacmi, daha düşük iri agrega maksimum tane çapı ve daha uzun süre işlenebilirlik sağlayıcı önlemler olarak özetlenebilir. Tüm bu önlemlerin amacı lif ilavesinin yarattığı negatif reolojik etkileri azaltmaktır.

Yardımcı (2008)'in doktora tez kapsamındaki çalışmaları ÇLKBYB karışımının ince agrega / kaba agrega oranının önemli bir tasarım parametresi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, KYÇLB'de en iyi reolojik özelliklere, en yüksek mekanik özellikler ile en yüksek sünekliğe sahip ve ekonomik karışımların oluşturulması için seçilmesi gereken optimum ince agrega / kaba agrega oranının kullanılan lif narinliğine göre değiştiği ortaya koymuştur.

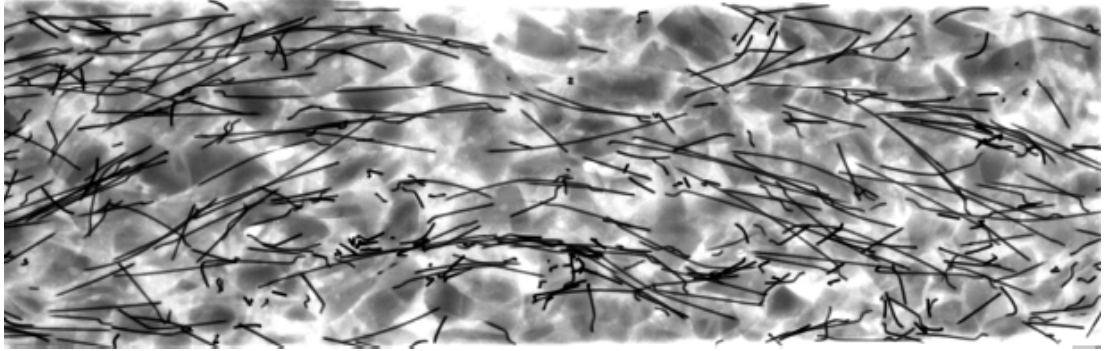
Lifler aynı hacimdeki agregalara göre daha uzun sekile ve daha yüksek yüzey alanına sahiptirler (Grünwald ve Walraven, 2001). Bundan dolayı akış sırasında akışa karşı bir içsel sürtünme ile karşı koyarlar. Genel olarak lif boyu ve en büyük agrega boyutu ile agrega hacmindeki azalma akış sırasında içsel sürtünmeyi azaltır ve işlenebilirliği artırır (Khayat ve Roussel, 2000).

Yapılan bir çalışmada hacmen %1 ve %0,5 çelik lif içeren KYÇLB karışımlarında lif miktarı arttıkça reometre ile ölçülen plastik viskozitenin arttığı ve EFNARC (2002) tarafından tanımlanan doldurma kutusu deneyinde dolma performansının düştüğü görülmüştür (Khayat ve Roussel, 1999).

KYÇLB karışımlarında homojenite çok önemlidir. Liflerin yüksek işlenebilirlikli KYB hamuru içinde çökmeden ve topaklanmadan kesitlere olabildiğince eş

dağılması sağlanmalıdır. Liflerin beton içerisinde homojen dağılımı, lifli betonun tek eksenli çekme ve eğilme davranışındaki performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Gettu ve ark. 2005, Barragan ve ark. 2003).

Groth (2000)'un doktora tezi kapsamında yaptığı çalışmalarda L-kutusu aparatında prizi aldırılan ve kesit alınan KYÇLB içerisindeki çelik lif dağılımı X-RAY tekniği ile fotoğraflanmıştır (Şekil 2.18). Çalışmada homojen lif dağılımının gerekliliği vurgulanmıştır ve hazırlanan karışımlarda lif segregasyonunun olmadığı fotoğrafla ispatlanmıştır. Akış doğrultusunun lif doğrultulanmasını etkilediği not edilmiştir.



Şekil 2.18 L-kutusunda prizi aldırılan KYÇLB'den bir kesitin X-RAY fotoğrafı (Groth, 2000).

Betonda homojenitenin gerek durabilite gerekse mekanik performansı önemli derecede etkilediği bilinmektedir. Lifsiz ve çelik lif donatılı kendiliğinden yerleşen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmada 2,5 m yükseklikli, 15 cm çaplı silindirik KYÇLB kolonlarının yüksekliği boyunca homojenitesi araştırılmıştır (Torrijos ve ark., 2007). Homojen lif dağılımında lif dozajının çok önemli bir parametre olduğu saptanmıştır. Lif dozajı  $25 \text{ kg/m}^3$  gibi göreceli olarak düşük olduğunda KYÇLB'nin reolojik parametrelerinin lifsiz duruma göre çok belirgin bir şekilde değişmediği görülmüştür. Kolon yüksekliği boyunca homojen lif dağılımının elde edildiği, lif dozajı  $50 \text{ kg/m}^3$  olduğunda ise özellikle kolon yüzeyinde hava boşluklarının olduğu ve kolonun üst kısımlarında basınç dayanımı kaybının %15'ler düzeyine ulaştığı saptanmıştır. Enteresant bir sonuç olarak lifli betonun kolon yüksekliğince lifsiz haline göre agregalarının homojenitesini arttırdığıdır. Liflerin destek etkisi yaparak agrega çökmesini

azaltması bu durumun sebebi olabilir. 125 x 125 mm ağızlı V-kutusu aparatının KYÇLB'ler için kullanılabilir olduğu vurgulanmıştır.

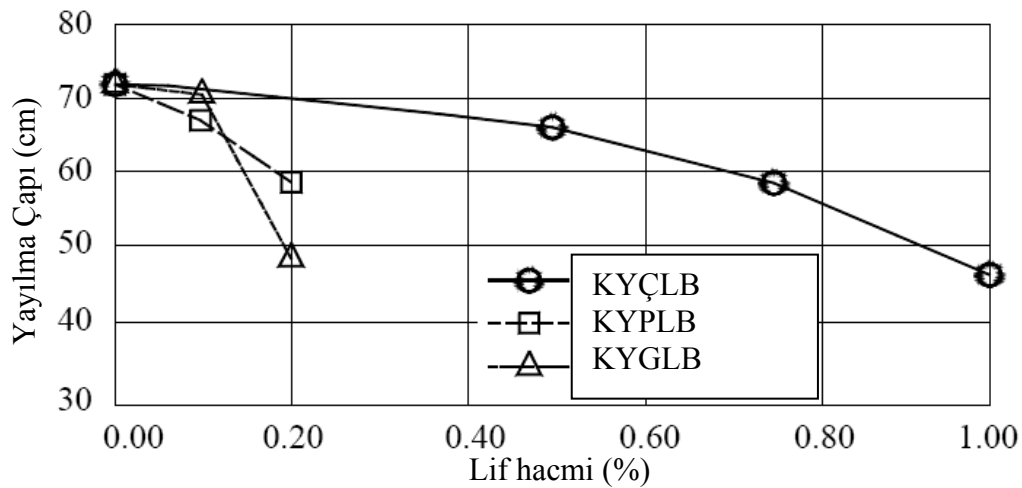
Grünwald ve Walwaren (2001) KYÇLB'nin taze hal performansı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada lif miktarı ve tipi, kaba agrega içeriğinin etkileri ve KYB için kullanılan taze hal test metodlarının KYÇLB için uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Uçucu kül ve çimentoyla iki farklı hamurdan kontrol karışımı üretilmiştir. Bu karışımlardan birinde iri agrega hacmi düşürülüp hamur fazı artırılmıştır. Değişik narinlik ve boylarda dört çelik lif tipi 40 – 120 kg/m<sup>3</sup> aralığında kullanılmıştır. Liflerin narinliği düştükçe taze hal performansında kayıp olmadan daha çok lifin karışımda kullanılabileceği saptanmıştır. Bu çalışmada özellikle yüksek narinlikli çelik lifler içeren KYÇLB'ler için V-kutusu ve J-halkası deney aletlerinde akışı kolaylaştıracak modifikasyonların yapılması önerilmiştir.

Şahmaran vd. (2005) karma çelik lif kullanımının KYÇLB işlenebilirliği üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde ZP305 (lif boyu 30 mm, narinliği 55) ve OL6/16 (lif boyu 6mm, narinliği 16) çelik lifleri tekil ve karma olarak 60 kg/m<sup>3</sup> kullanılmıştır. Kendiliğinden yerleşebilirli sağlansa bile EFNARC limitlerinin tutturulamadığı gözlemlenmiştir.

KYB'de kullanılan diğer lif türlerinin bambaşka reolojik ve mekanik etkileri mevcuttur. KYB'lerde su/bağlayıcı oranının düşük olması, terlemeyi önleyici katkı kullanılması ve uçucu kül veya silis dumanı kullanılarak ince malzeme miktarının artırılması ve böylece terlemenin neredeyse tamamen yok olması betonu plastik rötreye karşı hassas bir duruma getirmektedir. Bu nedenle oluşabilecek plastik rötre çatlaklarını önlemek amacıyla çok az miktarda da olsa polipropilen lif kullanılması çatlakları önlemede ve betonun kalıcılığının artması yönünde önemli yararlar sağlar (Alkan G. , 2004).

Haist ve ark. (2002), lifli ve lifsiz yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen hafif betonların reolojik ve mekanik özelliklerini incelemiştir (Sekil 2.19). Yapılan çalışmada sertleşmiş beton üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucu

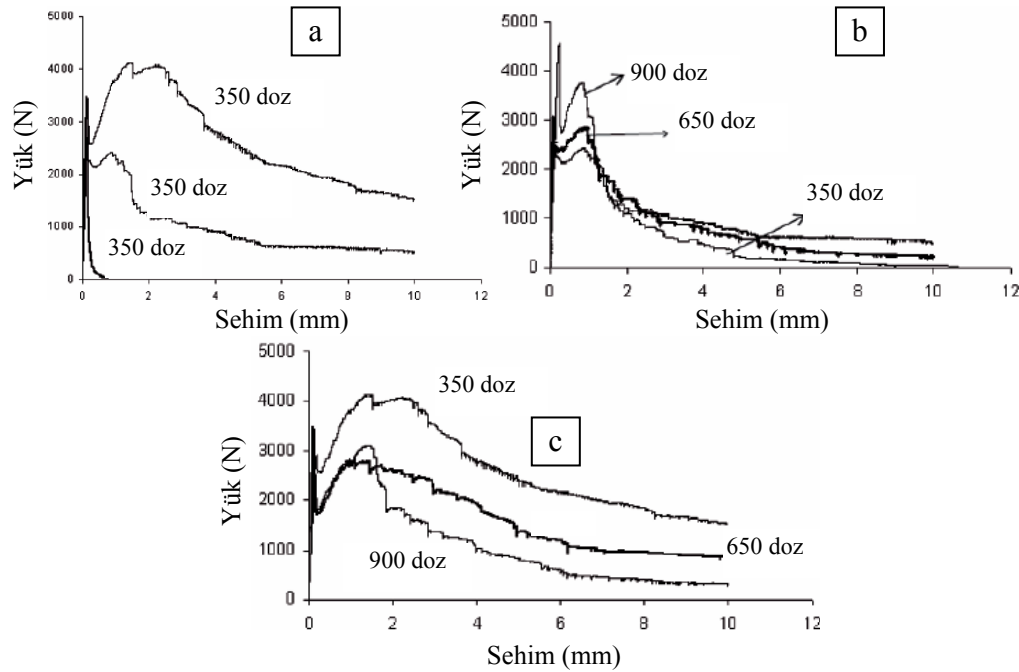
geleneksel hafif betonlara göre kendiliğinden yerleşen hafif betonların Elastisite modülü ve basınç dayanımlarının daha iyi olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmada çelik lif, polipropilen (PP) lif ve cam liflerinin kullanılmasında artan lif dozajına karşılık çökme – yayılma değerlerinde meydana gelen değişim incelenmiştir. Çelik life oranla PP lif ve cam lifi daha az dozajlarda çok fazla yayılma kaybı vermiştir ve böyle bir durum PP lif ve cam lifinin islenebilirliği çok düşürdüğünü göstermektedir. KYB’de akıcılık ve kendiliğinden yerleşebilirlik çok olumsuz etkilenmeden kullanılacak en fazla lif miktarının, lif tipine doğrudan bağlı olduğunu ve çelik lifler için maksimum hacimce % 0,5, PP ve cam lifleri için ise maksimum hacimce % 0,1 değerlerinin uygun olduğunu söylemişlerdir.



Şekil 2.19 KYB'lere katılan farklı tür ve hacimdeki liflerin çökme – yayılma çapına etkisi (KYÇLB: kendiliğinden yerleşen çelik lifli beton, KYPLB: kendiliğinden yerleşen polipropilen lifli beton, KYGLB: kendiliğinden yerleşen cam lifli beton) (Haist vd. , 2002).

Şengül vd. (2006) çalışmasında, KYÇLB karışımlarında düşük (1100 MPa çekme dayanımı) ve yüksek (2200 MPa çekme dayanımı) dayanımlı çelik lifler  $40 \text{ kg/m}^3$  dozajında kullanılmıştır. Benzer su / toz oranına sahip  $900 \text{ kg/m}^3$  çimento içeriği diğer karışımda silika dumanı ikamesiyle  $650 \text{ kg/m}^3$  e düşürülmüştür. Ancak yalın KYB’de bu dozaj azalışı basınç dayanımlarını çok etkilememiştir. Çalışmada düşürülen S/Ç oranının viskoziteyi aşırı arttırdığı ve V-kutusu akışını düşürdüğü saptanmıştır. Aynı çalışmada kırılma enerjileri ve tokluklar değerlendirilmiştir. Önemli bir sonuç olarak yüksek dayanımlı lif donatılı KYB’nin yarma dayanımı ve kırılma enerjisinin düşük dayanımlı lif donatılı KYB’den daha yüksek olduğu

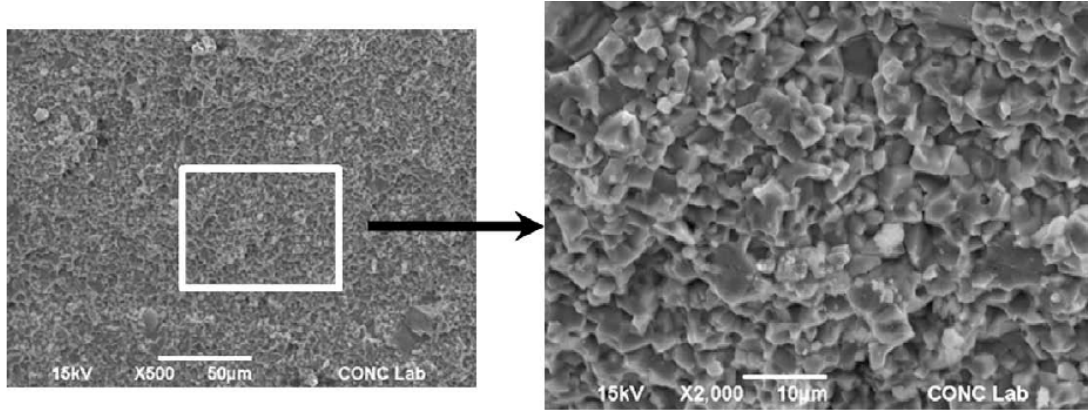
bulunmuştur. Betonun dayanımı arttıkça liflerin matristen sıyrılmaktan çok, koptuğu ve böylece sünekliliğin yüksek dayanımlı betonlarda daha az olduğu bulunmuştur (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 Lif dozajının eğilme performansına etkisi (a), çimento dozajının düşük dayanımlı liflerin eğilme performansına etkisi (b), çimento dozajının yüksek dayanımlı liflerin eğilme performansına etkisi (c) (Şengül, 2006).

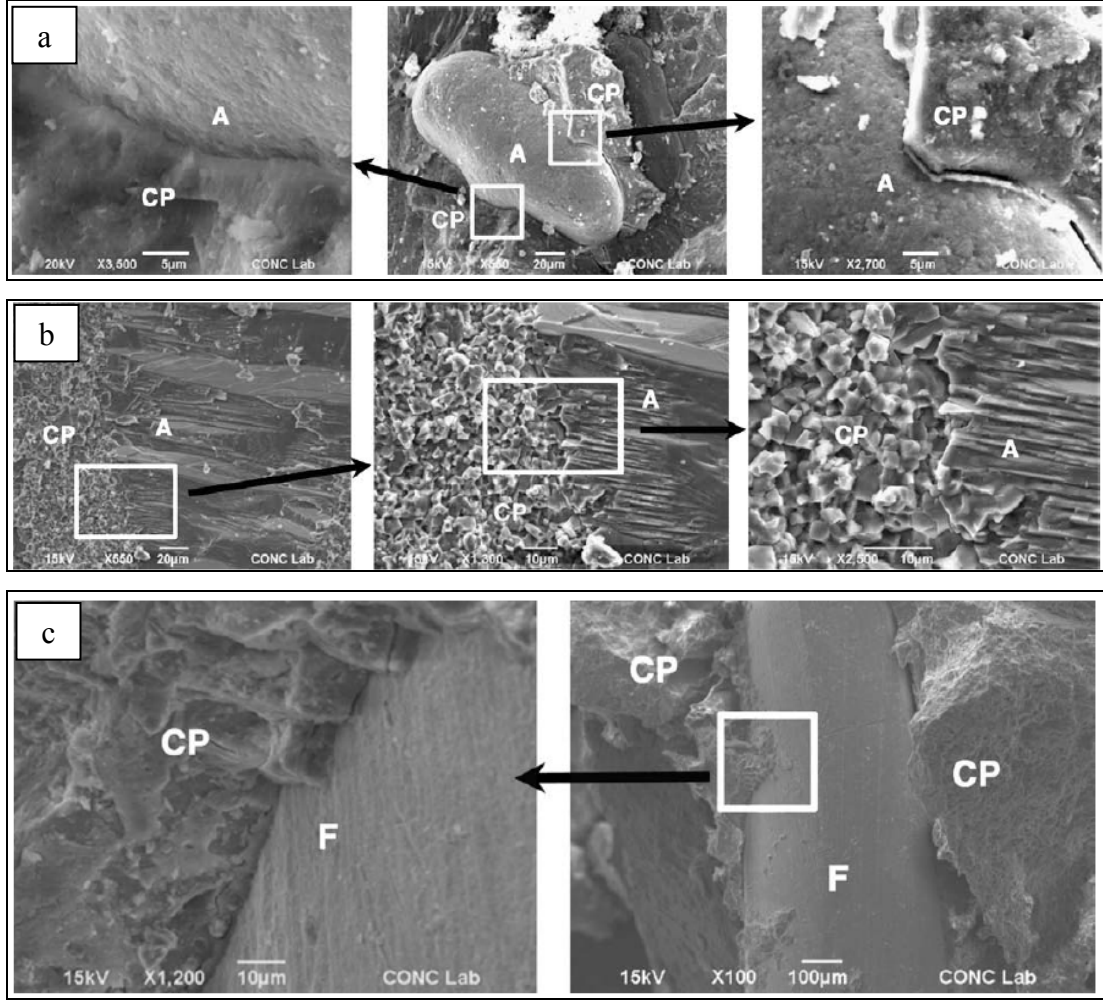
El-Dieb (2009) ultra yüksek dayanımlı KYÇLB'lerin mekanik, durabilite ve mikro yapı özelliklerini araştırmıştır. Beş farklı silika dumanlı matrislere çinko kaplanmış helis şekilli çelik lifler (0,5mm ortalama çap, 25mm uzunluklu) katılmıştır. 6, 20 ve 40 kg/m<sup>3</sup> yani sırasıyla hacmen %0,08, %0,12, %0,52 çelik lif, beş ana matristen 28 günde en yüksek dayanımı veren (>100 MPa) matrisle buluşturulmuştur. Seçilen karışımın su / bağlayıcı oranı 0,23 ve bağlayıcı içeriği 900 kg/m<sup>3</sup>'tür (%17,5'i silika dumanı). Yapılan çalışmada lif dozajı artışının yayılma çaplarını düşürdüğü ancak 700 mm gibi çok iyi bir değer altına inmediği görülmüştür. Tüm yaşlarda lif içeriği artışıyla beton basınç dayanımı ve silindir yarma dayanımı artmıştır. Yarma dayanımı / basınç dayanımı şeklinde bir faktör kıyaslanmıştır ve bu değer de lif hacmindeki artışla arttığı görülmüştür. Betonun elektriksel geçirirmliliğinin lif dozajı ile doğru orantılı arttığı görülmüştür.

Klor difüzyonunun ve su emme değerlerinin çelik liften etkilenmediğini bu durumun çimento pastasının içyapısıyla alakalı olduğunu göstermişlerdir. Numunelerin sülfat dirençlerinin çok iyi olduğu, çelik liflerin büyük bir etki yaratmayarak neredeyse tüm serilerde benzer dayanım kayıplarının olduğu, bunun düşük geçirimliğe sahip sıkı içyapının sonucu olduğu vurgulanmış ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) fotoğraflarıyla ispatlanmıştır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Yüksek performanslı KYÇLB'nin sıkı ve boşluksuz yapısı (El-Dieb, 2009).

Kırılmış beton örneklerinde içyapılara bakıldığında agrega – matris, lif – matris ara yüzeylerinin çok güçlü olduğu ve bunun yüksek performanslı betonun kendiliğinden yerleşebilmesiyle alakalı olduğu görülmüştür (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 Agreganın çimento pastası tarafından sıkı biçimde kuşatılması (a), kırık agrega parçasının çimento pastasıyla olan kenetlenmesi (b), lifin – matris aderansı ve matrisin boşluksuzca life yapışması (c) A: agrega, CP: çimento pastası, F:lif (El-Dieb, 2009).

İçyapı fotoğrafları ve mekanik testlere göre yüksek binalarda sismik zorlamalar altında beklenen kırılma enerjisi ve tokluk performansının bu tür betonlarda çok iyi olduğu ve kullanımın faydalı olacağı belirtilmiştir. Yüksek dayanımlı KYÇLB’de lifin matrisle olan aderansının geleneksel betondan çok daha iyi olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca düşük iyon ve su geçirirmliliği sayesinde nükleer ve endüstriyel atık sahalarında kullanılmasının faydalı olacağı belirtilmiştir.

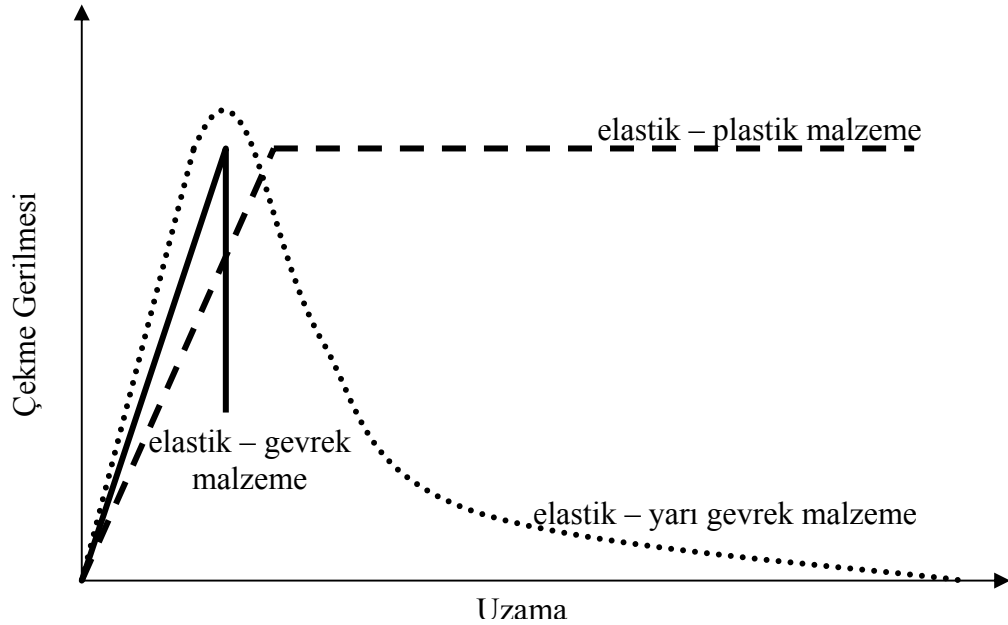


## BÖLÜM ÜÇ

### BETON İÇİN TEMEL KIRILMA MEKANİĞİ

Kırılma mekaniği biliminin araştırma alanı malzemenin doğasından gelen veya zorlamalarla oluşmuş çentik, çatlak, boşluklu bölge gibi noksanları ve bunların tetiklediği hasar mekanizmasıdır. Eski dönemlerde betonun sadece basınç ve eğilme performansı tartışılırken artık kırılma davranışı ve durabilite performansı çok ciddi tartışılır olmuştur. Betonun sadece kırılana kadarki verileri dizaynlar için yeterli kalmamakta, kırıldıktan sonra sergilediği davranış da önemli olmaktadır. Çatlaklarla dolu bir eleman yada yapının göçme mekanizmasını anlamak kırılma mekaniği prensiplerine hakim olmaktan geçmektedir. Can ve mal kaybının önlenmesi veya kontrol altına alınması göçme durumundaki yapının sergilediği karmaşık davranışın kontrol altına alınmasından geçmektedir. Bu açıdan gerek malzeme bazında kırılma mekaniği gerekse yapı bazında enerji esaslı analizler son yılların ilgi odağı konularındandır.

Elastik – yarı gevrek malzeme olan beton ne tam gevrek ne de tam elastik davranmamaktadır (Şekil 3.1). Bu sebepten dolayı araştırmacılar beton malzemesi için çeşitli modellerin uygunluklarını sınımışlardır.

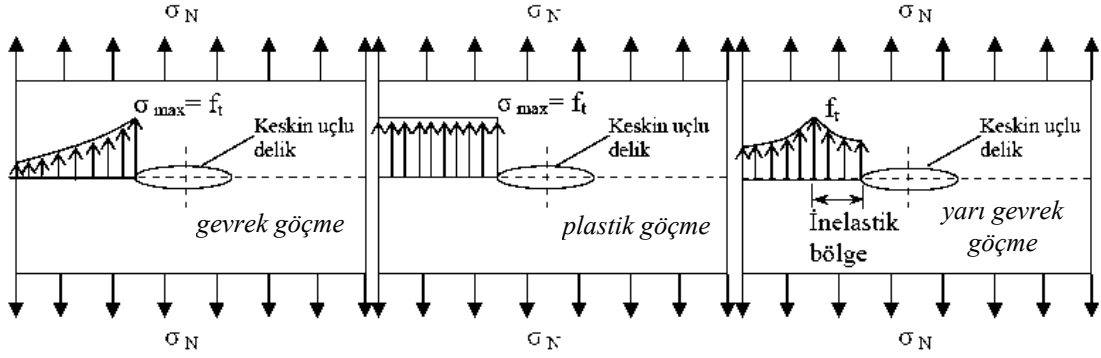


Şekil 3.1 Malzemelerin tek eksenli çekme gerilmesi altındaki davranış türleri.

Şekil 3.1’de verilen, farklı malzemelerin çekme – uzama eğrisi dikkate alındığında gevrek bir malzeme kırıldığında taşıdığı gerilme hızlı biçimde sıfıra inmekte, sünek bir malzeme ise akmakta ve taşıdığı gerilme sabit kalmaktadır. Yarı gevrek bir malzeme ise yavaşça taşıdığı gerilmeyi kaybeder. Bu durum malzeme kusurlarında yığılan gerilmelerin malzeme özelliklerine göre bambaşka davrandığını göstermektedir. Betonda lineer ve lineer olmayan kırılma mekaniği yöntemleri denenmiştir. Bunlardan lineer kırılma mekaniğinin neden uygun olmadığını açıklamak gerekir. Sonsuz uzunluklu ince bir levhanın ortasındaki delik gerilme etkisinde değişik malzeme davranışlarına göre değişik yığılmalar oluşturur. Plakaya uygulanacak çekme gerilmesi ( $\sigma_N$ ) keskin çatlak ucunda kendisinden daha büyük bir gerilme ( $\sigma_{max}$ ) oluşturacaktır. Bu iki gerilme arasında yığılma faktörü adı verilen ( $K_t$ ) bir belirleyici vardır;

$$\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma_N \quad (3.1)$$

Şekil 3.2’de gösterilen plak tam gevrek bir malzemeden üretilmişse, delik kenarında oluşan gerilme malzemenin çekme dayanımına ulaştığında plak ani bir şekilde göçecektir (gevrek göçme). Eğer plak tam sünek bir malzemeden yapılmış ise uygulanan çekme yükü delik kenarında maksimum gerilmeye ulaşıldıktan sonra, plastik gerilmenin yeniden dağılışı nedeniyle artabilir. Böylece plaka, elips şeklindeki deliğin olduğu kesitte normal gerilme dağılışı malzemenin çekme dayanımına ulaştığında göçecektir. Yarı gevrek malzemeden yapılmış bir plakada ise, maksimum gerilmenin olduğu yerde, “kırılma gelişme bölgesi” denilen elastik olmayan (inelastik) bölge oluşur. Bu kırılma gelişme bölgesi içerisinde elips kenarına (gerçek durumda keskin durumdaki bir çatlak kenarına) yaklaştıkça normal çekme gerilmeleri düşer. Kırılma gelişme bölgesinin oluşumu yarı-gevrek malzemelerin yük - deformasyon davranışındaki yumuşamanın asıl nedenidir (Shah ve ark. 1995; Yardımcı, 2008).

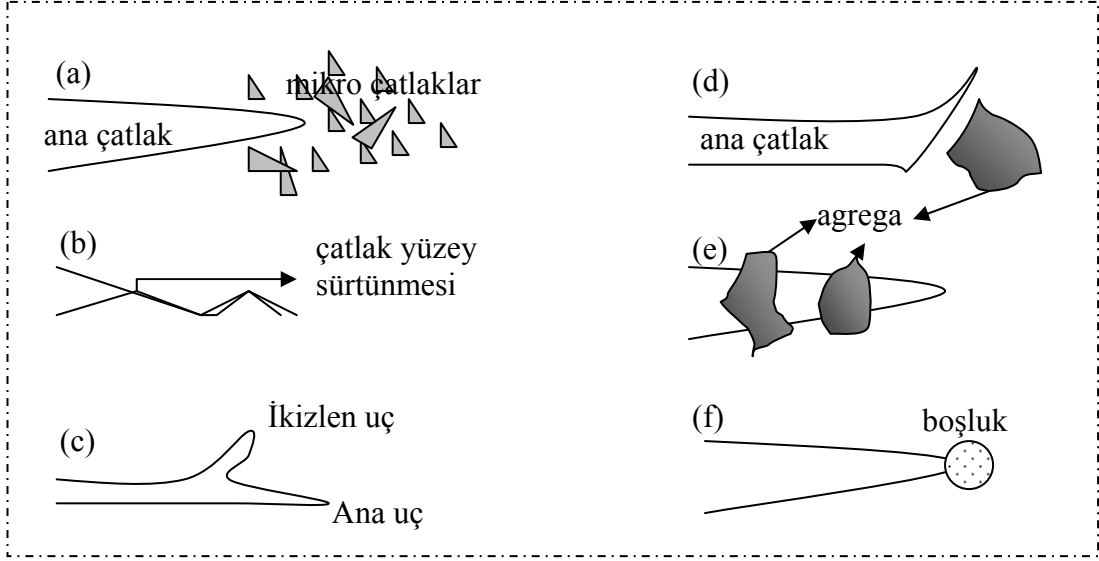


Şekil 3.2 Farklı malzeme türlerinin çekme etkisindeki hasar mekanizması (Yardımcı, 2008).

Beton yarı gevrek bir malzeme olduğu için inelastik bölgede harcanacak enerjinin dikkate alınması gerekmektedir. Beton gibi yarı gevrek malzemelerin bünyesinde mevcut olan kusur, çatlak veya deneysel amaçla açılan bir çentik ucunda kırılma gelişme bölgesi oluşmaktadır. Dolayısıyla beton gibi yarı gevrek malzemeler yumuşama davranışı içerisindedirler. Bu yüzden betonun kırılma davranışı, kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) gibi tek bir parametre ile tanımlanamaz. Kırılma enerjisi, karakteristik boy, çatlak ucu açılma deplasmanının kritik değeri gibi parametreleri irdelemek gerekmektedir. Bu da lineer olmayan kırılma mekaniğinin araştırma alanı içerisindedir.

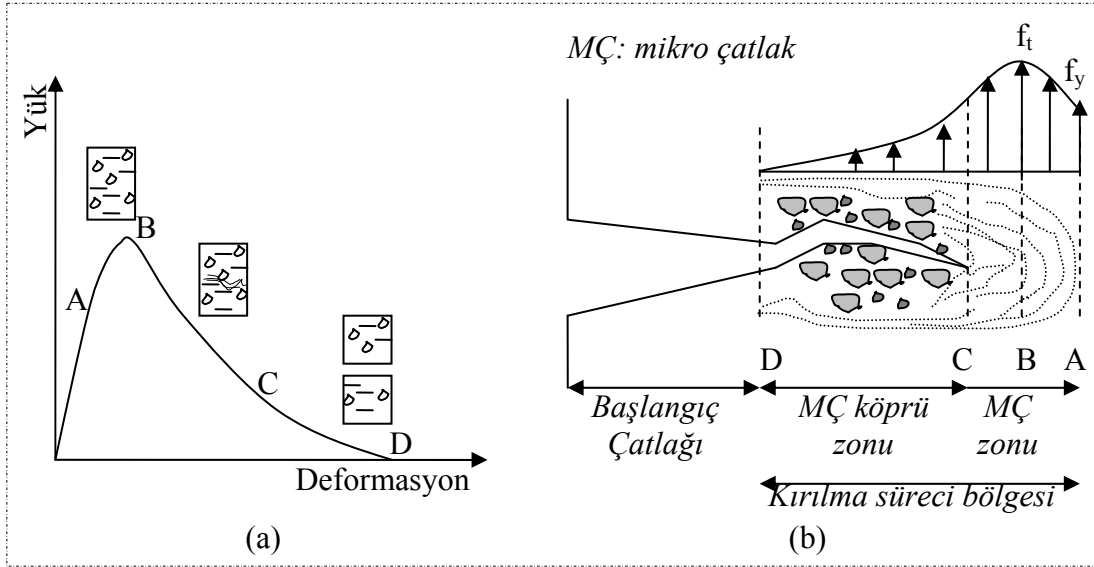
### 3.1 Non-linear Elastik Kırılma Mekaniği

Agregaların, hamurun, ara yüzey ve boşlukların oluşturduğu beton heterojen yapıda bir malzemedir. Betonda çatlak ilerlerken, çatlağın önünde enerji sönümleyici inelastik bir bölge mevcuttur. Bu bölgede çatlağın ilerleyişini sağlarken aynı zamanda enerji harcayarak yarı gevrek kırılmayı sağlar. Bu bölgede oluşan mikro çatlaklar, bölgenin agrega veya lif yapısına göre körelebilir, ikizlenebilir yahut köprülenebilir. Sonuçta bu enerji tüketimleri betonun toklaşma mekanizmasını oluşturur ve lineer yöntemler ile açıklanamayacak yapıdadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Bazı toklaşma mekanizmaları; mikro çatlak bölgesi (a), çatlak yüzeylerin sürtünmesi (b), çatlak ikizlenmesi (c), çatlak sapması (d), agrega köprülemesi (e), boşlukta çatlak körelmesi (f) (Shah ve ark., 1995'ten esinlenerek çizilmiştir).

Çatlak doğrultusundaki mikro çatlak bölgesinin etkisi dahil edilmezse çatlak ucundan itibaren artan gerilme, kırılma gelişme bölgesinin sonunda maksimum değerine (çekme dayanımı,  $f_t$ ) ulaşır. Eğer çatlak gelişim bölgesinde mikro çatlak etkisi dikkate alınacak olursa çatlak ucundan itibaren artan normal çekme gerilmesi gelişim bölgesinde maksimum değerine (çekme dayanımı,  $f_t$ ) ulaşır ve ardından gelişme bölgesinin sonunda bir miktar azalarak orantılık sınırını ( $f_y$ ) oluşturur. Bu mekanizma çekme gerilmesi – birim deformasyon eğrisinin yükseliş kısmında lineerlikten sapan bölgede mikro çatlakların büyüyerek yayılmasıyla kendini belli eder (Şekil 3.4).

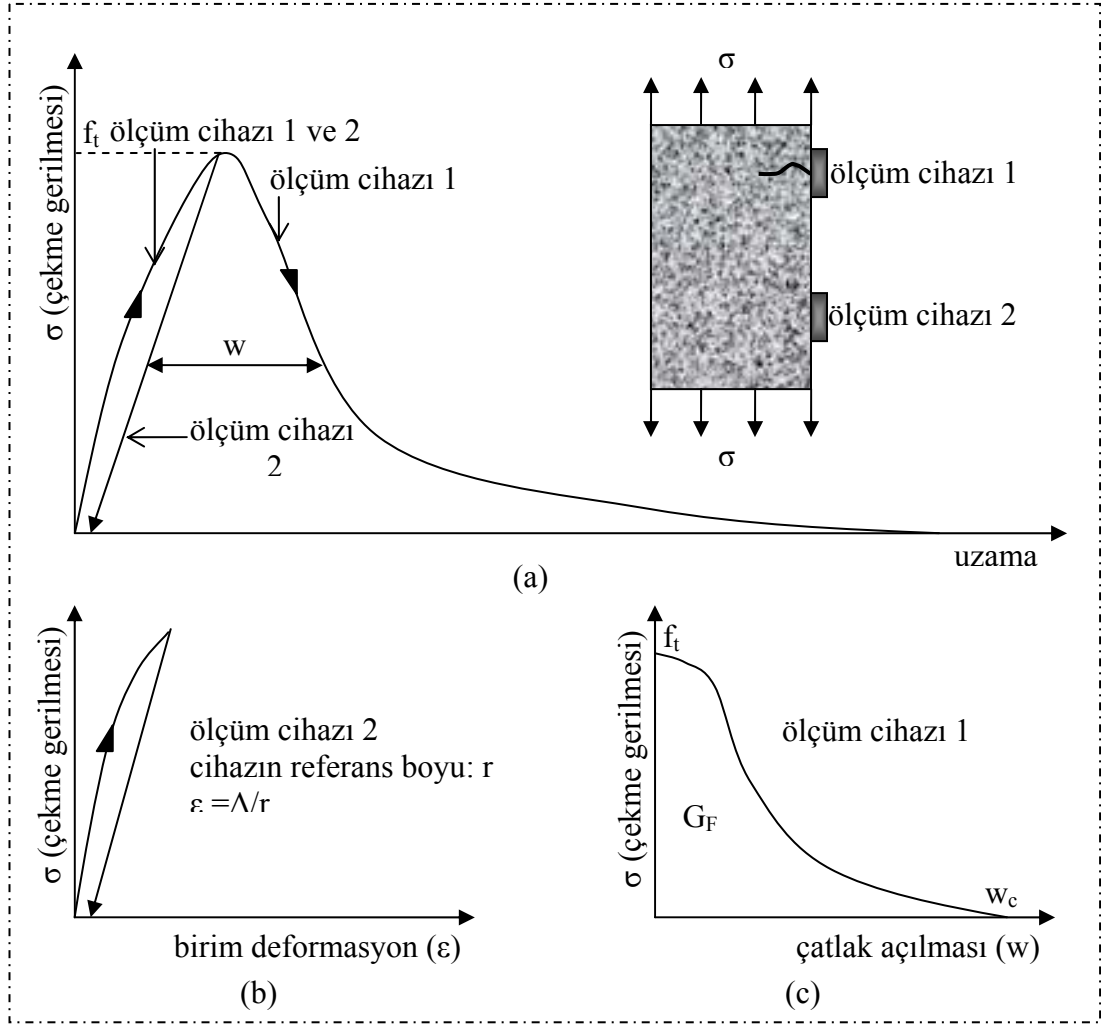


Şekil 3.4 Çekmede yük – deformasyon eğrisi (a), kırılma süreci bölgesi (b) (Shah ve ark., 1995'ten esinlenerek çizilmiştir).

Irwin (1957)'in betonun kırılma gelişimi bölgesi betonun non-linear davranışının açıklanmasında önemlidir. Şekil 3.4'te tek eksenli çekmeye maruz bırakılan bir numunenin yük – deformasyon eğrisi görülmektedir. İlerleme mekanizması ana (makro) çatlakların yakınındaki agregayı çevreleyen matrisin düşük mertebelerde mikro çatlaklaşması ile başlar. Daha sonra agregayı çevreleyen geçiş bölgesi civarında yani zayıf bölgelerde daha büyük çatlaklar oluşur. Bu agrega etrafı çatlakları matris içerisinde mikro çatlaklarla birleşerek makro çatlakları oluşturur ve matrisin ilgili kısmı boyunca ilerler. Beton için bahsedilen kırılma bölgesinin uzunluğu fiktif çatlak modeli (FÇM) ile iyi biçimde karakterize edilebilmektedir.

### 3.1.1 Fiktif Çatlak Modeli (FÇM)

FÇM, betonun kırılma sürecinin tanımlanması için Hillerborg, Modeer ve Petersson tarafından 1976 yılında ortaya atılmıştır. Betonun kırılma enerjisi, şekil değiştirme yumuşaması kavramına dayanmaktadır (Yardımcı, 2008). Hillerborg ve ark. (1976) tarafından geliştirilen bu model, çekme gerilmeleri altındaki bir numunede anlamak daha kolay olacaktır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 FÇM'nin temel prensibi (a): İnce bir beton plakta çekme gerilmesi – uzama ilişkisi, (b): Çatlamamış kesitte gerilme – birim deformasyon eğrisi, (c): Çatlamış kesitte gerilme – uzama ilişkisi (Şekil Shah ve ark., 1995'ten esinlenerek çizilmiştir).

Şekil 3.5-a'da gösterildiği gibi 1. ve 2. ölçüm cihazı numune çatlayana yani maksimum gerilmeye kadar aynı uzama değerlerini gösterir. Ardından numune çatlar ve çatlak bölgesinde olan 1. ölçüm cihazının okuduğu uzama artarken (Şekil 3.5-c), 2. ölçüm cihazının olduğu çatlamamış bölgede yük boşalması gözlenir (Şekil 3.5-b).

FÇM'de gerilme – çatlak açılması eğrisinin altındaki alan kırılma enerjisi olarak ( $G_F$ ) olarak adlandırılır. Bu alan çatlak bölgesindeki birim alanda sönmölenen enerjiyi temsil eder. FÇM'de yumuşama gerilmesi – çatlak açılması  $\sigma(w)$  eğrisi, geometri ve boyuttan bağımsız bir malzeme özelliği olarak kabul edilir. FÇM'de kırılma-gelişme bölgesinin uzunluğu ise “karakteristik boy,  $l_{ch}$ ” denilen bir parametre

ile belirlenmektedir. Karakteristik boy bir malzeme özelliğidir ve kırılma-gelişme bölgesinin uzunluğu ile orantılıdır. Karakteristik boy parametresi elastisite modülü ( $E$ ) ve kırılma enerjisi  $G_F$  ile doğru, malzemenin doğrudan çekme dayanımının ( $f_t$ ) karesi ile ters orantılıdır (Yardımcı, 2008).  $G_F$  ve  $l_{ch}$  aşağıdaki denklem 3.2 ve 3.3 ile ifade edilmektedir.

$$G_F = \int_0^{w_c} \sigma(w) dw \quad (3.2)$$

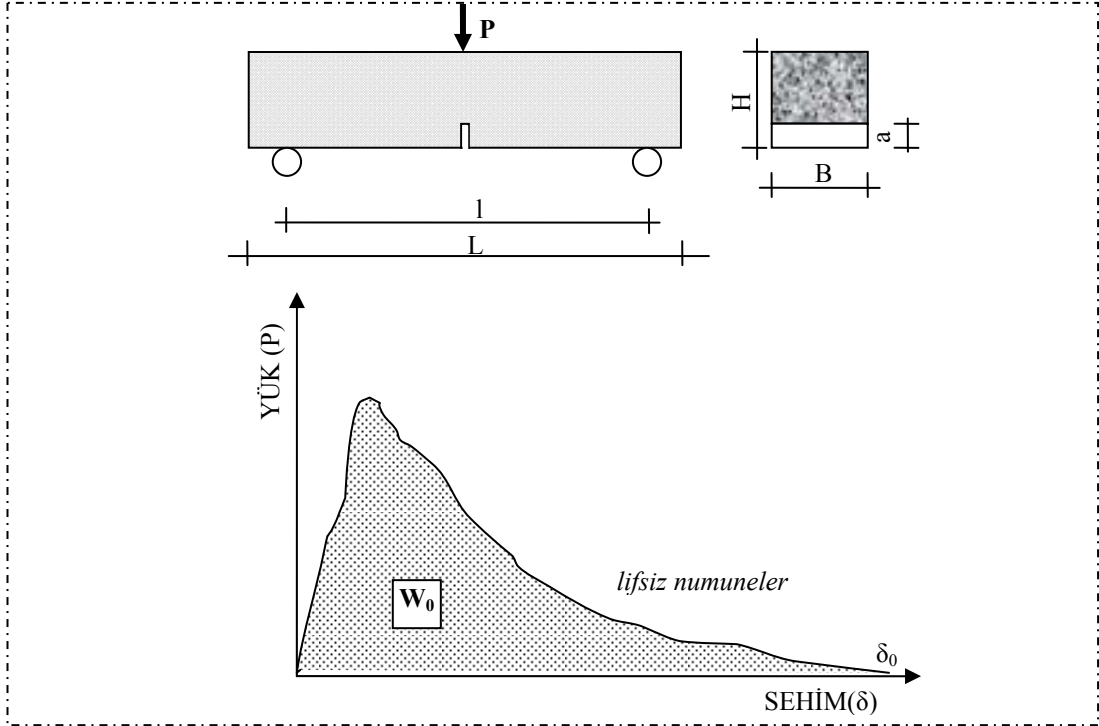
$$l_{ch} = \frac{E \cdot G_F}{f_t^2} \quad (3.3)$$

İfadede  $w_c$ , yumuşama gerilmesi sıfıra indiğinde okunan kritik çatlak açılması değeridir.

Karakteristik boy, gevrek malzemelerin tipik bir örneği olan camda 10-6 mm, ve yine gevrek bir malzeme olan sertleşmiş çimento hamurunda 5 – 15 mm, buna karşın yarı-gevrek bir malzeme olan normal betonda ise 200 – 500 mm değerindedir (Bayramov, 2004; Löfgren, 2005). Görüldüğü gibi gevreklikten yarı-gevrekliğe geçildikçe kırılma-gelişme bölgesinin uzunluğu hakkında fikir veren karakteristik boy parametresi de artmaktadır. Petersson (1980), kırılma enerjisinin belirlenmesi için RILEM 50-FMC 1985'te tarif edilen çentikli kiriş örnekler üzerinde üç noktalı eğilme deneyinin kullanılmasını önermiştir (Yardımcı, 2008).

### 3.2 Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi

Kırılma enerjisi çatlak doğrultusuna paralel bir düzlemde birim alanda bir çatlak oluşturmak için harcanan enerji olarak tarif edilebilir ve yarı gevrek bir malzeme olan beton için çentikli kiriş numunelerde üç noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilerek belirlenebilir (RILEM 50-FMC, 1985). Örnek iki parçaya ayrılan kadar süren deneyden elde edilen eş zamanlı yük – sehim eğrisinin altındaki alan tespit edilir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 RILEM 50-FMC (1985)'ye göre çentikli beton kirişlerde üç noktalı eğilme deneyi ile yük – sehım eğrisinin bulunması.

Denklem 3.4'te;  $W_0$  yük – sehım eğrisindeki alt alanı,  $m$  numunenin kütlesini,  $l$  mesnetler arası mesafeyi,  $L$  numune uzunluğunu,  $g$  yerçekimi ivmesini ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $\delta_0$  kaydedilen son sehimi,  $B$  kiriş enini,  $H$  kiriş yüksekliğini ve  $a$  ise çentik derinliğini belirtmektedir. Kırılma enerjisi ( $G_f$ ), Joule/m<sup>2</sup> veya sıklıkla N/m olarak ifade edilir.

$$G_f = \frac{W_0 + m \frac{l}{L} g \delta_0}{B(H - a)} \quad (3.4)$$

İfadeden görülebileceği üzere kırılma sürecinin yaptığı iş ile numune ağırlığının sehımden dolayı yaptığı iş toplanım eğilmeye çalışan aktif alana bölünmektedir.

Kırılma enerjisi malzemelerin kırılma süreci ile ilgili bir kırılma parametresidir. Ancak, RILEM 50-FMC'ye göre belirlenen kırılma enerjisi kiriş yüksekliğinin artmasıyla artış, çentik derinliğinin artmasıyla da azalma gösterir. Bu nedenle kırılma enerjisi örnek geometrisine bağlıdır ve bir malzeme sabiti olarak kabul edilmez (Yardımcı, 2008).



### 3.3 Betonun Kırılma Parametrelerini Etkileyen Faktörler

Betonun homojen olmayan içyapısı içerisinde ilerleyen bir çatlak agrega, lif, boşluk, kusur, mikro çatlak gibi bölgelerden dolanarak yada yarararak geçmektedir. Bundan dolayı beton içyapısını değiştiren her türlü etkinin kırılma parametreleri üzerinde baskın yada az etkisi vardır.

Tablo 3.1, Yardımcı (2008)'nın kırılma mekaniği üzerine yaptığı literatür araştırmalarından derlemiş önemli etkileri göstermektedir. Buradaki etkilerin deneysel değişkenler ve betonun özelliklerine göre değişebileceği göz ardı edilmemelidir. Ancak genel olarak çatlağın agregaların etrafını dolanması, çoklu çatlak mekanizmasına dönüşmesi yani çatlak yolunu uzatan etmenlerin kırılma enerjisini arttıracığı görülmektedir. Ayrıca matris – agrega ara yüzeyi geliştikçe çatlakların agregayı yarıp geçmemesi için yüksek dayanımlı agregaların kullanılması ve çatlağın ara yüzeyden ilerlemesinin sağlanması kırılma parametreleri açısından faydalı olacaktır. Lif – matris aderansı arttıkça liflerin sıyrılması zorlaşacaktır ve çatlağın ilerlemesi için gereken enerji artacaktır. Ara yüzeyin geliştirilmesinde ince öğütülmüş yüksek puzolanik özellikli katkıları faydalı gibi görülmektedir. Ancak lif – matris aderansının aşırı artıp, sıyrılma davranışını liflerin kırılma davranışına dönüştürmesi dayanımları arttırıcı etki yapabilirse de sünek davranışı kötü etkileyebilir. Dolayısıyla kırılma parametrelerinin optimizasyonuna yönelik matris – lif – agrega etkileşimlerinin iyi biçimde anlaşılması gerekmektedir.

Tablo 3.1 Betonun kırılma parametrelerini etkileyen faktörler ve etki (Yardımcı, 2008)

Faktör	Etki
S/Ç oranı	S/Ç arttıkça kırılma enerjisinin agregaya özelliklerine bağlı olarak artıp azalabilir. Karakteristik boy ise artmaktadır. Basınç dayanımının artışıyla karakteristik boy azalmaktadır. (Darwin ve ark., 2001; Bayramov, 2004; Zhou ve ark., 1995).
Agrega	Maksimum agregaya çapındaki artışla kırılma enerjisi ve karakteristik boy artmaktadır. Ayrıca yüksek dayanımlı agregaların çatlak yolunu uzattığı söylenebilir. Ayrıca agregaya yüzey şekli de etkili bir parametredir. (Chen ve Liu, 2004; Mihashi ve ark., 1991; Wittmann, 2002; Bayramov, 2004; Taşdemir ve Karihaloo, 2001).
Agrega – matris ara yüzeyi	Ara yüzey dayanımı geliştikçe çatlaklar zayıf agregayı dolandıktan kırıp geçmektedir ve kırılma enerjisi ile karakteristik boy azalmaktadır. Matris dayanımı sabitken agregaya rijitliği arttıkça çatlaklar agregaya etrafından dolandığından kırılma parametreleri süneleşmektedir (Yardımcı, 2008).
Mineral katkıları	Silika dumanı gibi agregaya – matris ara yüzeyini güçlendirici etkisi olan mineral katkıları çatlakların agregayı dolandıktan, kırıp geçmesine sebep olabilmekte ve kırılma enerjisi ile karakteristik boy azalmaktadır. İnce öğütülmüş ve puzolanik bağlayıcılık özellikli mineral katkıların lif – matris ara yüzeyini güçlendirerek kırılma parametrelerini iyileştireceği söylenebilir (Bentur ve ark., 1995; Kayalı, 2004).

Donma – çözülme hasarı gibi çatlak artırıcı durabilite zorlamalarının betonun kırılma mekaniğine etkisi çok fazla araştırılmamış gibi gözükmektedir. Donma – çözülme hasarı gibi agregaya yüzeylerinin matrisle bağını zayıflatan etkenlerin düşük dayanımlı matris – yüksek dayanımlı agregaya içeren betonlar için kötü bir etki yapması beklenebilir. Ancak yüksek dayanımlı matris – düşük dayanımlı agregaya içeren betonlarda ara yüzeyin donma hasarı ile zayıflaması çatlak yolunu uzatıcı bir etki dahi yapabilir. Donma sonrasında çatlak gelişim bölgesinde oluşan mikro çatlakların matrisin kırılma parametrelerini etkileyeceğini söylemek yanlış olmayacaktır.

## **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 bağ 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 vd. 2002).

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 hidrasyonu için gereken su donduğunda prizinde durduğu gözlemlenebilir. Ani donmalarda bu olay tüm kütle için dayanım kazanmaması olarak yorumlanır. Bu nedenle  $-12^{\circ}\text{C}$ 'nin altında sıcaklıklarda betonun dayanım kazanmadığı kabul edilir (Baradan vd., 2002).

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 dizaynı yapılması
- Döküm araçlarının sıcak tutulması
- Priz hızlandırıcı, hava sürükleyici veya antifiriz etkisi yapan kimyasalların kullanılması.
- Kullanılan çimentonun tipinin, inceliğinin ve kimyasal bileşenlerinin uygun seçilmesi
- Dondayanıklı 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 doymun 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 genişiren suyun yarattığı gerilme beton çekme dayanımını aştığında harita görünümlü çatlaklar, parçalanmalar ve yüzeyde kabuk atmalar gözlemlenmektedir.

Beton içindeki suyun donması yavaş ilerleyen bir olaydır. Donma hızını, boşluk çapları ve niteliği, ısının transfer edilme hızı, beton içindeki suyun çözülebilir madde yoğunluğu etkilemektedir. Donma büyük boşluklardan küçük boşluklara doğru ilerlemektedir. Bunun sebebi küçük boşluklardaki yüzey geriliminin daha fazla olmasıdır (Baradan vd., 2002).

#### 4.2.1 Donma Mekanizması

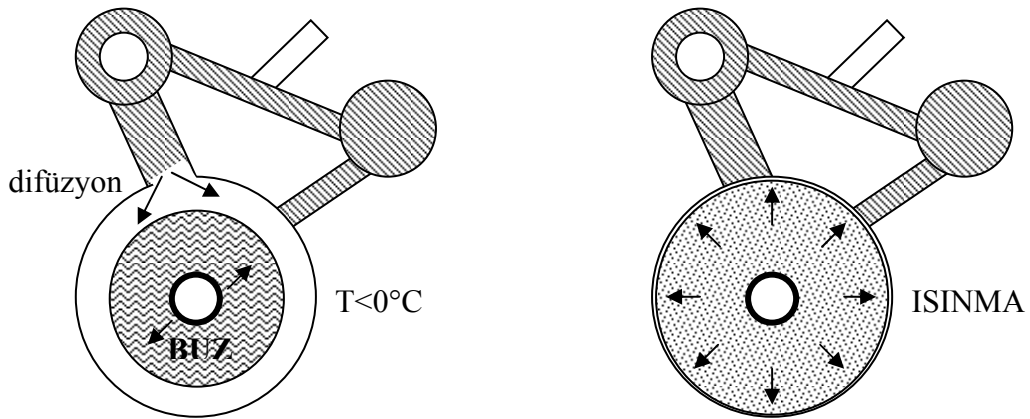
Powers (1965)'a göre yeterli su kürü uygulanmış ve yeterli havayı bünyesinde bulunduran betonda dahi tam anlamıyla donma dayanıklılığının olduğu söylenemez. Betondaki dağılmanın ana sebebi yalnızca buz basıncı değil, bu olgunun gelişmesine gerek kalmadan buz oluşurken olan genleşme ile itilen suyun yarattığı 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 “termodinamik dengede” olarak değerlendirilir. Eğer sıcaklık yeterince 0°C'nin altına düşerse buz kristal bir takım kapiler boşluk oluşturmaya başlamaktadır. Bu durum buzun sıvı haldeki suya göre daha düşük serbest enerjiye sahip olmasından dolayı termodinamik eşitliğin bozulması anlamına gelmektedir. Jel boşluklarında sıvı halde bulunan su, buz kristali oluşmaya başladığı kapiler boşluklara doğru hareket ettiren bir potansiyel enerji kazanır. Bu su kapiler boşluklara vardığında donar ve buz kristali büyür. Bu buz kütlesi matris içindeki pastanın duvarlarına karşı bir basınç uygular ve bu basınç çok büyükse kalıcı hasar yaratır. Bunun sebebi boşlukların yeterli derecede genişleyememesidir. Hava sürükleyiciler kullanılarak oluşturulan sürüklenmiş hava kabarcıkları, büyüyen buz kristali için alternatif yuvalar oluşturur. Bu sürüklenmiş kabarcıklar, geniş boşluklarda oluşan buza karşı mücadele eder. Donma boyunca boşluk suyu bu alternatif alanlara çekilir. Bunun sebebi sürüklenmiş hava kabarcığı içindeki buzun daha düşük kimyasal potansiyele sahip olmasıdır. Bu olay, geniş boşluklardaki büyümeyi düşürücü ve şişmeyi azaltıcı etkiye sahiptir (Schulson, 1998; Çopuroğlu, 2006).

Ancak bu teori boşluklar içindeki sıvıyı saf su kabul etmiş ve çözülmüş kimyasalları dikkate almamıştır. Daha sonra Powers ve Helmuth hipotezlerini modifiye etmiştir ve bu yeni teori “osmotik basınç teorisi” olarak adlandırıldı. Farklı

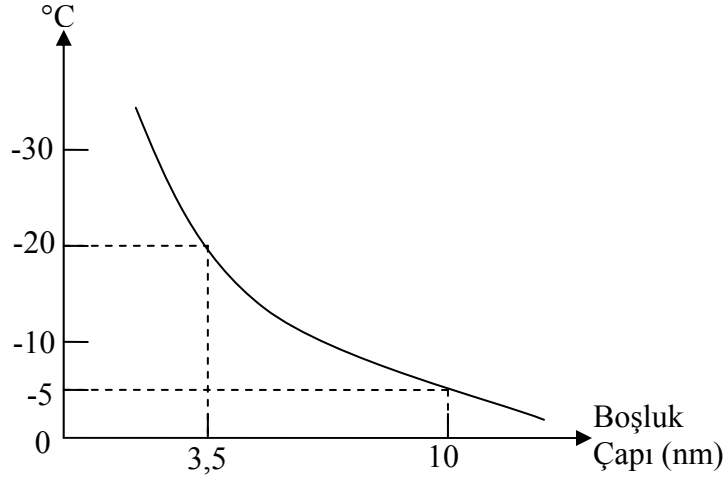
çözülebilirlerin varlığı (örneğin alkaliler ve klorürler) donma noktasını düşürür. Bu olay, saf su ile dolu bir boşluğun tümünden donduğu bir sıcaklıkta çözelti ile dolu aynı bir boşluğun kısmen donması anlamına gelmektedir. Buradan şu sonuç çıkarılabilir; saf buz barındıran bir oyuk, çözülebilir artmış bir çözelti ile dengededir. Böylelikle buralardaki konsantrasyon, buzun henüz oluşmadığı daha küçük boşluklardaki konsantrasyondan farklı olacaktır. Bu, küçük boşluklardaki suyu daha büyük boşluklara difüze ettiren bir osmotik basınç oluşturmaktadır. Böylelikle buz oluşumunu ilerletecek su sağlanır. Osmotik basınç bağımsız bir mekanizma kabul edilemeyebilir fakat mikroskobik buz lens büyüme teorisini desteklemektedir (Hasholt, 2002; Çopuroğlu, 2006).

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/mm<sup>2</sup>) 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 Isınma Sırasında Buzun Genleşmesi (sağ).

Şekil 4.2'den de görülebileceği üzere çapı 10 nm mertebesindeki boşluklarda bulunan su  $-5^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar donmazken, çapı 3,5 nm mertebesindeki boşluklarda bulunan su  $-20^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar donmamaktadırlar (Mindess vd., 2002).



Şekil 4.2 Suyun Donmasında Boşluk Çapı-Donma Noktası İlişkisi.

### 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 dizaynına ve hava sürüklemeye dikkat edilmelidir. Geçirimsiz beton üretmek kritik doygunluğu önlemek anlamına da gelmektedir.

Doygun betonda donma-çözülme ile oluşacak parazit gerilmelere karşı betonda kullanılan en etkili önlemlerden birisi de hava sürükleyici kimyasalların kullanılmasıdır. Taze haldeyken betona sürüklenen milyonlarca ayrık ve birbirine çok yakın bu hava tanecikleri hasarı önlemeyi mümkün kılmaktadır. Bu boşluklar genellikle şeklen küresel ve nispeten küçük boyutlardadır. Bu kabarcıkların boyutları 0,08 ila 0,10 mm arası değişmektedir (Erdoğan, 1997).



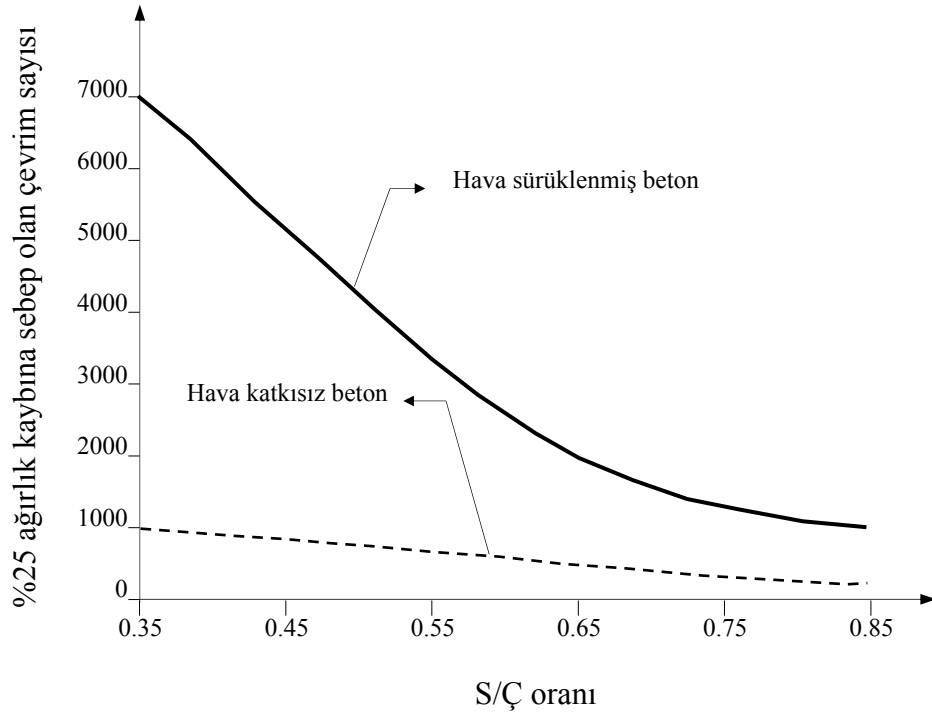
Hava sürüklenme etkisi hem klinkerin hava sürükleyici malzemeler barındıran alçı taşı ile öğütülmesiyle elde edilen (hava sürükleyici çimento) çimentolarla hem de betonun üretimi sırasında doğrudan katılan kimyasallarla sağlanabilmektedir. Çimentoların kullanımı daha az tercih edilmektedir. Bunun sebebi 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 hidrakarbon 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 4.3'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 vd., 2002). ACI 201R standartında donma-çözülmeye maruz kalacak betonların S/Ç oranının

0,5'i aşmaması ve 24 MPa dayanıma ulaştıktan sonra bu etkiye maruz kalması önerilmektedir (Baradan vd., 2002).



Şekil 4.3 Hava sürüklemenin ve S/Ç oranının donma-çözülmede ağırlık kaybına etkisi.

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 gibi çok akışkan betonlarda hava sürükleyici kullanılacaksa akışkanlaştırıcı dozajını bir miktar düşürmek gereklidir. Aksi takdirde segregasyon ve kuma gözlemlenebilmektedir.

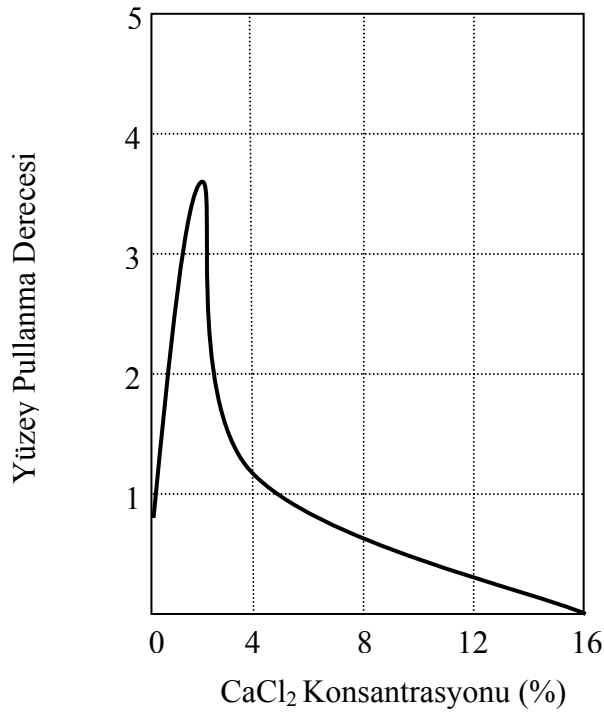
Hava sürükleyicilerin ana amacı donma - çözülme dayanıklılığını arttırmaktır. Fakat beton sertleştikten sonra matris içerisinde süreksizlikler olduğundan betonun basınç dayanımında bir miktar düşme görülmektedir. Bu değer her %1 sürüklenen hava için %5 basınç dayanımı kaybı mertebelerindedir.

#### 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, 2002).

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/m<sup>3</sup>'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.

Buz çözücü tuzlara karşı pullanma dayanıklılığı testi ASTM C 672-92 standartına göre yapılabilmektedir. Donma çevrimlerine mağruz kalan numuneler kalsiyum klorür solüsyonuyla kaplıdır. Ardından ağırlık kayıpları, görsel hasar ve dayanım kayıpları incelenebilmektedir.

#### 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. Mikro çatlaklar ile genişleyen hasar yelpazesi betonun sadece ağırlık kaybına değil aynı zamanda önemli dayanım kayıplarına sebep olabilmektedir. Beton yollar, kaldırımlar, köprü tabliyeleri, su getirme yapıları, kanaletler, menfezler hatta çok sert iklimli bölgelerde dış ortama temas eden tüm betonarme yapı kısımları donma-çözülme saldırılarına açıktır. Bu konuda beton malzemesinin dayanıklılığı yapının da dayanıklılığı anlamına gelmektedir. Standart test metotları veya bunlara paralel araştırmalar yapılarak ilgili yörelere uygun özellikte beton dizaynları yapılmalıdır.

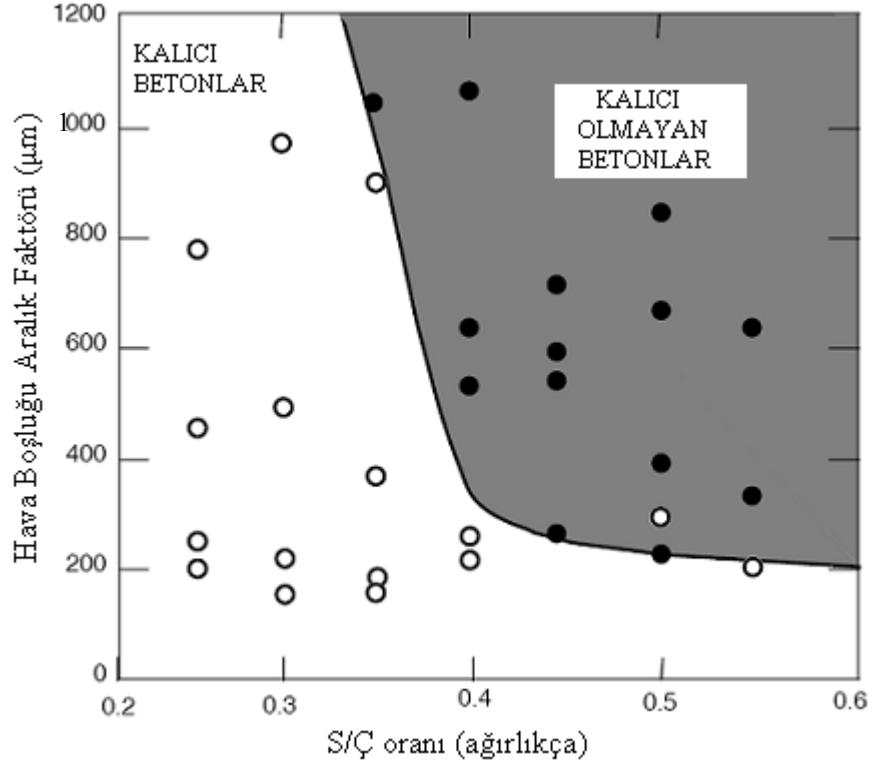
ASTM C-666 dinamik elastisite modülündeki düşüşleri, ASTM C-671 genleşme miktarlarını, ASTM C-672 ve İsveç standardı SS 13 72 44 buz çözücü tuzların varlığında yatay yüzeyde pullanmayı ölçmeyi tarif etmektedir (Pigeon ve Pleau, 1995).

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 vd., 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 Okada vd. (1981) 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 et al. 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).

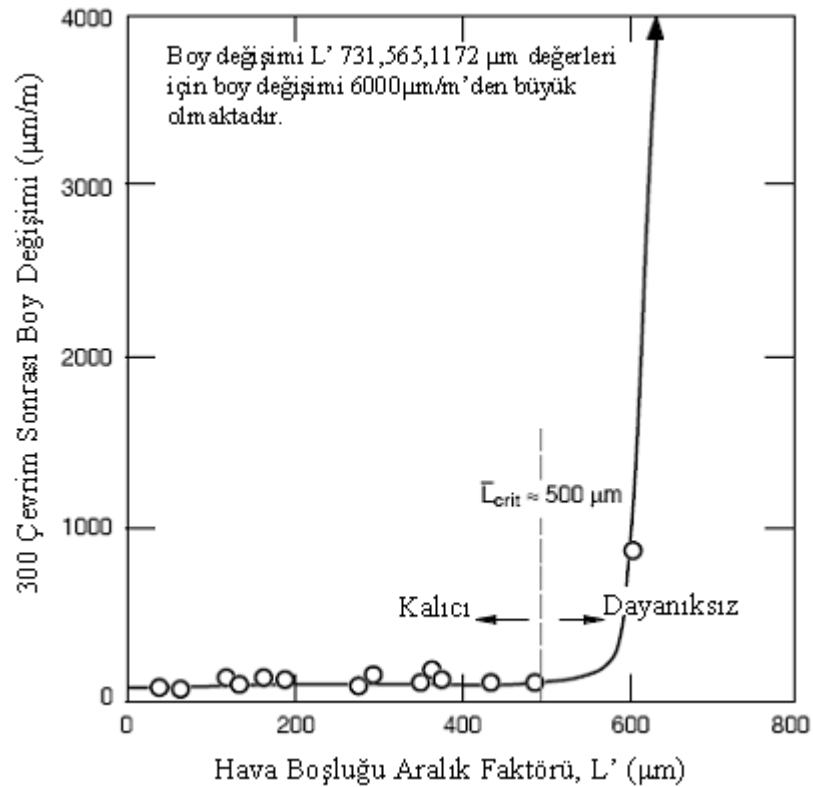


Şekil 4.5 Kritik hava boşluğu aralık faktörü – S/Ç oranı (Schulson, 1998).

#### 4.5.2 Sürüklenmiş Hava

Sürüklenmiş hava betonun donma-çözülme dayanıklılığını etkileyen diğer baskın faktördür. %5-7 arası havayı uygun dağılımla beton içerisine sürüklemekle hasar önemli derecede önlenmektedir (Powers, 1949; Pleau, 1995). Daha düşük değerlerdeki hava etkisiz kalmakta, daha yüksek değerler ise malzemeyi oldukça zayıflatmaktadır. Küresel şekilli bu boşlukların boyutu 1µm ila 1 mm arası olup genellikle 100µm aralıklı bir konsantrasyona sahiplerdir (Pigeon ve Pleau, 1995). Hava sürüklenme standart bir uygulama olarak soğuk iklimli bölgelerde kullanılmaktadır. Hava sürüklenme yüksek dayanımlı / performanslı betonlar için sürüncemede kalmış bir uygulama olsa da, düşük su / çimento oranı kullanmak malzeme dayanımını düşürmeden koruma sağlamak açısından etkili bir çözümdür. Uygun dağılımlı hava kabarcıkları sürüklenme işlemi halen düşük su/çimento oranları kullanılarak kalıcı betonlar yaratmaktan daha ucuz bir uygulamadır. Ancak bu çözüm dayanımın maliyetini arttırmaktadır.

Buz hasarına karşı dayanıklılık büyük oranda hava kabarcıkları arası mesafe ile ilgilidir. Şekil 4.6'da D-Ç çevrimleri sonucu artan boy ve hava boşlukları arasındaki mesafenin 300 D-Ç çevrimi sonucu ilişkisi gösterilmektedir. Pigeon vd. (1986) tarafından yapılan sistematik çalışmada bir tür kaba agrega, bir tür ince agrega, 0,5 S/Ç oranı, bir kür prosedürü kullanılmıştır. Çevrimler ASTM C-666 (A) prosedürüne uygun olarak 5 ve -18 °C arasında 8°C/saat hızı ile yapılmıştır. Sonuç olarak 500 µm ortalama kabarcık aralığına kadar betonların durabil olduğu saptanmıştır. Diğer bir çalışma da benzer sonucu vermiştir. Durabiliteden-dayanıksızlığa geçiş  $L_c$  kritik boşluk faktörü ile belirtilmiştir (Pigeon ve Pleau, 1995). Beton dizaynında önerilen  $L_c$  değeri 200 ila 250 µm olarak Powers (1949) ve Backstrom vd. (1958) tarafından yeniden değerlendirilmiştir. Boşlukların ortalama boyutu yüzey alanı cinsinden  $230 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  civarında saptanmıştır (Thorpe, 1996). Bu saptamalar kaba şekilde  $250 \times 10^3$  kabarcık/ $\text{cm}^3$  olarak çevrilebilir (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; Gjørvd., 1978; Mather, 1978). Başka bir çözümlenme de Litvan (1983)'in çalışmasındaki fikir olabilir. Litvan, orta boyuttaki (0,35 ila 2 µm) yani en geniş kapiler boşluklarla eşdeğer olan bu boşlukların hava sürüklenmiş betonda yalın betondan daha fazla olduğunu belirtmiştir.

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

#### **4.5.3 Doygunluk Derecesi**

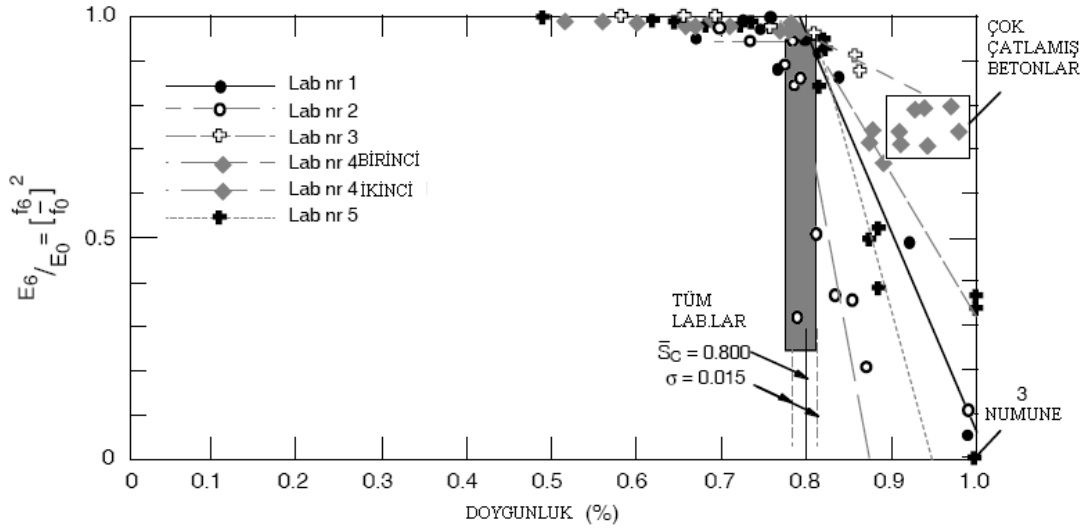
Laboratuvar çalışmalarında genellikle numuneler çevrime başlamadan önce tam doygun hale getirilmektedir. Arazide bu durum mevcut olmayabilir. Suyun varlığı, atmosfer nemi, su emme veya temas koşulları etkenleri mevcuttur. Kısaca pratikte beton daha az doygun bulunabilmektedir. Örneğin beton kaldırımların doygunluğu bir ülkede 0,8-0,95 arasındadır (Vanderhorst ve Jahnsen, 1990). Doygun olmayan betonlarda hava sürüklenmese 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. Doygunluğu derecesi "S"; donma sürecinde olan malzemenin içerdiği toplam buharlaşabilen su (jel suları dahil) ağırlılığının, 50°C'de etüv kurusundan tam doygun yapılmış numunelerin vakum altında belirlenen ve koşuldan koşula sabit olan buharlaşabilir su ağırlılığına 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 ( $S_c$ ) 0,80'ler mertebesinde olduğunu belirtmiştir (Şekil 4.7) (Schulson, 1998; Çopuroğlu, 2006).

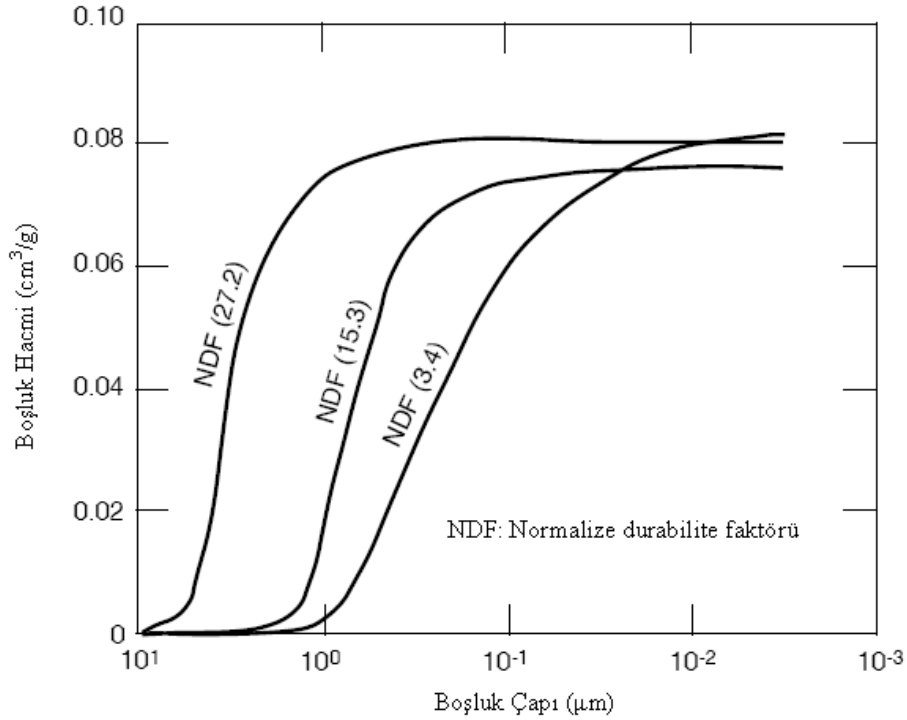


Şekil 4.7 Beş farklı laboratuvar da ölçülmüş donmadaki numunenin doygunluğuna karşı dinamik elastisite modülündeki (normalize) Düşüş (Fagerlund, 1977).

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 doymun 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 Agrega

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 agrega kullanımının sorun yaratmadığı ve daha stabil betonlara olanak verdiği gözlemlenmiştir. Aynı çalışmalarda kaba agrega 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 agrega tipiyle beton hazırlayıp ASTM C-666 (A) prosedürüne göre test ettiği çalışma gösterilebilir. Bu çalışmada belirli bir agrega boşluk hacminde, agrega boşluk sistemindeki kaba boşlukların artışıyla betonların durabilitesi arttığı saptanmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Agrega 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 hidratasyon 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 hidratasyon 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 hidratasyonunu yavaşlatıcı ve hidratasyon ısını 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 (Tyler vd., 1951; Marchand vd., 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 ( $S/\zeta=0,5$ ) havada hızlı 300 adet donma - çözülme uygulamıştır (5 ila  $-18$  °C arasında). Buz hasarına direnç, donma hızının artmasıyla düşme eğilimindedir. Benzer şekilde Nischer (1976) 0,45 ve 0,75  $S/\zeta$ 'ye sahip iki beton türünde soğutma hızının 2,4'ten 4,2 °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 vd. (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 değışle tüm kinetiklerin bu açıdan etkisi vardır.

#### **4.5.8 Donmada Bekletilme Süresi**

Bu faktör ile ilgili az çalışma mevcuttur. Stark (1989) 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 etkindir. Bu tip betonlarda hidrasyonun erken safhalarında sıcaklık 80-90 °C'ye çıkabilmektedir (Sellevold vd., 1994). Yapılan çalışmalara bakıldığında yüksek kür sıcaklığının daha düşük donma-çözülme dayanıklılığına sebep olduğu görülmektedir (Schulson, 1998). Örneğin suya doymuş 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 (Jacobsen ve Sellevold, 1993). 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. Civa 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 vd., 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 Alkaliler**

Alkaliler çözünebilir safsızlıklar olarak çimentoda mevcuttur. Alkaliler hava boşluk sistemini stabilize etmektedirler (Pigeon vd.,1992; Pistilli vd.,1983) ve belki de buz hasarına karşı olumlu bir etki yaratmaları beklenmektedir. Diğer yandan, termodinamik modele göre buz – su ara yüzeyine kümelenen alkalilerin negatif etki yapabileceği ve çatlak gelişimine katkıda bulunabileceği söylenmektedir (Schulson, 1998). Etkileri tam olarak belirlenmiş değildir.

#### **4.5.12 Viskozite Arttırıcı Katkılar**

Nişasta, sakız, bitki proteini ve diğer doğal polimerler betonun kohezifliğini arttırmak ve taşıma, yerleştirme, sıkıştırma işlemlerinde ayrışmasını önlemek amaçlı kullanılmaktadır (İzumi, 1990). Hidroksipropil metiselülozun, welan gum'ın (doğal bir polisakkarit) buz hasarında etki sahibi olduğu (S/Ç=0,32, 0,40, 0,45) yapılan deneyler sonucu (ASTM C-666 ve ASTM-C672) gözlemlenmiştir. Diğer aynı tür katkıların muhtemelen daha iyi davrandığı söylenebilir (Schulson, 1998). Tek şart uygun ( $L_c=250\mu\text{m}$ ) hava boşluğu sisteminin korunmasıdır (Khayat, 1995). Aksi takdirde dayanıklılık düşmektedir (Fukudome vd., 1992).

#### **4.5.13 Lateks Katkısı**

Lateks (bitki öz suyu-kauçuk ham maddesi), taze betonun akışkanlığını belirgin derecede arttırarak içsel mikro çatlakları ve yüzey pullanmasını azaltmaktadır (Bishara,1979). Bordeleau vd. (1993) bu etkiyi üç farklı S/Ç'ya sahip (0,30, 0,35, 0,40) beton üzerinde %0, %7,5 ve %15 (çimento ağırlığınca) sitrin bütadien

kullanarak gözlemlenmişlerdir. Örnekler üç gün su küründen sonra, ASTM C-672'ye göre %2,5 NaCl çözeltisinde 100 D-Ç çevrimine maruz bırakılmıştır. Pullanma derecesi, lateks katkısı arttıkça önemli derecede azalmıştır.

Lateks, hava kabarcıklarını stabilize etmekte ve boşluk sistemini inceltmektedir (Bordeleau vd., 1993). Örneğin Ohama vd. (1985), ortalama boşluk çapı (nm) / boşluk hacmi (cm<sup>3</sup>/g) oranının bir betonda sitrin bütadienin çimento ağırlığına 0'dan %9 ve %17'ye çıkartıldığında sırasıyla 100/1000'den 45/650 ve 15/480'e düştüğünü göstermiştir. Lateks ayrıca boşluk yüzeylerini kaplayarak ıslanma açılarını da düşürmektedir.

Lateks katkılı yüzey tabakası oluşturmak kaldırım ve köprü ayakları için pahalı bir yol olsa da servis ömrünü uzatmakta etkili bir yöntemdir (Schulson, 1998). Bunun dışında ülkemizde uygulaması çok yaygınlaşmamış bir yöntem olduğundan henüz kullanımda yer alamamaktadır.

#### **4.5.14 Örtücüler (Sızdırmazlık sağlayıcılar-sealants)**

Örtücüler buz hasarına karşı az da olsa olumlu etki yaratmakta gibi gözükmektedirler. Örneğin Litvan (1992) 8 tip harcı (çimento:kum=1:2) ve 57 farklı organik ve inorganik örtücüyü değerlendirmiştir. Örnekler NaCl emdirilmiş, kurutulmuş ve kaplanmışlardır. Ardından 300 D-Ç çevrimine (ASTM C-666 A metoduna göre) maruz bırakılmışlardır. Buz hasarları, çevrimler sonrası mevcut boy uzamalarıyla değerlendirilmiştir. %0,02 genişlemeye dayanarak, örtücülerin az ama tutarlı bir katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir. Sedran vd. (1993) ise oligomerik siloksan ve polimer siloksan'ın NaCl etkisi altında pullanmayı arttırdığını söylemektedir. Bu negatif sonuç için net bir sebep söylenememektedir fakat örtücülerin suyun girişini engellemelerinin yanında ayrıca numuneden su emdikleri düşünülmektedir (Schulson, 1998).

Wyner (1995), beton kaldırımlara buz hasarına karşı korumak amacıyla polimer reçinesini yüksek hava basıncıyla uygulayan bir yöntem geliştirmiştir. Yukarıda

verilen tutarsız etkilere bakıldığında bu uygulamaya şüpheyle yaklaşılması gerektiği söylenmektedir (Schulson, 1998).

#### **4.5.15 Mikro lifler**

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; Low vd., 1994). Lifler hem yük taşıyıcı hem de gerilme köprüleyici özellik taşımaktadır. 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  $\beta$ -CaO-SiO<sub>2</sub>) 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 $\mu$ m) neredeyse Portland çimentosu (S/Ç=0,35) betonunun eğilme dayanımı ikiye katladığını ve tokluğunu önemli derecede arttırdığını rapor etmiştir. Silika dumani 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 vd. (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 (Atiş ve Karahan, 2007; Nawy, 2001).

#### **4.5.16 Uygulanan Yük**

Beton servis ömrü boyunca yüklemeye maruzdur. Betonda hem D-Ç, hem de yük etkisi altında yapılan çok fazla çalışma mevcut değildir.

Zhou vd. (1994) nispeten kuru halde, silika dumanlı ve dumansız (çimento ağırlığının %10'u), hava sürüklenmiş ve sürüklenmemiş harç kırımlarına kırılma yüklerinin %50'si mertebesinde statik eğilme kuvveti uygulamıştır. Hızlı yapılan D-Ç çevrimlerinden sonra dinamik elastisite modülleri incelenmiştir. Hava sürüklenmiş harçlarda yük etkisinin olumsuzluğu hissedilmezken, hava sürüklenmemiş harçlarda hasar belirgin biçimde artmıştır. Hava sürüklenmemiş harçlardaki hasar silika ilavesiyle azalmıştır. Aslında bu etki hem silika dumanının davranışından hem de S/Ç oranının 0,35'ten 0,25'e düşmesinden kaynaklanmıştır. Daha sulu kıvamlı harçlarda (S/Ç=0,45) hava sürüklenmemiş serilerde silika dumanı hasarı bastırmada etkisiz kalmıştır. Hava sürüklendiğinde ön yüklemenin bir sorun olmaktan çıktığı gözlemlenmiştir.

Mu vd. (2002) D-Ç, yükleme, klorür saldırısı etkileşimini çelik lifli ve liffsiz betonlarda incelemiştir. Eşzamanlı uygulanan bu etkiler betonun bozulma sürecini belirgin biçimde hızlandırmıştır. Nispeten yüksek çelik lif dozajlarında (%1,5) üçlü etki hasarı belirgin biçimde düştüğü gözlemlenmiştir.

#### **4.5.17 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. Tüm bu etkiler Tablo 4.1'de sunulmuştur.

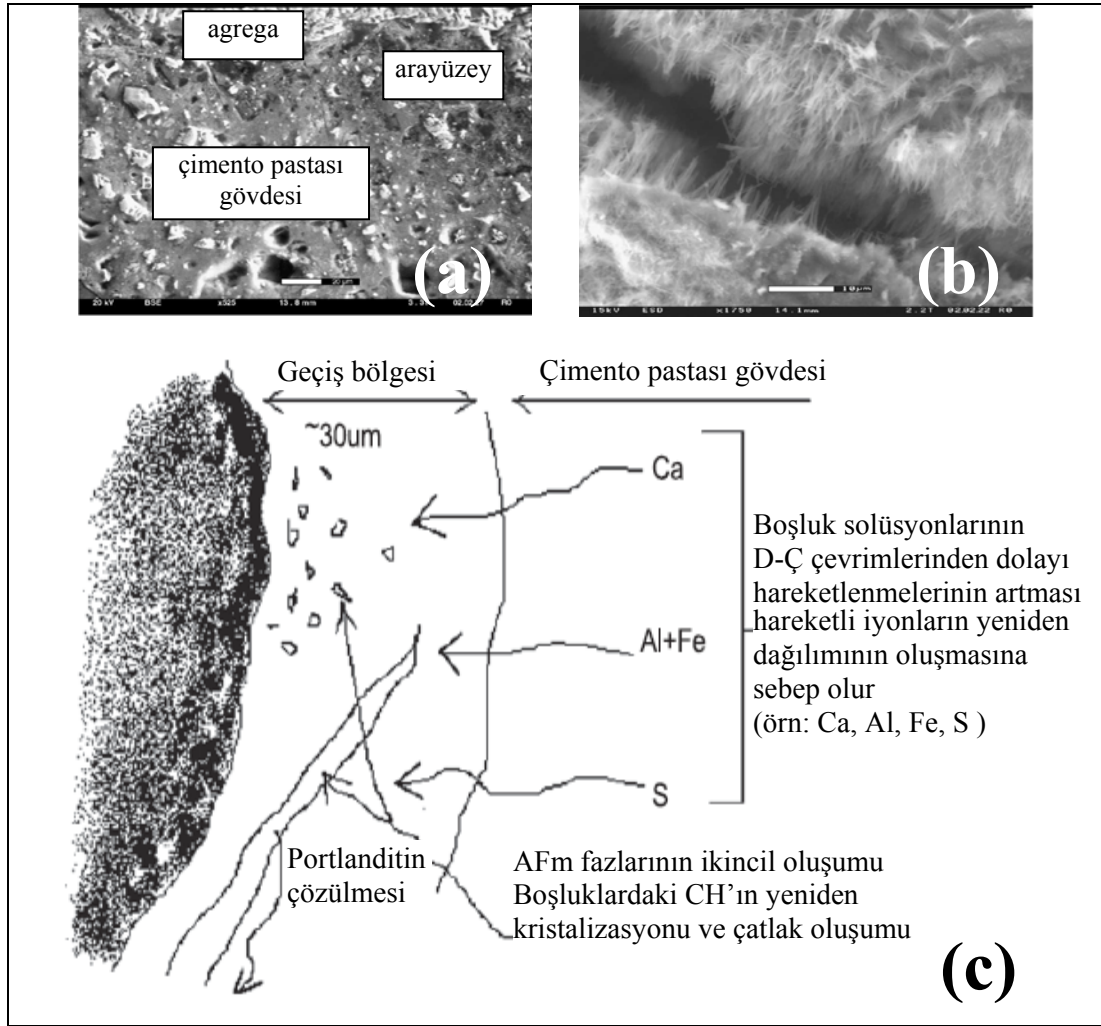
Tablo 4.1 D-Ç hasarını etkileyen faktörler

İçsel Faktörler	Dış Faktörler
S/Ç oranı (majör etki)	Doygunluk Derecesi (majör etki)
Sürüklenmiş Hava (majör etki)	Donma Hızı
Agrega	Minimum Sıcaklık
Çimento Tipi	Donmada Bekleme Süresi
Akışkanlaştırıcılar	Kür Sıcaklığı
Alkaliler	Örtücüler (sealants)
Viskozite Arttırıcı Kimyasallar	Uygulanan Yük
Lateks Katkısı	
Mikro-lifler	

#### 4.6 Donma Hasarının İyapı 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, iyapıda 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 incelemişlerdir. 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 oluştuğu 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 4.9).

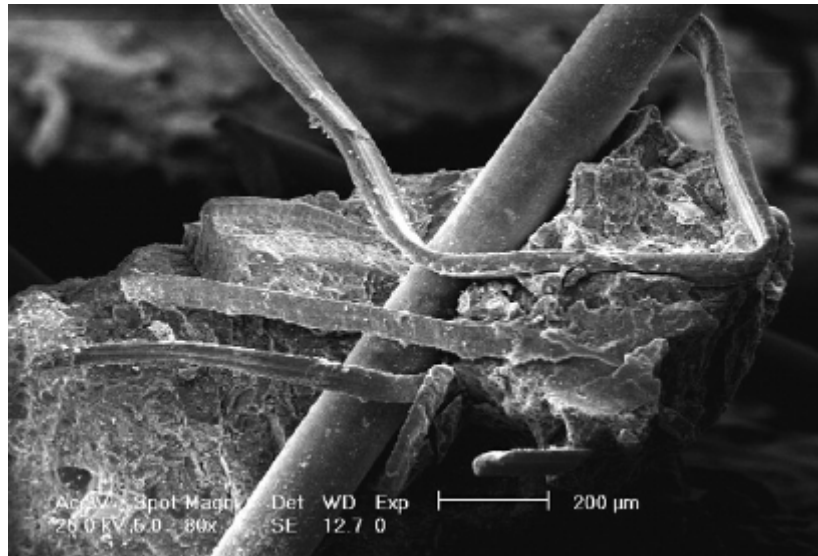


Şekil 4.9 Kapiler porozitenin yüksek olduğu 30 µm genişliğindeki çimento pastası – agrega arayüzeyi (a), 56 D-Ç çevrimi ve buz çözücü tuzların etkisindeki çatlakın iğnemsî etrenjit yapıyla dolması (b), geçiş bölgesinde D-Ç süresince oluşan hareketlilik (c) (Cwirzen ve Pentalla, 2004).

Jacobsen (1995)'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 hidrasyon ürünlerinin çeşitli yönlerden çatlakla 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.

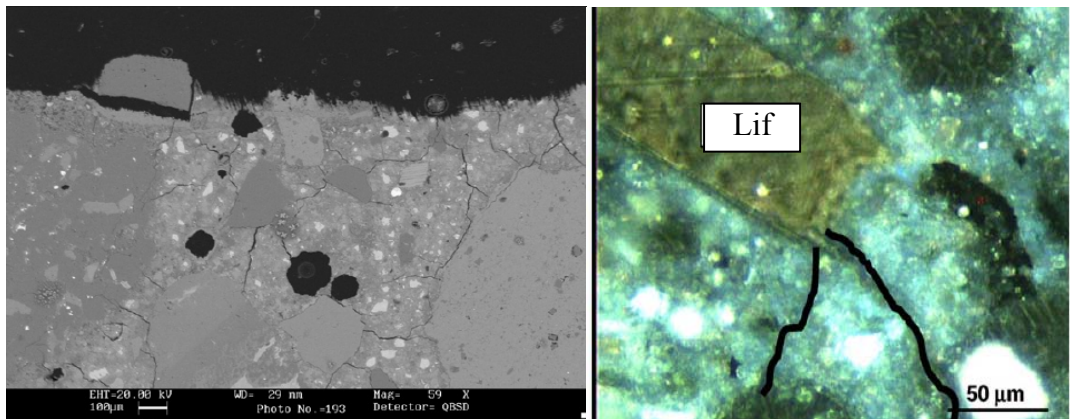
Parant vd. (2006)'nın geniş ölçekte lif takviyeli çimentolu kompozitlerin agresif çevresel etkiler ve servis yükü altındaki davranışını araştırdıkları çalışmada üç farklı uzunlukta çelik lif kullanılmış ve döşemelerin eğilme altında çoklu çatlak oluşumu ile sertleşme davranışı incelenmiştir. Beton döşemelere %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 4.10).



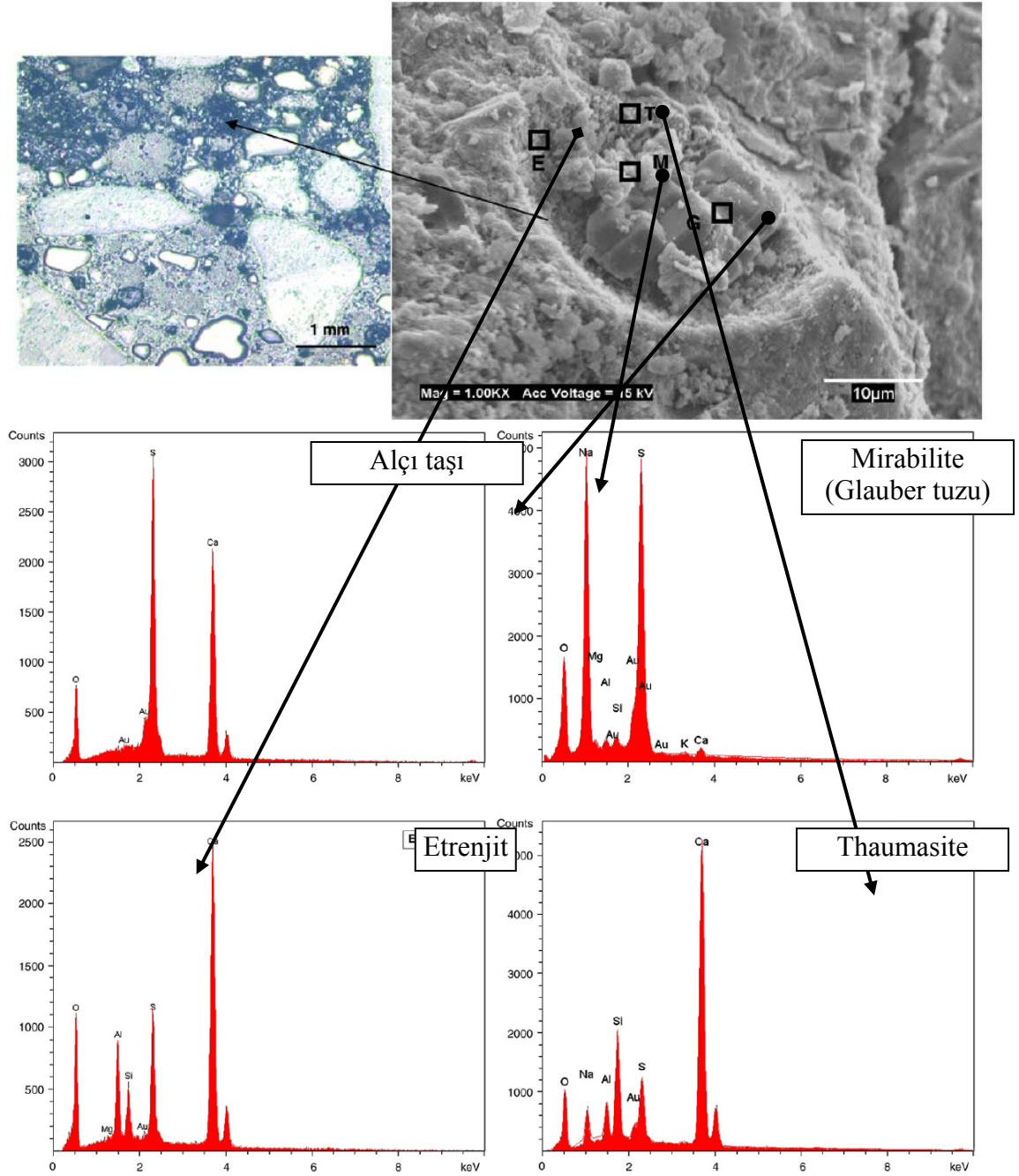
Şekil 4.10 Yüksek performanslı çelik lifli çimentolu kompozitte makro çelik lifin, mikro lifler arasına gömülerek yarattığı sinerji (Parant vd., 2006).

Bassuoni ve Nehdi (2008)'nin KYB'de sülfat etkisinin çevrimsel çevresel etkiler ve eğilme yüklemesi altındaki durabilite davranışını araştırdıkları çalışmada birçok SEM fotoğrafı çekilmiştir (Şekil 4.11). Hava sürüklemenin, çelik (30 kg/m<sup>3</sup>) ve

polipropilen ( $10 \text{ kg/m}^3$ ) 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 yapraklı yapıların bu boşluklara dolduğu görülmüştür (Şekil 4.12). Böylelikle hasarın düşürüldüğü belirtilmiştir. Çelik ve karbon liflerin harmanlanarak kullanılmasının KYB örneklerinin genleşmesini kısıtladığı ancak yüzeye yakın çelik liflerde oluşan korozyonun daha düşük ilk çatlak gerilmelerini provoke ettiği belirtilmiştir (Şekil 4.13). Bu sebepten servis ömrü sırasında, deneysel çalışmadaki gibi kombine etkiler altında bu tür betonun problem yaratabileceği vurgulanmıştır. Muazzam miktardaki tuz kristalizasyonu ile birleşen sülfat ürünlerinin hareketinin saldırıya açık yüzeylerde yarattığı genleşme eğilme yüklemeleriyle birleştiğinde, çekme gerilmelerini arttırdığı ve numunenin dağılmasına sebep olduğu rapor edilmiştir. Araştırmacılar sahadaki kombine etkileri de hesaba katan durabilite performansı tabanlı beton tasarım yöntemlerinin standartlara girmesini önermişlerdir.



Şekil 4.11 Çevrimsel sert koşulların yarattığı mikro çatlaklar (sol) ve liflerin çatlak karşılaşması (sağ) (Bassuoni ve Nehdi, 2008).



Şekil 4.12 Hava boşluklarının içine tuz kristallerinin (mirabilite) ve sülfat reaksiyonu ürünlerinin (etrenjit, alçı taşı, thaumasite) hareketi ve bu ürünlerin EDX (Energy Dispersive X-ray analysis) spektralleri (Bassuoni ve Nehdi, 2008).



Şekil 4.13 Eğilme yüklemesi yapılan örnekte (gerilme seviyesi %50) yüzeye yakın bölgede korozyona uğrayan çelik liflerin çatlak gelişi mine katkısı (Bassuoni ve Nehdi, 2008).

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.

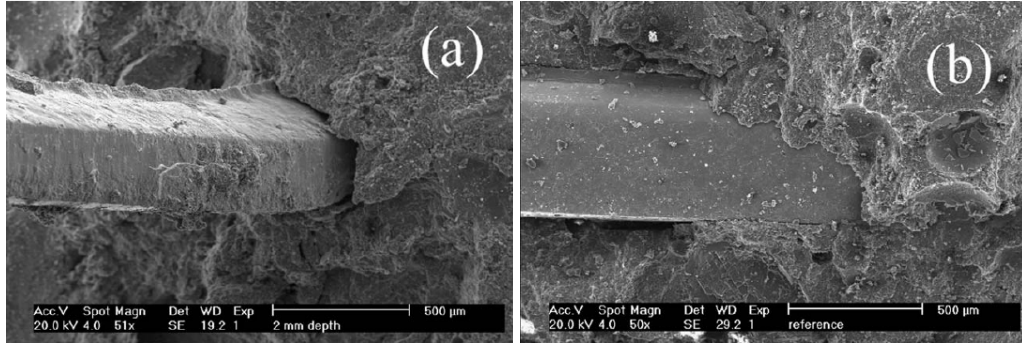
İçyapı incelemeleri büyük deneyim isteyen çok teknik incelemelerdir. D-Ç hasarı gibi net reaksiyon ürünleri yaratmayan bir durabilite sorununun elektron mikroskobu altında incelenmesi, numune hazırlanmasından alınacak fotoğraf karelerinin seçimine kadar tecrübe isteyen zor bir olaydır. Ancak görüldüğü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



#### 4.7 Kendiliğinden Yerleşen Betonun D-Ç Dayanıklılığı, Puzolanların ve Liflerin Etkisi

Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB), tasarım felsefelerinde yüksek akıcılıktaki hamurun akışkanlaştırıcılar kullanılarak düşük su içeriklerinde üretilmesini barındırırlar. Bu durum geleneksel betona göre D-Ç hasarına karşı bir avantajdır. Ayrıca vibrasyon ve yerleştirme işçiliklerinden kaynaklanan boşluklu yapının olmaması, daha sıkı mikro yapıyı beraberinde getirmektedir. Ayrıca geleneksel betona göre KYB'nin limitli iri agregaya içermesi, D-Ç hasarının agregaya – matris ara yüzeyinde gelişmesi ihtimalini düşürmektedir. Tüm bu özellikleriyle KYB'den aynı dayanımdaki geleneksel betona kıyasla az da olsa daha iyi D-Ç dayanıklılığı beklenebilir.

V. Corinaldesi ve G. Moriconi (2003) ince prekast elemanların üretiminde kullanılmak üzere hazırlanan KYÇLB karışımlarının durabilite performansını incelemişlerdir. Çalışmada çimento ağırlığının %10'u ağırlığında düz tip çelik lif (boy 11 mm, çap 0,4 mm) katılmıştır. S/Ç oranı 0,40, çimento  $500 \text{ kg/m}^3$ , taş tozu  $80 \text{ kg/m}^3$  ve lif  $50 \text{ kg/m}^3$  seçilmiştir. Çelik liflerin kullanımı ile KYB'de işlenebilirlik yeterli oranda sağlanmıştır. Çelik liflerin kuruma büzülmesini azalttığı ve 6 ay sonra  $500 \mu\text{m/m}$  düzeylerinde kaldığı görülmüştür. Bir hafta su kürü ve 3 hafta havada tutulan numuneler ardından %10 sodyum klorür çözeltisine atılmış ve 130 gün bekletilmiştir. 100 mm kenarlı kübik numunelerde klorun 8 mm ilerlediği saptanmıştır. Çelik liflerde korozyon olduğu SEM fotoğraflarıyla gösterilmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Beton yüzeyinden 2 mm içerdeki lifte oluşan korozyon (a) ve beton yüzeyinden 30 mm içerde klorun erişemediği lifin korozyonsuz hali (b) (V. Corinaldesi ve G. Moriconi 2003).

ASTM C666-b prosedürüne göre 90 günlük su kürünün ardından 300 D-Ç çevrimi uygulamıştır. Ağırlık ve dinamik elastisite modülü her 30 çevrimde bir ölçülmüştür ve rölatif dinamik elastisite modülü (RDM) ve ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Hasarın 200 çevrimden sonra oluştuğu ve 300 çevrim sonunda RDM'nin %50 azaldığı görülmüştür. Aynı şartlarda test edilen hidrofobik ajanlarla kaplanan betonun ise 300 çevrim sonunda %30 RDM kaybına uğradığı saptanmıştır. Ayrıca ağırlık kaybının %1,5 olduğu KYB hidrofobik katkıları kullanıldığında %0,6 ağırlık kaybına uğramıştır. Liflerin büzülme ve dolayısıyla çatlakları azalttığı, matrisin su ve klor girişi karşısında dirençli olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca KYB'nin D-Ç performansının iyi seviyelerde olduğu ve hidrofobik ajanların faydalı olduğu vurgulanmıştır.

Çelik liflerin kuruma büzülmesini azaltması oluşacak rötre çatlaklarını azaltacak ve D-Ç hasarına sebep olacak olan su girişini, geniş anlamda durabilite performansının düşüşüne sebep olacak kimyasal madde girişini azaltabilecektir. Beton büzülmesinde rastgele dağılmış ve büzülme paralel konuşlanmış lifler oluşan gerilmeyi sönmüleyecek ve artan lif içeriğiyle büzülme gerilmeleri daha da iyi biçimde karşılanacaktır (Atış ve Karahan, 2007; Nawy, 2001).

Atış ve Karahan (2007) uçucu kül ve çelik lif içeren betonun D-Ç dayanıklılığını araştırmıştır. Çelik liflerin az da olsa D-Ç dayanıklılığını arttırdığını rapor etmişlerdir. Mu vd. (2002) yükleme, D-Ç ve klor saldırısını aynı anda çelik lifli ve

lifsiz betona uygulamışlardır. Yüksek lif içeriklerinde (hacmen %1,5) üçlü hasar etkisi altında betonun belirgin şekilde daha iyi davrandığı ve hasarın azaldığı saptanmıştır.

Yazıcı (2008) silika dumanının ve yüksek oranda C sınıfı uçucu kül ikamesinin kendiliğinden yerleşen betonda mekanik, klor işleme ve D-Ç dayanıklılığına etkisini incelemiştir. Sonuç olarak 90 D-Ç çevrimi sonunda kül ve kül+silika dumanı ikamelerinin basınç dayanımlarının sadece çimentolu kontrol karışımlarından daha yüksek olduğu saptanmıştır. Gutierrez vd. (2005) puzolanların lifli harçlara etkisini araştırmışlardır. Çalışmada liflerin kapiler boşlukları arttırdığı ve bu yüzden klor geçirimsizliğinin arttığı görülmüştür.

Puzolanik katkıların dayanımlarının ve dolayısıyla durabilite özelliklerinin ilerleyen yaşlarda geliştiği bilinmektedir. Yapılan çalışmalar puzolanik katkıların işlenebilirliği iyileştirdiği, sünme ve büzülme kısıtladığını, özellikle yüksek fırın cürufunun inceliği ile basınç dayanımını geliştirdiğini ve durabilitenin artan kür süresiyle geliştiğini göstermektedir (Kim vd., 1996; Persson, 2003; Chang vd., 2001; Chang, 2004; Lawrence vd., 2005). Bu açıdan D-Ç çevrimlerine başlangıç yaşı tamamen farklı performansların sergilenmesine sebep olmaktadır. Ramezianpour ve Malhotra (1995) kürün basınç dayanımı, klor işleme direnci ve porozite üzerine etkilerini araştırmışlardır. Cüruf, uçucu kül ve silika dumanı ikameli matrisler hazırlanmıştır. Uçucu kül ve cüruf içeren karışımların kontrol karışımına (sadece çimentolu) göre kür süresine çok daha duyarlı olduğu saptanmıştır. Uçucu kül ve cüruf ikamesi arttıkça bu hassasiyetin arttığı rapor edilmiştir. Toutanji vd. (2004) yine farklı bağlayıcıların (silika dumanı, uçucu kül, cüruf ve kombinasyonları) kısa kür süresindeki dayanım ve dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Araştırmacılar puzolanik katkı için 14 gün kür süresinin D-Ç dayanıklılığı ve dayanım açısından yetersiz olduğunu ve kötü performansa sebep olduğunu saptamışlardır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikamesinin Portland çimentolu betona göre 28 günlük kür süresi sonrası D-Ç ve buz çözücü tuzlar altında kötü performans sergilediği (Afrani ve Rogers, 1994; Sakai vd., 2001; Copuroglu vd., 2004; Boyd, 1995; Chidiac ve Panesar, 2008) ancak bu durumun net sebebi konulamamakla birlikte büyü oranda yavaş

hidratasyonun yetersiz kür rejiminin bu duruma sebep olduğu bilinmektedir (Afrani ve Rogers, 1994; Sakai vd., 2001; Copuroglu vd, 2004).

Gai-Fei Peng vd. (2006), uçucu kül ve silika dumanlı 50 – 60 MPa basınç dayanımlı betonlara Çin standartına göre 300 çevrim uygulamışlardır. D-Ç çevrimleri sonucu civa porozimetresi ölçümlerine göre toplam boşluk hacmi ve boşluk boyutları puzolanlı serilerde dahi artmıştır. Basınç dayanımı ile D-Ç dayanıklılığının ilişkili olduğu, 0,32 su/bağlayıcı oranlarında puzolanlar uzun dönem dayanımını arttırsa da donma hasarından korunmak için hava sürükleyicilerin anahtar önlem olduğu vurgulanmıştır.

Uzun yıllar boyu özellikle çelik mikro liflerin D-Ç hasarını önleyebilme kabiliyeti araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar liflerin etkisinin birçok değışkene bağı olduğunu göstermektedir. Miao vd. (2002), D-Ç ve sülfat saldırısı altında çelik liflerin dinamik elastisite modülü düşüşünü kısıtladığını ve gevrek matrisi sünek hale getirdiğini göstermiştir. Bu konuda uzun yıllar araştırmalar yapan Pigeon vd. (1996) çelik ve kısmen karbon liflerin dona dayanıklılığı arttırdığını ve buz çözücü tuz hasarını azalttığını ancak tam olarak önlemediklerini rapor etmişlerdir. Araştırmacılar mikro liflerin bu etkisini hava sürükleme etkisine bağlamışlardır.

## BÖLÜM BEŞ

### DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 5.1 Giriş

Bu bölümde kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonun (KYÇLB) reolojik özelliklerinin, basınç dayanımının, elastisite modülünün, eğilme dayanımının, kırılma enerjisinin tayinine yönelik yapılan deneyler ve sonuçlar aktarılmıştır.

#### 5.2 Deneysel Programın Tanıtılması

Mineral katkı olarak kullanılan granüle yüksek fırın cürufu ikamesinin ve iki farklı çelik lif türünün mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. İleriki bölümlerde işlenen donma-çözülme (D-Ç) dayanıklılığının tespitine yönelik olarak da hava sürüklenmiş seriler mevcuttur. Toplamda iki ana matris ve bu matrislerin hava sürüklenmiş durumları ile her matris için dört farklı lif kombinasyonu kullanılmıştır. Toplamda 16 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Yapılan deneyler Tablo 5.1’de özetlenmiştir.

Tablo 5.1 Uygulanan ana deneyler

Taze Beton Deneyleri	Sertleşmiş halde deneyler
<ul style="list-style-type: none"><li>• Hava içeriği</li><li>• Taze halde birim hacim ağırlık</li><li>• Çökme-yayılma deneyi ve T<sub>50</sub> süresinin tayini</li><li>• V-kutusu deneyi</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tek eksenli basınç</li><li>• Elastisite modülü</li><li>• Çentikli örnekte üç noktalı eğilme deneyi</li></ul>

Deneyisel programda dökülen beton serilerinde bağlayıcı türü, hava sürüklenme, çelik lif türü parametreleri değişkenlerdir. Bu değişkenler ve bunlara bağlı olarak elde edilen özellikler aşağıda Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Deneyisel değişkenler ve belirlenen özellikler

Değişkenler	Belirlenen Özellikler
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bağlayıcı türü</li> <li>• Hava sürüklenme</li> <li>• Lif türü</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taze halde birim hacim ağırlık ve hava içeriği</li> <li>• Yayılma çapı, (<math>D_{ort}</math>)</li> <li>• 500 mm çapa ulaşma süresi, (<math>T_{50}</math>)</li> <li>• V-kutusu akış süresi (<math>V_t</math>)</li> <li>• Basınç dayanımı, (<math>f_c</math>)</li> <li>• Elastisite modülü (E)</li> <li>• Eğilme dayanımı (<math>f_{eg}</math>)</li> <li>• Kırılma enerjisi (<math>G_f</math>)</li> </ul>

Tablo 5.2’de görüldüğü üzere bağlayıcı türü olarak sadece çimento bağlayıcılı ve ağırlıkça %50 miktarında granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ikameli iki ana matris, bu matrislere hava sürüklenerek oluşturulan iki matris daha bulunmaktadır. Ayrıca ZP 305 ve OL 6/16 ticari kodlu iki farklı çelik lif tipiyle lifsiz, bir çeşit çelik lif ve yarı yarıya karma olarak dört lif kombinasyonu her matriste uygulanmıştır. Tüm KYÇLB karışımlarında lif dozajı  $40 \text{ kg/m}^3$ ’tür.

### 5.3 Kullanılan Malzemeler ve Nitelikleri

#### 5.3.1 Çimento ve Yüksek Fırın Cürufu

Çalışmada AKÇANSA ticari markasına ait CEM-I 42,5 R tipi hızlı dayanım kazanan normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Karışımlarda mineral katkı olarak OYSA işletmesine ait öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kullanılan çimento ve

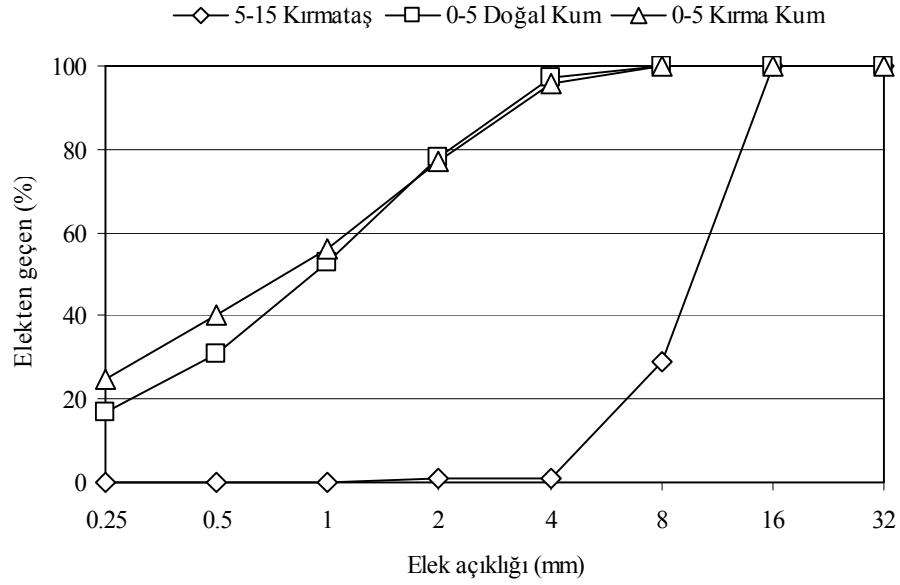
yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Çimento ve YFC’nin kimyasal kompozisyonu ve özellikleri

	<b>Birim</b>	<b>Çimento</b>	<b>YFC</b>
SiO <sub>2</sub>	%	19,65	35.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,38	14.52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,49	0.80
CaO	%	62,5	32.13
MgO	%	2,39	9.39
SO <sub>3</sub>	%	2,84	1,4
K <sub>2</sub> O	%	-	0,8
Na <sub>2</sub> O	%	-	
Serbest CaO	%	1,68	-
Kızdırma Kaybı	%	2,9	-
Klorür	%	0	-
Özgül ağırlık	g/cm <sup>3</sup>	3,1	2,81
Blaine inceliği	cm <sup>2</sup> /g	3717	4250
7 günlük dayanım	MPa	-	-
28 günlük dayanım	MPa	47	-
Puzolanik akt. indeksi (7 gün)	%	-	-
Puzolanik akt. indeksi (28 gün)	%	-	>90

### 5.3.2 Agregalar

Çalışmada üç tür agrega kullanılmıştır. Bunlar 0-5 mm doğal kum, kireçtaşı kökenli 0-5 mm kırma kum ve 5-15 mm kırma taş agregalardır. Kum fazı olarak iki farklı agrega kullanılmasındaki amaç sadece kırma kum kullanımıyla gelecek olan fazla toz içeriğinin sınırlandırılmasıdır. Böylelikle aşırı viskozite artışının ve gereğinden fazla miktarda katkı tüketiminin önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Kırma kum, doğal kum ve kırma taş agregasının kuru yüzey doygun özgül ağırlıkları sırasıyla 2,62, 2,51 ve 2,69 ve su emmeleri yine sırasıyla %1, %1,80 ve %0,16’dır. Agregaların elek analizi sonuçları Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1 Kullanılan agregaların tane büyüklüğü dağılımı.

### 5.3.3 Kimyasal Katkıları

Çalışmada iki türlü kimyasal katkı kullanılmıştır. Bunlardan biri SİKA Viscocrete SF-18 ticari kodlu KYB üretimine uygun polikarboksilat bazlı yeni nesil süper akışkanlaştırıcıdır. İkinci olarak yine SİKA-AER ticari kodlu hava sürükleyici kimyasal katkıdır. Bu katkıların bazı özellikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3 Kullanılan Kimyasal Katkıların Bazı Özellikleri

Katkı Adı	Kimyasal Yapı	Yoğunluk	pH	Donma
SİKA AER	Özel yüzey aktif maddelerden oluşan sıvı (şeffaf)	1,10±0,02 kg/l, 20°C	3-7	0 °C
SİKA SF-18	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer (kahverengi)	0,99 – 1,03 kg/l	3-7	-10 °C



Karışım suyu olarak içilebilir nitelikteki İzmir'in Buca ilçesi şebeke suyu kullanılmıştır.

### 5.3.4 Çelik Lifler

Beksa A.Ş.'den temin edilen Dramix ZP 305 ticari kodlu ucu kancalı makro lif ve OL 6/16 ticari kodlu düz tip mikro lifler kullanılmıştır. Bu liflerin bazı özellikleri Tablo 5.4'te sunulmuştur.

Tablo 5.4 Kullanılan Çelik Liflerin Bazı Özellikleri

	Lif boyu (l) mm	Lif çapı (d) mm	Narinlik (l/d)	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül ağırlık (t/m <sup>3</sup> )
<b>ZP 305</b>	30	0,55	55	1100	7,85
<b>OL 6/16</b>	6	0,16	37,5	2000	7,17

## 5.4 Deneysel Tasarım

Dört ana matris, dört lif kombinasyonu ile çeşitlendirilerek toplam 16 adet beton serisi hazırlanmıştır. Matrisler sadece çimento bağlayıcı, çimento bağlayıcı ve hava sürüklenmiş, ağırlıkça %50 cüruf ikamesi yapılmış, cürufli matris ve hava sürüklenmiş olmak üzere gruplandırılmıştır. Bu her dört matris için de lifsiz, 40 kg/m<sup>3</sup> ZP 305 çelik lifli, 40 kg/m<sup>3</sup> OL 6/16 çelik lifli, karma halde 20 kg/m<sup>3</sup> ZP 305 ve 20 kg/m<sup>3</sup> OL 6/16 olmak üzere dört lif kombinasyonu mevcuttur. Yapılan ön dökümlerde 60 ve 80 kg/m<sup>3</sup> lif dozajı ile KYÇLB üretilmesinin çok zor olduğu (işlenebilirlik açısından) ve 40 kg/m<sup>3</sup>'ün uygun bir dozaj olduğu görülerek bu dozaj seçilmiştir.

### 5.4.1 Beton Tasarımı ve Kapsam

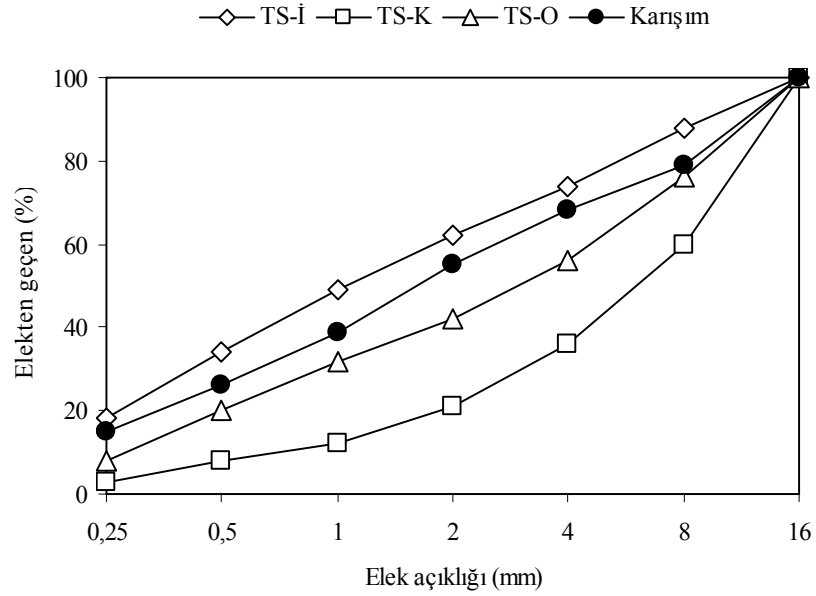
Tüm karışımlarda su/bağlayıcı, toplam toz miktarı ve su/toz değeri sabit tutulmuştur. Buradaki toplam toz madde miktarı "Kendiliğinden Yerleşen Betonlar İçin Avrupa Rehberi"nde (EFNARC, 2005) tane boyutu 0,125 mm'den küçük puzolanik veya inert

maddeler olarak tanımlanmıştır. Bağlayıcı miktarı ve agregaların ilgili elek altı kısımları toz madde içeriğini oluşturmuştur. Kimyasal katkı dört ana matris için deneme yanılma metoduyla seçilmiştir. Sadece çimento bağlayıcısı içeren karışımda kullanılan katkı miktarına en yakın ve sistemin ayrışıp kusmadığı akışkanlaştırıcı miktarı diğer ana matrisler için denenerek belirlenmiştir. Temel olarak taze halde EFNARC sınırlarına uyulmaya çalışılmıştır. Dizaynda minimum katkı sarfiyatı yapılmasına çalışılmıştır. Hava sürükleyici katkı miktarı %5-6 hava sürükleyecek şekilde deneme yoluyla saptanmıştır ve böylelikle donma çözülme dayanıklılığı denince akla gelen bir deney parametresi programa katılmıştır. Çelik lif dozajının ise uygulamaya en çok konu olan dozajlardan biri olmasına ( $40 \text{ kg/m}^3$ ) dikkat edilmiştir. Keza lif türü için de yaygın kullanımda olan çelik lifler tercih edilmiştir. Dayanım sınıfı olarak normal dayanımlı betondan daha yüksek bir dayanım (40-50 MPa) hedeflenmiştir. Granüle yüksek fırın cürufunun ikame miktarı için donma çözülme dayanıklılığı mevzu bahis olduğunda aşılması tavsiye edilen üst sınırlardan biri olan ağırlıkça %50 miktarı seçilmiştir. Böylelikle büyük miktarda çimento sistemden çıkartıldığı halde cüruf kullanımı ile yakın bir performans elde edilebilir mi sorusuna yanıt aranmıştır. Su miktarı dayanım sınıfı tayini ve akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacının sınırlandırılması amacıyla deneme yanılma yoluyla optimize edilmiştir.

Toplam toz madde içeriği agregalardan gelen kısımla birlikte  $650 \text{ kg/m}^3$  üst sınırına yakın değerlerde tutulmuştur. Hamur hacmi toplam sistemin hacminin % 45 ila 48'i arasında tutulmuştur.

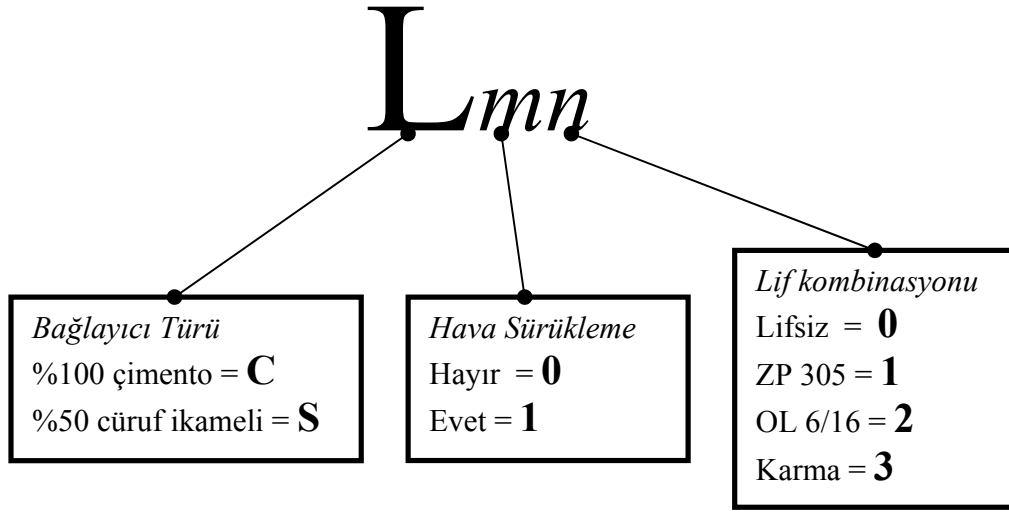
Agrega miktarının ayarlanmasında temel faktör işlenebilirlik olmuştur. Çelik liflerin işlenebilirliği aşırı derecede düşürmemesi için ince / kaba agrega oranı ağırlıkça 1,81 ila 1,82 değerlerinde tutulmuştur. EFNARC (2005)'te lifsiz kendiliğinden yerleşen betonlar için önerilen kaba agrega miktarı  $750 - 1000 \text{ kg/m}^3$  aralığındadır. Lifli üretimde bu değerlerle çok akıcı betonlar yapmak güç olmaktadır. Bu açıdan deneme dökümlerinde  $400 - 500 \text{ kg/m}^3$  kırma taş agregasının kullanılmasına karar verilmiştir. Sisteme giren lifler ve katkı ile sürüklenen hava için gereken hacim tüm agrega türlerinden eşit

miktarda düşölerek sağlanmıştır. Hazırlanan referans karışımların tane bölölklölü dağılımları ve bunların TS802'de verilen kabalık ve incelik sınırlarına göre durumları şekil 6.2'de gösterilmiştir.



şekil 5.2 Karışım Tane Dağılımı ve Sınırlar.

Beton serilerinde hava sürölkenmemişlerde teorik hava iöeriği %2, hava sürölkenmişlerde %5 seçilmiştir. Lif hacimleri ve bu hava iöeriği farkı için agregalardan eşit miktarda azaltma yoluna gidilerek karışımlarda eşdeğerlilik sağlanmıştır. şekil 6.3'te kullanılan beton serisi kısaltmalarının anlamı aöıklanmaktadır. Bağlayıcı türü sadece öimeto ise C, cüruf ikameli ise S; hava sürölendiyse 1, sürölkenmediyse 0 karakterleri yan yana getirilerek matris tanımlaması yapılmıştır. Ayrıca lif kombinasyonlarını işaret eden üçüncü karakterler şöyledir: lifsiz ise 0, ZP 305 lifi kullanıldıysa 1, OL 6/16 lifi kullanıldıysa 2, bunların karma kullanımı söz konusuysa 3'tür. Tez boyunca gerekli yerlerde beton serilerinden bu kodlamayla bahsedilecektir.



Şekil 5.3 Beton Serilerin Kodlama Sistematiği.

Tablo 5.5'te hazırlanan tüm beton karışımlarının teorik reçetesi ve dizayn parametresi sunulmaktadır. Seçilen teorik hava yüzdeleri ve lif içeriğine göre agrega gradasyonu bozulmayacak biçimde her tür agregadan eşit miktarda azaltmalar yapılmıştır. İleriki bölümlerde ölçülen gerçek hava yüzdelerine göre gerçek karışım içerikleri verilmiştir. Farklı matris ve farklı teorik hava yüzdeleri sebebiyle hamur miktarında, harç miktarında ve ince/kaba agrega oranlarında çok küçük farklılıklar olduğu görülmektedir. Kullanılan malzeme dozajları  $\text{kg/m}^3$  olarak verilmiştir. Tüm tasarımlar Microsoft Office Excel yazılımında formülize edilmiş ve bu şekilde tüm tasarım parametreleri kontrol altında tutulabilmiştir.

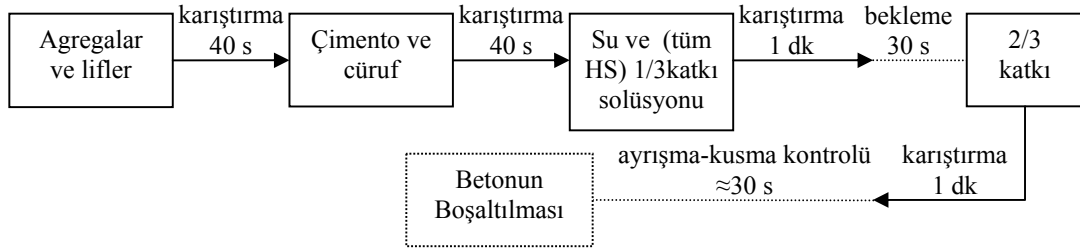
Tablo 5.5 Karışımlar İçin Teorik Reçete ve Dizayn Parametreleri

<b>Bileşen(kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>C00</b>	<b>C01</b>	<b>C02</b>	<b>C03</b>	<b>C10</b>	<b>C11</b>	<b>C12</b>	<b>C13</b>	<b>S00</b>	<b>S01</b>	<b>S02</b>	<b>S03</b>	<b>S10</b>	<b>S11</b>	<b>S12</b>	<b>S13</b>
Çimento (Akçansa CEMI 42.5R)	518				518				259				259			
Yüksek fırın cürufu	-				-				259				259			
Su	221				221				221				221			
0-5 mm doğal kum*	424	420	420	420	398	394	394	394	419	415	415	415	393	389	389	389
0-5 mm kırma kum*	646	642	642	642	620	615	615	615	641	637	637	637	615	611	611	611
5-15 mm kırma taş*	466	462	462	462	440	435	435	435	461	457	457	457	435	431	431	431
Makro çelik lif (ZP 305)	-	40	-	20	-	40	-	20	-	40	-	20	-	40	-	20
Mikro çelik lif (OL 6/16)	-	-	40	20	-	-	40	20	-	-	40	20	-	-	40	20
Hava sürükleyici (Sika-Aer)	-				0,2				-				0,2			
Süperakışkanlaştırıcı (Sika-SF18)	4				3,5				3,3				3			
<b>Dizayn Parametreleri</b>																
Su/çimento (ağırlıkça)	0,43				0,43				0,86				0,86			
Su/bağlayıcı (ağırlıkça)	0,43															
Su/toz (ağırlıkça)	0,34															
Toplam bağlayıcı (kg/m <sup>3</sup> )	518															
Toplam hamur oranı (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )**	0,45				0,48				0,45				0,48			
Toplam harç oranı (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )**	0,81				0,82				0,81				0,82			
İnce/kaba agrega (ağırlıkça)**	1,81				1,82				1,81				1,82			
Süperakış./toz (ağırlıkça %)**	0,61				0,55				0,51				0,47			
Teorik hava yüzdesi (%)	2				5				2				5			

\* Agregalar kuru yüzey doygun haldedir. \*\* 0 - 0.125 mm aralık: toz, 0.125 - 4 mm: ince agrega, 4 - 15 mm: iri agrega sınıfına dahil edilmiştir.

### 5.5 Deneysel Yöntem ve Gerçekleştirilen Deneyler

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üretimi Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı bünyesinde yapılmıştır. Kullanılan karıştırıcı 100 dm<sup>3</sup>'lük yatay eksenli bir karıştırıcıdır. KYB üretimini anlamak üzere yirmi adeti aşkın deneme dökümleri, harç fazı dökümleri gerçekleştirildikten sonra malzemelerin mikserde karıştırılma sırasından, kimyasal katkıının konuluş biçimine kadar bir çok farklılığın aynı beton ürünlerine bambaşka reolojik özellikler yaratabileceği ya da ayrılmaya ve kusmaya sebep olabileceği görülmüştür. Her dökümden önce agregaların nem tayini yapılmış, agregalar kapalı stok sahasında saklanmışlardır. Kullanılan akışkanlaştırıcı katkı seçiminden önce birçok katkı denenmiştir. Malzemeler konmadan önce karıştırıcı paletleri ve çevresi çok hafif nemli bir bezle silinerek karışım suyundan kaybın önlenmesine çalışılmıştır. Şekil 5.4'te tüm beton serilerinde uygulanan karıştırma prosedürü gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Karıştırma Prosedürü.

Görüldüğü üzere KYB için geleneksel betondan daha karmaşık ve disiplinli bir karıştırma işlemi gerekmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılan serilerde tüm hava sürükleyici (HS) katkı su ile karıştırılarak kullanılmıştır. SİKA firmasının hava sürükleyicisi ile akışkanlaştırıcısının arasında bir uyum problemi olmadığı gözlemlenmiştir. Tüm karıştırma işlemi yaklaşık 4 dakikada tamamlanmıştır.

### 5.5.1 Taze Beton Deneyleri

Taze beton deneyleri olarak birim hacim ağırlık ve hava içeriği deneyi, çökme yayılma ve  $T_{50}$  süresinin tayini deneyi, V-kutusu akış süresi deneyi gerçekleştirilmiştir.

#### 5.5.1.1 Taze Halde Birim Hacim Ağırlığının (TBHA) ve Hava İçeriğinin Tespiti

TBHA deneyi  $7 \text{ dm}^3$ 'lük silindirik kap içerisine henüz karıştırılması bitmiş KYB'den homojen biçimde alınan betonun hiçbir sıkıştırma uygulanmadan iki kademe de doldurulması ve daralı biçimde tartılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Aynı kap mekanik hava ölçer ile hava ölçümünde de kullanılan kaptır. Hava ölçer aleti Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Hava ölçer kullanımından bir kesit.

### 5.5.1.2 Çökme – Yayılma Deneyi

KYB yayılma çapı ölçülürken kullanılan tabla ve huni Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Taze halde alınan KYB Abram’s hunisi içerisine sıkıştırma uygulanmaksızın doldurulmuş, üzeri düzeltilmiş ve vakit kaybetmeden huni kaldırılmıştır. Yayılmanın başlaması ile 50 cm çapa ulaşması arasında geçen süre ikinci bir kişi tarafından kronometreyle belirlenmiştir ( $T_{50}$ ). Yayılmanın üzerinde gerçekleştiği tabla deneyden önce hafif ıslak bir bezle silinerek tozlardan arındırılmış ve nemlendirilmiştir. 800 mm köşeli bu kare tabla yüzeyi pürüzsüz ahşap kaplamadır. Yayılmanın durduğu gözlemlenince birbirine dik iki çap ölçümü yapılarak ortalaması değerlendirilmiştir.



Şekil 5.6 Yayılma tablası ve hunisi.

Ayrıca bu deney sırasında orta kısımda iri agrega ve lif kümelenmesinin olup olmadığı, dairesel yayılmış betonun sınır kısmında şerbet halesi oluşup oluşmadığı, segregasyon ve kuma olup olmadığı da gözlemlenmiştir.



### 5.5.1.3 V-Kutusu Deneyi

EFNARC (2005)'e uygun, 65 x 65 mm çıkış ağız boyutlarında metalik V-kutusu deney aparatı Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Karıştırma işleminden hemen sonra alınan beton, V-kutusu aparatına doldurulmuş ve üzeri düzeltilir düzeltilmez çıkış ağızındaki kapak açılmıştır. Bu andan itibaren yukarıdan bakışta ışık gözüken kadar geçen süre olan KYB'nin akış süresi kronometre ile belirlenmiş ve V-kutusu akış süresi olarak kaydedilmiştir. Tüm KYÇLB karışımları da akışı başarı ile sağlamışlardır. Kabul edilemeyecek bir tıkanma ve ayrışma gözlemlenmemiştir.



Şekil 5.7 V-kutusu ve akış görüntüsü.

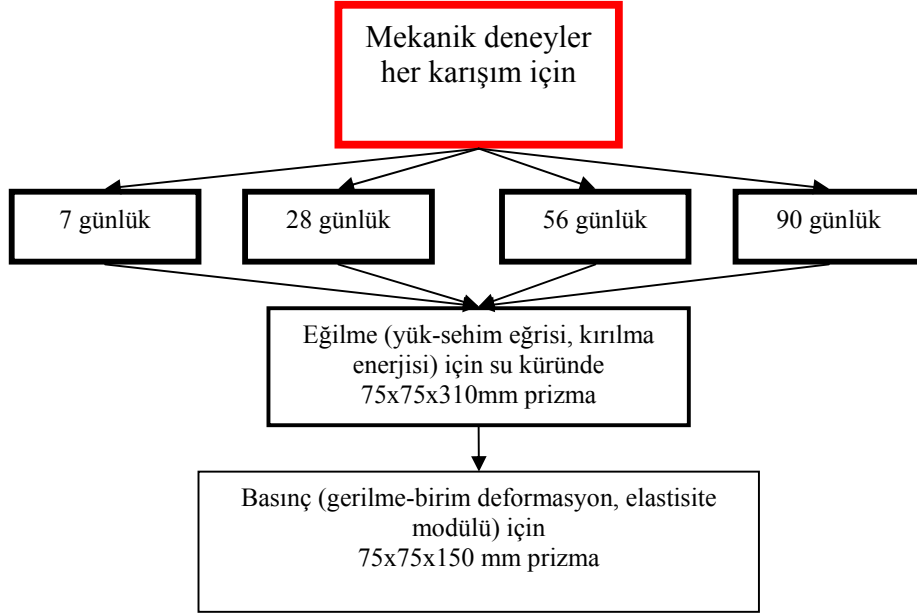
### 5.5.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş halde beton deneylerinde 7, 28, 56, 90 günlük üç noktalı eğilme deneylerinde kullanılmak üzere her yaş için 3'şer prizmatik numune (75 x 75 x 310 mm) alınmıştır. Eğilme deneyinin ardından her bir numuneden elde edilen 2'şer yarım parça kullanılarak (75 x 75 x 150 mm) yine her yaşta toplam 6 adet basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneylerinden kırılma enerjileri ve yük-deplasman eğrileri, basınç deneylerinden elastisite modülü ve gerilme-birim deformasyon eğrileri elde edilmiştir. İleriki bölümlerde işlenecek donma-çözülme (D-Ç) dayanıklılığının araştırılması 3'ü suda, 3'ü D-Ç kabiniinde (300 çevrim boyunca) saklanan numune aynı şekilde eğilme ve basınç deneylerine tabi tutularak kıyaslanmıştır. D-Ç çevrimlerine 56 gün su küründen sonra başlanmıştır.

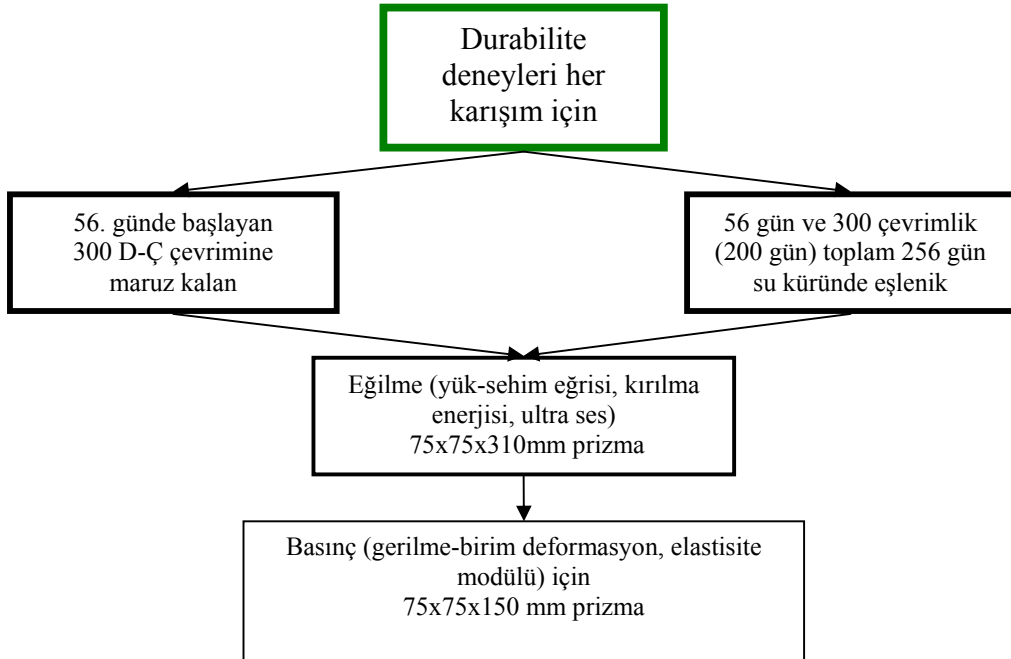
Su küründe ( $21 \pm 2$  °C), 56 günlük su küründen sonra D-Ç kabiniinde (+10 ila -18 °C) olmak üzere iki farklı ortamda çevrimlerin sonlandığı gün olan 256. güne kadar boy değişimlerinin takibi için 3'er 75 x 75 x 285 mm boyutunda paslanmaz pimli prizmatik numuneler alınmıştır. Bu numuneler ile boy değişimleri takip edilmiştir.

İçyapı incelemeleri amaçlı her bir seri ve kür şartı için (havada, suda, D-Ç kabiniinde) 2'şer adet 100 mm çaplı, 50 mm yükseklikli silindirik numuneler hazırlanmıştır.

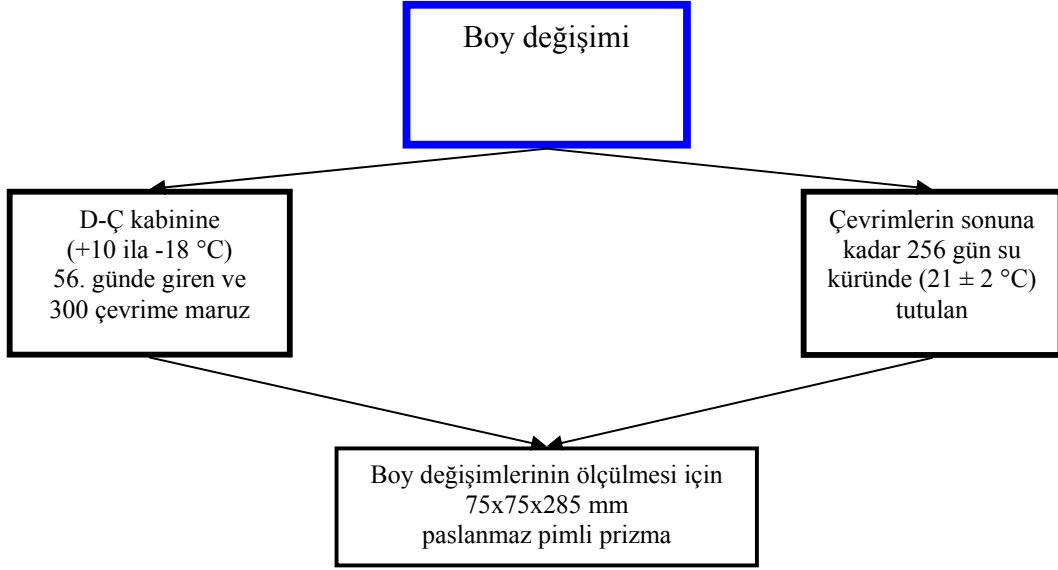
Alınan tüm numunelerde mekanik testleri Şekil 5.8'de, durabilite deneyleri Şekil 5.9'da, boy değişimleri (hacim sabitliği) takibi Şekil 5.10'da, içyapı deneyleri için 5.11'de şematize edilen dağılımlar yapılmıştır. Her bir seriden kalıp alımından D-Ç çevrimlerinin sonuna kadar (256 gün) laboratuvar ortamında (havada) bekletilecek numuneler de bulunmaktadır. Kür geçirmemiş bu numunelerde dayanımlarının ne mertebede olduğu belirlenecektir. Şematize edilmiş dağılımlarda bu numuneler görülmemektedir. Tüm çalışma boyunca alınan numuneler yaklaşık  $1 \text{ m}^3$ 'ü bulmaktadır.



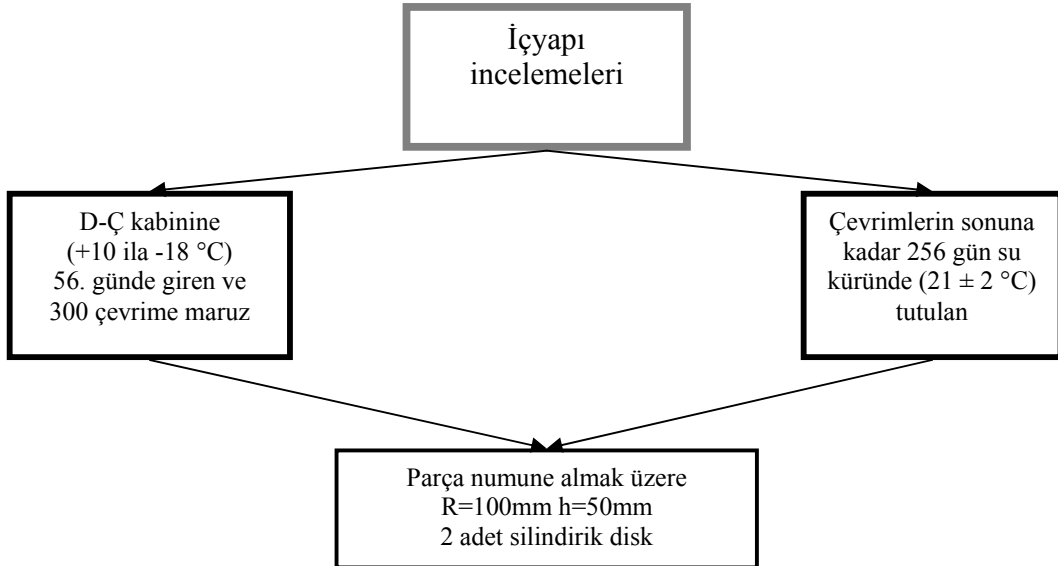
Şekil 5.7 Mekanik deneylerde numune dağılımı.



Şekil 5.8 D-Ç çevrimleri ve mekanik kıyasında kullanılan numunelerin dağılımı.



Şekil 5.9 Mekanik ve durabilite deneyleri boyunca boy değişimleri takip edilen numuneler.



Şekil 5.10 İçyapı incelemeleri için parça temin edilen numuneler.

### 5.5.2.1 Basınç Dayanımını ( $f_c$ ) ve Elastisite Modülünün ( $E$ ) Belirlenmesi

Basınç dayanımında eğilme sonrası her bir numuneden ayrılan iki parça kullanılmıştır. Numuneler suya doygun kırılmıştır. Eğilme sonrası çıkan parçaların kırık yüzleri elmas bıçakla kesilerek 75 x 75 x 150 mm boyutlarında ( $h/d=2$ ) prizma örneklerle elde edilmiştir. Başlık uygulaması yapılmamış olup törpüleme ve tıraşlama ile düzgün yük dağılımı elde edilmesine çalışılmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 Elmas Bıçak ile Basınç Örneklerinin Hazırlanması

Deneylerde U-TEST marka, yük ve deplasman kontrollü, 2000 KN kapasiteli hidrolik beton basınç presi kullanılmıştır. Tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Gerilme-birim deformasyon grafikleri elde edilmiş, bu değerler excel ortamında işlenerek elastisite modülü belirlenmiştir.

7, 28, 56, 90 günlük ve D-Ç çevrimlerinden çıkan numuneler (56 gün kür sonrası 300 çevrim) ile bunların sudaki eşlenikleri (256 günlük) basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Yükleme hızı lifsiz kontrol karışımları için 0,2 kN/s, KYÇLB karışımları

için 0,6 kN/s olarak uygulanmıştır. Numunelerin basınç dayanımını veren maksimum yükün %20'sine düşülene kadar deney sürmüştür. Eş zamanlı elde edilen gerilme-birim deformasyon eğrilerinden  $f_c$  ve  $E$  tespit edilmiştir. Grafiklerden 5 MPa ve maksimum gerilmenin %40'ına isabet eden gerilme ve birim deformasyon noktalarından geçirilen regrasyon doğrusunun eğimi elastisite modülü olarak dikkate alınmıştır.

Deneyler sırasında 2 adet LVDT'nin bağlandığı ve numunenin içine oturtularak vidalarla tutturulduğu yükleme çerçevesi kullanılmıştır. Kullanılan sistem Şekil 5.12'de gösterilmiştir.

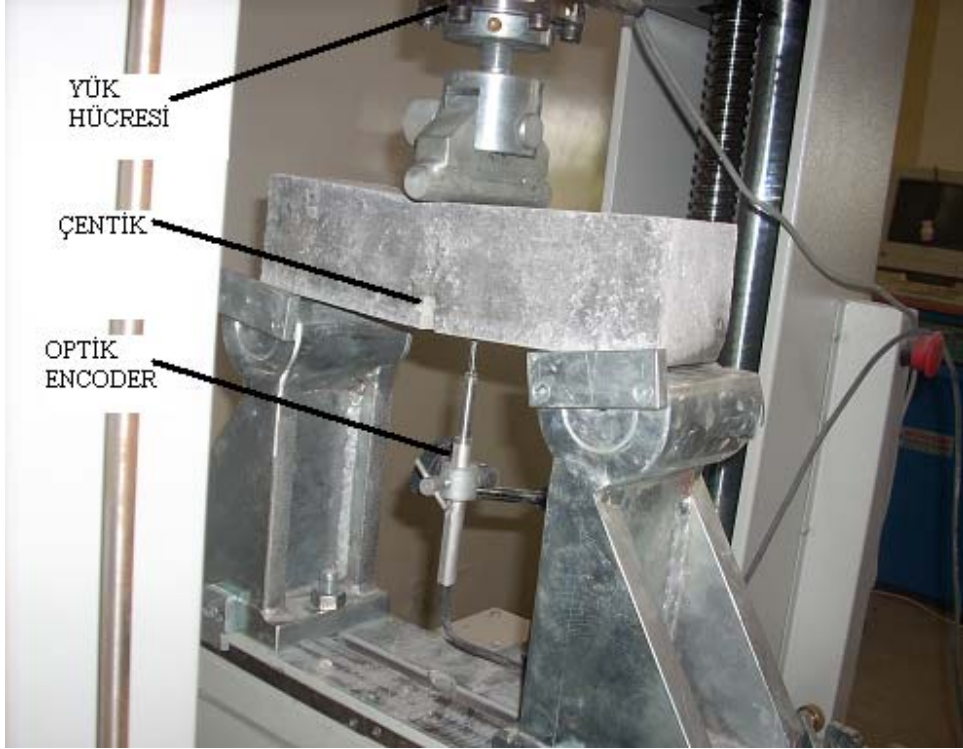


Şekil 5.12 Tek eksenli basınç deney sistemi.

### 5.5.2.3 Eğilme Dayanımının ( $f_{eg}$ ), Kırılma Enerjisinin ( $G_f$ ) Belirlenmesi

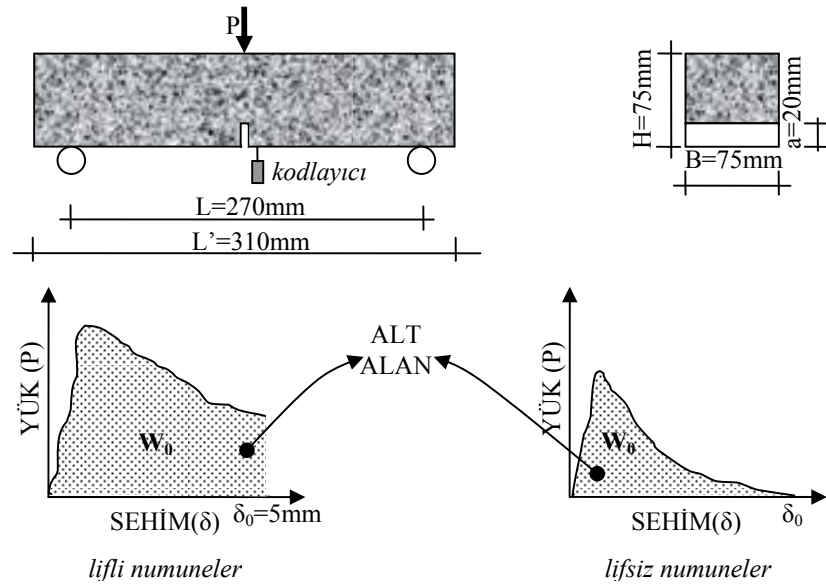
Beton serilerinin eğilme dayanımının ve kırılma enerjilerinin belirlenmesi sulu kesimle çentik açılmış 75 x 75 x 310 mm boyutundaki prizmatik örnekler kullanılmıştır. Tüm serilerde üç noktalı eğilme deneyi RILEM TC-50 FMC (1985) Kırılma Mekanikliği Teknik Komitesi'nce önerildiği üzere çentikli numunelerde gerçekleştirilmiştir. Elmas bıçakla sulu kesimde açılan çentiğin genişliği 4 mm, derinliği ise 20 mm'dir. Bu şekilde eğilmeye çalışan etkin kesit alanı 75 x 55 mm olmaktadır. Ortasından çentik açılmış eğilme prizmaları üzerinden üç noktalı eğilme deneyi ile kırılma parametrelerinin tespitinin uygun bir yol olduğu daha önce bazı araştırmacılarca tarafından da belirtilmiştir (Barros ve Cruz 2001, Gopalaratnam ve Gettu 1984, Yardımcı 2008).

Çentikli numunelerin tümü kırımında eşdeğerliliğin sağlanması amacıyla suya doygun halde kırılmıştır. Deneyde kullanılan eğilme test düzeneği Şekil 5.13'te gösterilmektedir. Deney sırasında kapalı devre modun sağlanması, numunelerin ani kırılma yapmadan tamamen ayrılana kadar yük-sehim eğrisinin çıkartılması için numune orta nokta sehimlerini ölçen Heidenhein marka 1µm ölçüm hassasiyetinde optik kodlayıcı (encoder) verileri kullanılmıştır. Kullanılan eğilme presi çerçevesi 100 kN, yükleme hücresi ise 20 kN kapasiteli ve  $\pm\%0,5$  hassasiyetindedir.



Şekil 5.12 Kırılma enerjisi tespitinde kullanılan üç noktalı eğilme test düzeneği.

Deney kapalı çevrimli olarak lifsiz numuneler için 0,02 mm/dak, KYÇLB karışımları için 0,2 mm/dak orta nokta deplasmanı hızında gerçekleştirildi. Lifsiz numuneler tamamen ayrılıp hiç yük taşıyamaz duruma gelinceye dek, lifli numuneler 5 mm orta nokta sehimine ulaşınca dek sürmüştür (Şekil 5.13). Deney sırasında bilgisayar ortamında yük – sehim değerlerinden elde edilen datalarla yük – sehim eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilerin altında kalan alan bulunarak RILEM TC-50 FMC (1985)'de önerilen (5.1) formülü ile kırılma enerjileri belirlenmiştir.



Şekil 5.13 Kırılma enerjisinde kullanılan tipik eğriler ve numune yerleşimi.

$$G_f = \frac{W_0 + m \frac{L}{L'} g \delta_0}{B(H - a)} \quad (5.1)$$

Bu denklemde  $W_0$  yük – sehim eğrisi altındaki alanı,  $m$  numunenin kütlesini,  $L$  mesnetler arası mesafeyi,  $L'$  numune uzunluğunu,  $g$  yerçekimi ivmesini ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $\delta_0$  kaydedilen son sehimini (lifli numuneler için 5 mm),  $B$  kiriş enini,  $H$  kiriş yüksekliğini ve  $a$  ise çentik derinliğini (20 mm) belirtmektedir. Kırılma enerjisi ( $G_F$ ), Joule/m<sup>2</sup> veya sıklıkla N/m olarak ifade edilir.



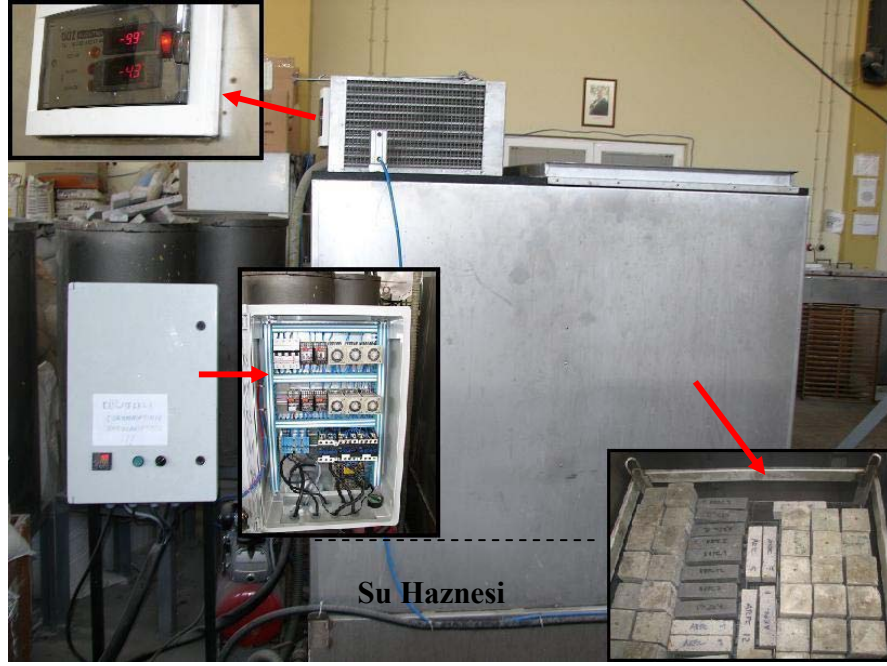
Numunelerin eğilme dayanımları ( $f_{eg}$ ) tüm örnekler çentikli olduğundan dolayı (5.2) ifadesiyle hesaplanmıştır.

$$f_{eg} = \frac{3PL}{2B(H-a)^2} \quad (5.2)$$

Bu denklemde P üç noktalı eğilmede çıkılan en yüksek yükü, L mesnet açıklığını, B kiriş enini, H kiriş yüksekliğini ve a çentik derinliğini ifade etmektedir.

#### 5.5.2.4 Donma – Çözülme Cihazı ve Çevrimler

Donma – çözülme çevrimleri otomatik dondurucu ve çözücü bir kabin kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Donma modundan çözme moduna geçişte termal şokları önlemek üzere ortamın buzunu kırıcı ılık hava üfleme sistemi mevcuttur. 14 saat havada dondurma ve 2 saat su içerisinde çözme olmak üzere 16 saatte bir çevrim tamamlanmıştır. Sahadaki gerçek koşulların yansıtılması amaçlanmış ve ASTM C-666'da önerilen dondurma hızının yaklaşık yarısı bir soğutma hızı kullanılmıştır. Çözme işlemi suda, dondurma işlemi hava ortamında yapılmıştır. Çevrimler boyunca kabindeki ve su küründeki numunelerin boy değişimleri ile ultra ses geçiş hızları takip edilmiştir. Boyu ölçülecek pimli prizmalar düşünülerek kabin içi numune rafları pimler boşta kalacak şekilde dizaynıdır. Bir numunenin çekirdeğindeki, dondurucu ortamdaki, su tankındaki sıcaklık okuyucular ile sıcaklıklar takip edilmiştir. Laboratuvar sıcaklığı mevsime bağlı olarak değiştikçe kabin ayarları ile oynanarak çevrimlerin eşdeğerliği sağlanmıştır. Donma – çözülme kabini Şekil 5.14'te gösterilmektedir.

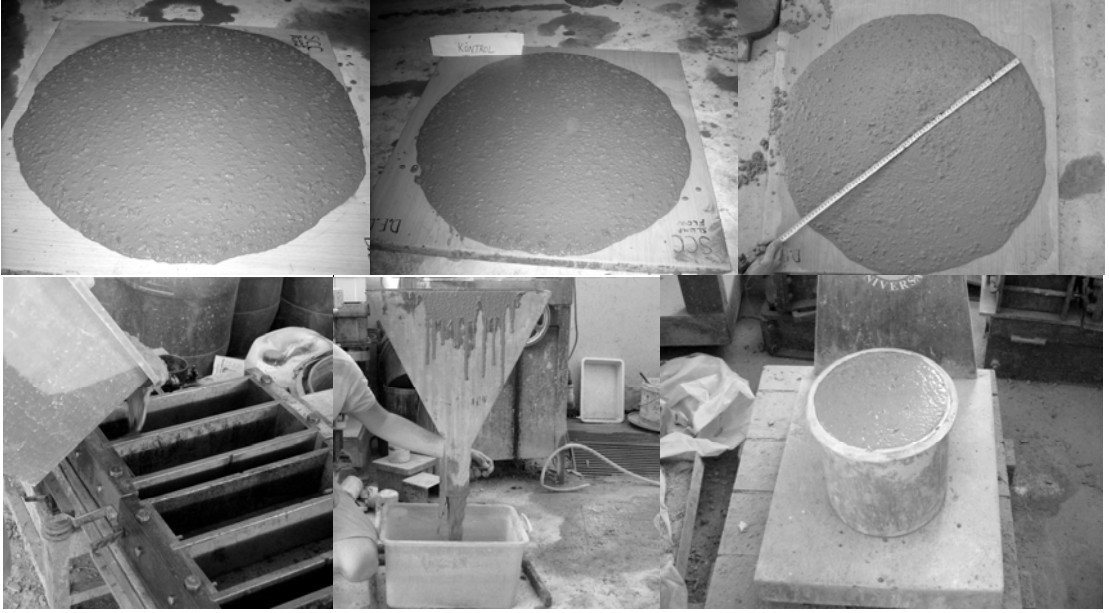


Şekil 5.14 Donma – Çözülme kabini.

## BÖLÜM ALTI

### TAZE HAL PERFORMANSI

YFC ikamesinin (ağırlıkça %50) ve hava sürüklemenin, sabit dozajda ( $40 \text{ kg/m}^3$ ) iki farklı çelik lif (ZP 305 ve OL 6/16) ve bunların karma halini içeren KYÇLB'lerde yarattığı reolojik özellikleri araştıran deneysel çalışmaların sonuçları bu bölümde incelenecektir. KYÇLB için uygun tasarım bulunana kadar otuza aşkın deneme dökümü yapılmış ve çalışmaya konu olan başarılı tasarım elde edilmiştir (Şekil 6.1). Deneysel olarak taze halde bulunan gerçek hava içeriklerine göre tüm serilerin yeniden hesaplanan gerçek bileşim oranları ve parametreleri Tablo 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 KYÇLB taze hal deney görüntüleri.

Tablo 6.1 Beton serilerinin gerçek karışım oranları ve bazı özellikleri

<i>Bileşen(kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>C00</i>	<i>C01</i>	<i>C02</i>	<i>C03</i>	<i>C10</i>	<i>C11</i>	<i>C12</i>	<i>C13</i>	<i>S00</i>	<i>S01</i>	<i>S02</i>	<i>S03</i>	<i>S10</i>	<i>S11</i>	<i>S12</i>	<i>S13</i>
Çimento	521	518	518	517	513	515	515	518	259	258	256	259	256	259	259	258
Yüksek fırın cürufu	-	-	-	-	-	-	-	-	260	258	256	259	257	259	259	259
Su	222	220	221	220	219	220	220	221	222	220	219	222	219	221	221	221
0-5 mm doğal kum*	426	420	420	419	394	391	391	394	420	413	411	415	390	389	389	389
0-5 mm kırma kum*	649	641	642	641	613	612	611	615	463	634	630	637	610	611	611	610
5-15 mm kırma taş*	468	461	462	461	435	433	433	435	462	455	452	457	432	431	431	430
Makro çelik lif (ZP 305)	-	40	-	20	-	40	-	20	-	40	-	20	-	40	-	20
Mikro çelik lif (OL 6/16)	-	-	40	20	-	-	40	20	-	-	40	20	-	-	40	20
Hava sürükleyici	-	-	-	-	0,2	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-	0,2	0,2	0,2	0,2
Süperakışkanlaştırıcı	4	4	4	4	3,5	3,5	3,5	3,5	3,3	3,3	3,3	3,3	3	3	3	3
<b>Gerçek Parametreler</b>																
TBHA	2320	2350	2290	2370	2250	2290	2270	2330	2370	2370	2320	2350	2270	2320	2310	2290
Gerçek hava içeriği (%)	1,5	2,1	1,8	2,1	6	5,6	5,6	5	1,7	2,4	3	1,9	5,8	5	5	5,1
Su/çimento (ağırlıkça)	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
Su/bağlayıcı (ağırlıkça)	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Su/toz (ağırlıkça)	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Toplam bağlayıcı (kg/m <sup>3</sup> )	521	518	518	517	513	515	515	518	519	516	512	518	513	518	518	517
Toplam hamur oranı (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )**	0,448	0,451	0,450	0,451	0,484	0,482	0,482	0,479	0,454	0,458	0,461	0,455	0,488	0,484	0,484	0,484
Toplam harç oranı (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )**	0,813	0,811	0,810	0,811	0,826	0,822	0,822	0,821	0,815	0,813	0,814	0,812	0,827	0,822	0,823	0,823
İnce/kaba agrega (ağırlıkça)**	1,81	1,81	1,81	1,81	1,82	1,82	1,82	1,82	1,81	1,81	1,81	1,81	1,82	1,82	1,82	1,82
Süperakışkan./toz (ağırlıkça %)**	0,61	0,61	0,61	0,61	0,55	0,55	0,55	0,55	0,51	0,51	0,51	0,51	0,47	0,47	0,47	0,47

\* Agregalar kuru yüzey doygun haldedir. \*\* 0 - 0.125 mm aralık: toz, 0.125 - 4 mm: ince agrega, 4 - 15 mm: iri agrega sınıfına dahil edilmiştir.

## 6.1 Taze Beton Sonuçlarının İrdelenmesi

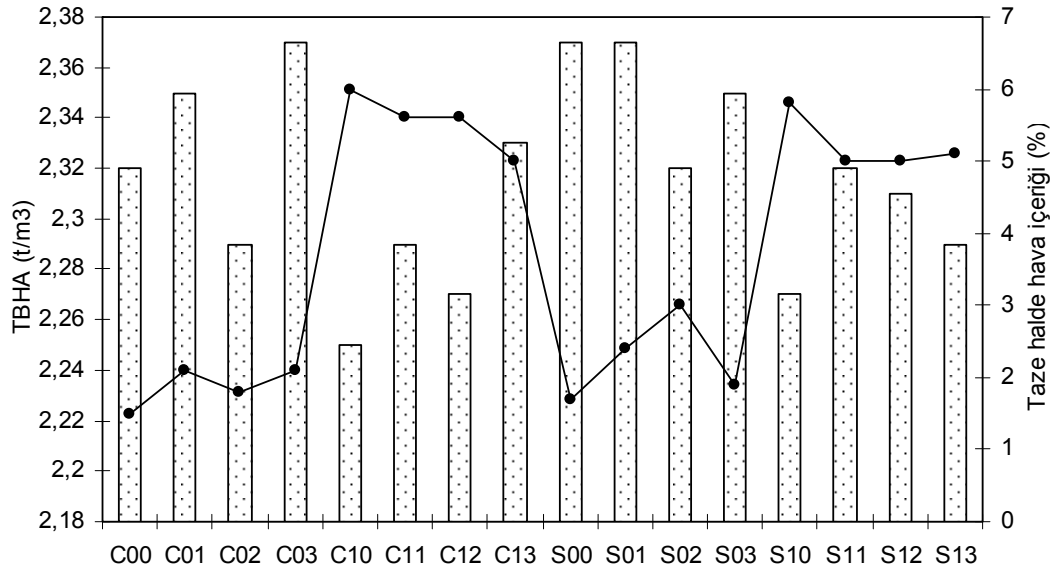
Taze betonun reolojik özelliklerinin kestirilmesine yönelik yürütülen deney sonuçları topluca Tablo 6.2’de sunulmuştur. Bu tabloda birbirine dik yayılma çapları ve ortalama değeri ( $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_{ort}$ ), betonun 50 cm çapına ulaşma süresi ( $T_{50}$ ), V kutusu akış süresi ( $V_t$ ), taze halde hava içeriği ( $h$ ), taze halde birim hacim ağırlığı ( $BHA$ ) ve deneylerin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ( $T$ ) bilgileri sunulmuştur.

Tablo 6.2 Taze hal test sonuçları

<b>Beton kodu</b>	<b><math>D_1</math> (mm)</b>	<b><math>D_2</math> (mm)</b>	<b><math>D_{ort}</math> (mm)</b>	<b><math>T_{50}</math> (sn)</b>	<b><math>V_t</math> (sn)</b>	<b><math>h</math> (%)</b>	<b><math>BHA</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>T</math> (°C)</b>
C00	780	780	780	1,8	6	1,5	2,32	28
C01	740	740	740	3,2	8,7	2,1	2,35	26
C02	760	760	760	2	6,3	1,8	2,29	28
C03	750	750	750	2,4	8,5	2,1	2,37	31
C10	700	700	700	1,4	4	6	2,25	29
C11	650	650	650	1,5	4,2	5,6	2,29	31
C12	670	650	660	1,4	4	5,6	2,27	30
C13	700	700	700	1,4	4,2	5	2,33	32
S00	740	740	740	1,3	5,6	1,7	2,37	31
S01	710	710	710	1,3	6,2	2,4	2,37	33
S02	720	720	720	2	6,3	3	2,32	31
S03	700	700	700	2	6,6	1,9	2,35	30
S10	740	720	730	1,2	4,1	5,8	2,27	29
S11	720	720	720	1,2	5,8	5	2,32	31
S12	720	730	725	2	5	5	2,31	29
S13	700	710	705	1,7	5,3	5,1	2,29	30

### 6.1.1 Taze Betonun Birim Hacim Ağırlığı ve Hava İçeriği

Üretilen betonların taze halde hava içeriği ve birim hacim ağırlığı bulunduktan sonra beton serilerinin gerçek malzeme dağılımı hacim esasına göre güncellenmiştir. Beton serilerinin taze halde birim hacim ağırlığı (TBHA) Şekil 6.2’de grafiğe dökülmüştür.



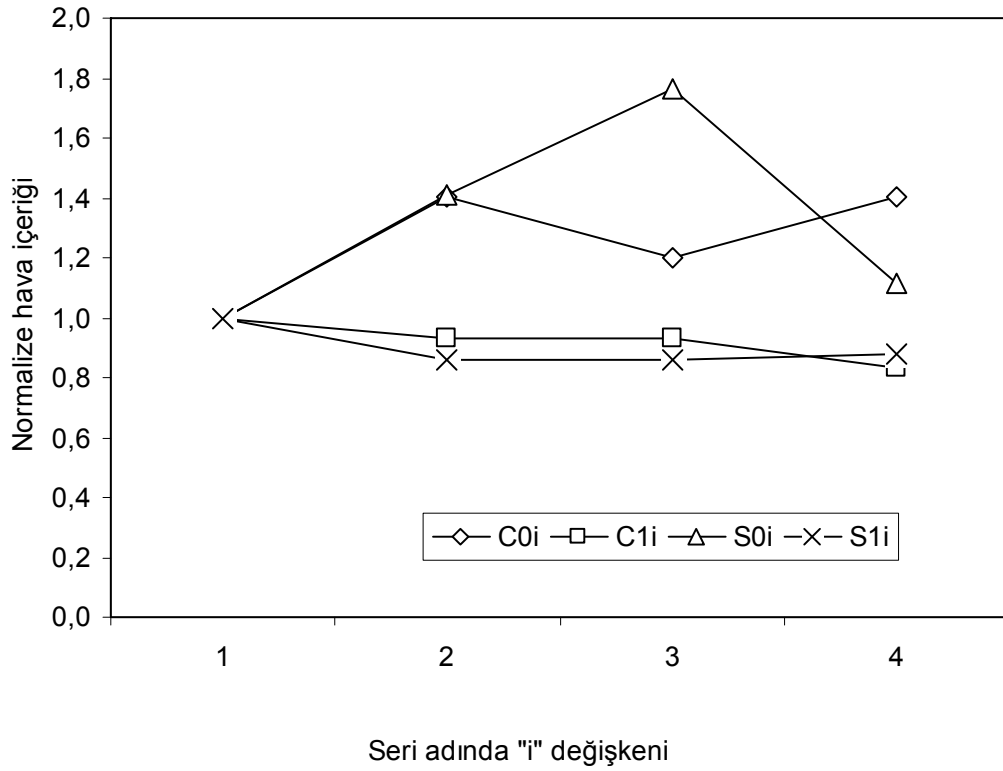
Şekil 6.2 Taze halde hava içeriği ve TBHA.

Şekil 6.2'den görüldüğü üzere hava sürükleyici kullanılan serilerin TBHA değerleri kontrollerine göre önemli oranda azalmıştır. Hava sürüklenmiş cürüflu seriler ve hava sürüklenmiş sadece çimentolu serilere bakıldığında benzer hava içeriklerinde cürüflu serilerin genel olarak daha yüksek taze hal birim hacim ağırlığına sahip olduğu söylenebilir. Bunun sebebi cürufun daha düşük özgül ağırlığına karşın doldurma esnasında daha çok hava kabarcığını dışarı atması olarak yorumlanabilir.

Hava sürüklenmiş lifli serilerde hapsolan hava yüzdesi lifsiz kontrollerine göre genel eğilim olarak daha düşükken, hava sürüklenmemiş serilerde tersi bir durum vardır. KYB içersine hava sürüklenmesi sonucu matrisin hafiflemesi ve buna karşılık lif çökelmelerinde artış olabileceğinden yüzeye doğru harekete eden hamur fazıyla birlikte sürüklenen hava kaybının daha yüksek olduğu beklenebilir (Şekil 6.3).

Lif türlerinin TBHA'ya etkisine bakıldığında mikro çelik lifin makro çelik life göre daha düşük BHA yarattığı görülmektedir. Karma lif kullanımı çimentolu matrislerde belirgin şekilde en yüksek BHA sağlamıştır. Cürüflu hava sürüklenmemiş seride (S02) mikro lif kullanımının hava yüzdesini önemli oranda (%76) arttırdığı (Şekil 6.3) ve TBHA'ı lifsizinden çok daha düşük değerlere çektiği

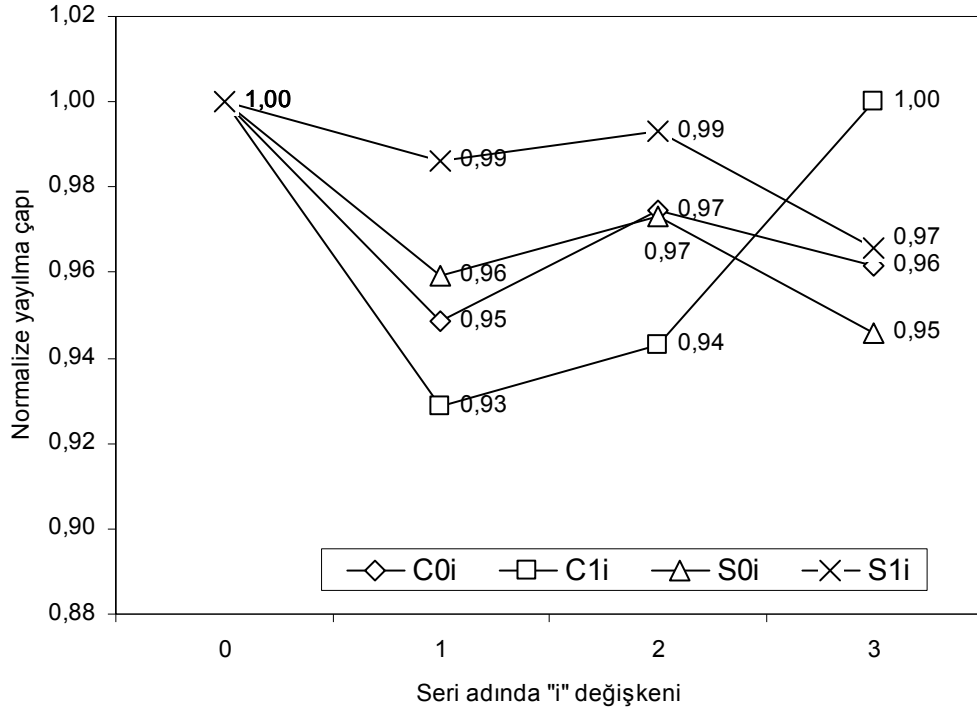
görülmektedir. Hava sürüklenmiş cürüflu ve çimentolu seride lif türünün hava yüzdesi üzerine çok etkisinin olmadığını ve lif kullanımının bir miktar kayba sebep olduğunu söylemek doğru olacaktır. Ancak hava sürüklenmemiş serilerde lif kullanımını matrise bağlı olarak farklı etkiler göstermiştir.



Şekil 6.3 Normalize hava içerikleri.

### 6.1.2 Yayılma Çapının ve T50 Süresinin Değerlendirilmesi

Yayılma çaplarına bakıldığında lif kullanımının beklendiği üzere olumsuz etkisi görülmektedir. Şekil 6.4'ten anlaşılacağı üzere ZP 305 türü makro lifler tüm serilerde OL 6/16 mikro liflerden daha büyük düşüşlere sebep olmuştur. ZP 305 türü lifler uzun boy ölçüsüyle agregalar arasında ve matrisle tabla arasında sürtünmeyi oldukça arttırmıştır. Lifsizine kıyasla en büyük düşüş %7 ile C11 betonunda yaşanmıştır. ZP 305 lifinin lifsizine göre en az yayılma çapı kaybı yarattığı beton türü ise %1 ile S11 betondur (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Normalize yayılma çapları.

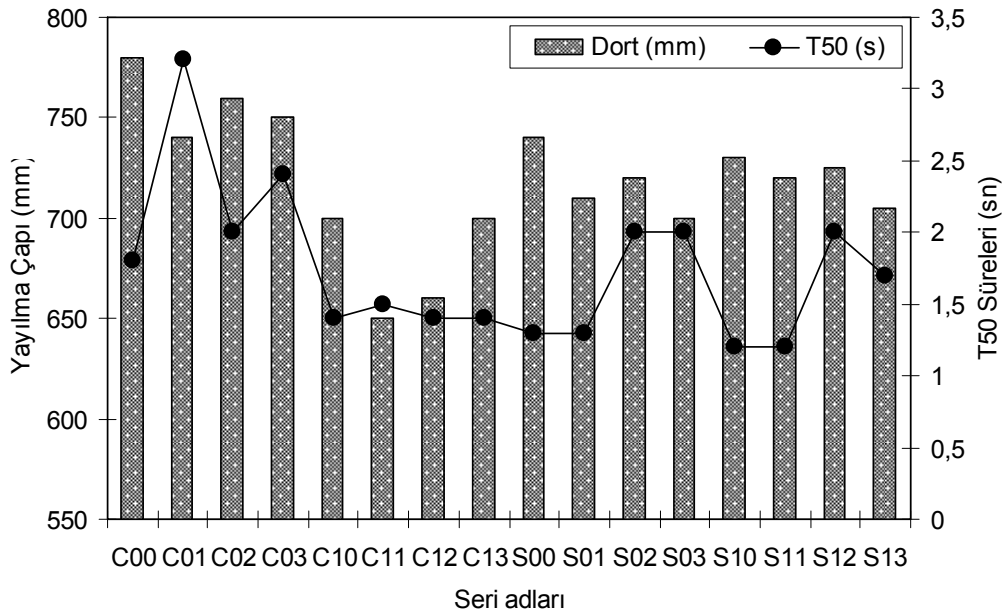
Karma çelik lif kullanılan C13 betonu lifsiz kontrolü ile kıyaslandığında yayılma çapı kaybına uğramamıştır. Çimentolu hava sürüklenmemiş seride karma lif kullanımı yayılma çapı açısından ZP 305 ve OL 6/16 lifleri arasında bir performans göstermiştir. Cürufli beton serilerinde karma lif kullanımı tek çeşit lif kullanımından daha olumsuz bir performans sergilemiş olup bu beton türlerinde daha büyük yayılma çapı kayıplarına sebep olmuşlardır. Görünürlük oranının (narinlik) çökmede yayılma sırasında yaratacağı sıkıntı göz önüne alındığında OL 6/16 türünün ZP 305 türüne göre daha iyi performans göstermesi beklenen bir olguyken, karma kullanımın da sadece ZP 305 lifi içeren serilerden daha az yayılma çapı kaybı yaratması beklenmekteydi. Ancak cürufli matriste karma lif kullanımının yayılma çapına olumsuz bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu sonuç kaba bir deney olan çökmede yayılma deneyinden kaynaklı bir hata olabileceği gibi liflerin birbirini etkilemesinin bir sonucu da olabilir.

Sonuç olarak tüm matrislerde OL 6/16 lifinin en az yayılma çapı kaybına sebep olduğu açık biçimde görülmektedir. Bunun sebebi lif hacmiyle lif türünün narinlik oranının çarpılmasıyla tanımlanan lif faktörü olgusunun en düşük değerinin OL 6/16



( $l/d = 37,5$ ) lif türü içeren serilerde olmasıdır. Karma lif kullanımıyla, sadece ZP 305 ( $l/d=55$ ) ve sadece OL 6/16 kullanımı arasında kalan lif faktörü elde edilmesine rağmen yayılma çaplarına bakıldığında karma lifli serilerin orta sırada kalmadığı, bazen en iyi sonucu (C13) bazen de en olumsuz sonucu (S13) yarattığı görülmektedir. Bu durum iki farklı lifin bir arada kullanılmasının ayrı ayrı kullanımdan farklı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

Çökmede yayılma deneyinde 50 cm çapına ulaşma süresi olan T50 süreleri incelendiğinde hava sürüklenmemiş çimentolu seride yayılma çapı ile T50 süresi arasında ters bir orantı görülmektedir. Artan yayılma çapıyla T50 süreleri düşmektedir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 T50 süreleri ve yayılma çapları.

Hava sürüklenmiş çimentolu seride lif durumuna göre T50 sürelerinde önemli bir değişme olmadığı ve hava sürüklenmemiş eşlenik serilerine göre çok daha düşük sürelerde kaldığı görülmektedir.

Hava sürükleyici katkıların yeni nesil süperakışkanlaştırıcılarla birlikte kullanımında ayrışma ve kuma sınırına daha düşük katkı dozlarında

ulaşılabilir. Bu açıdan tüm serilerde hava sürükleyiciyle birlikte daha düşük dozajda süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Hava kabarcıkların beton hammaddeleri arasında bilye sistemi gibi çalışarak taze hal özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir. KYB için yüksek dozda süperakışkanlaştırıcı kullanımını engellemesi de göz önünde tutulmalıdır. Bu sebeple özellikle hava sürüklenmiş serilerde hava sürüklenmemişine kıyasla C serisinde ağırlıkça %12, S serisinde %9 miktarında akışkanlaştırıcı azaltılmıştır. Ayrıca cürufun çimentoya kıyasla süperakışkanlaştırıcı ihtiyacını azalttığı görülmektedir. Hava sürüklenmemiş çimentolu seride 4 kg olan katkı dozajı cürufu seride 3,3 kg değerine kadar düşmüştür. Cürufu matrisin daha pürüzsüz ve boşluksuz bir kalıp yüzeyi oluşturduğu da gözlemlenmiştir.

Sadece çimento bağlayıcısı içeren hava sürüklenmiş seride yayılma çaplarında önemli düşüşler görülmüştür. Ancak buna karşılık T50 süreleri hava sürükleyici kullanımıyla birlikte 1,5 saniyenin altına inmiştir. KYB hızlı yayılma eğiliminde olsa da nihai yayılma çaplarında düşme görülmektedir.

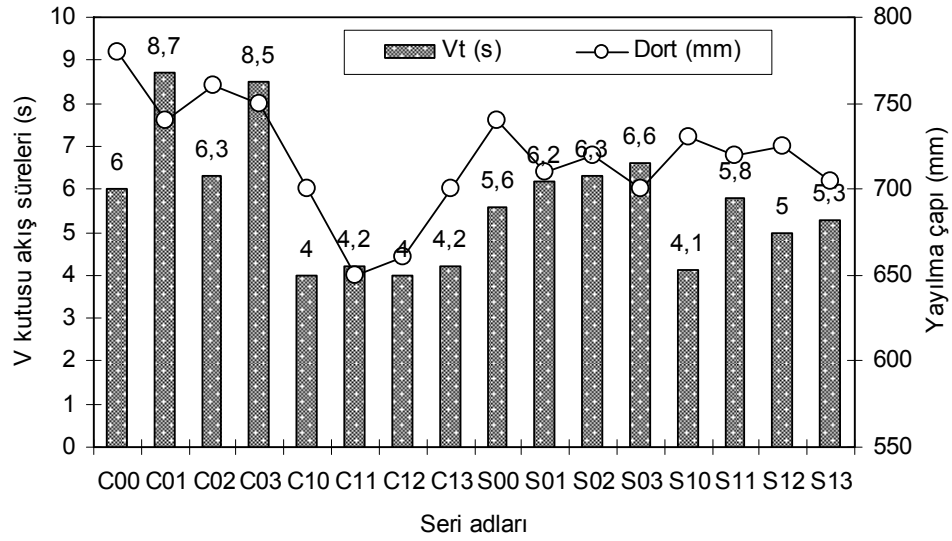
Granüle yüksek fırın cürufu içeren “S” serilerine bakıldığında yine hava sürüklenme T50 süresinde düşme eğilimi yaratmıştır ancak çimentolu seride olduğu kadar belirgin düşüşler yoktur. Ek olarak cürufu seride hava sürüklenerek akışkanlaştırıcı katkı tüketiminde sağlanan avantajla birlikte lifli seriler (S11, S12, S13) hava sürüklenmemiş cürufu kontrollerine göre daha büyük yayılma çaplarına erişmişlerdir.

T50 sürelerinin birçoğunun EFNARC tavsiyesi olan 2 sn sınırının altında kaldığı görülmektedir. İri agreganın sistemde az olması sebebiyle bu durumun olduğu söylenebilir. Ayrıca EFNARC tarafından verilen bu değerler lif içermeyen betonlar için daha uygundur. Lif içeren kendiliğinden yerleşen betonların nispeten daha fazla doldurma ve deformasyon kabiliyetine sahip olacak şekilde tasarlanması güvenli tarafta kalınmasına olanak verecektir.

### **6.1.3 V Kutusu Akış Sürelerinin Değerlendirilmesi**

V kutusu deneyi KYB türü için viskozite özelliği hakkında bilgi veren bir deney olsa da lif kullanımıyla birlikte dar alandan geçiş yeteneği hakkında da bilgi veren bir deney olarak düşünülebilir. Narinliği yüksek liflerin ve iri agreganın beraber kullanılması V kutusu çıkış ağzında topaklanmalar ve tıkanmalar yaratabilmektedir. Nitekim deneme dökümlerinde lifli serilerde 12 sn sınırının tutturulmasının zor olduğu fark edilmiştir. Karışım dizaynında hamur hacminin arttırılması, iri agrega içeriğinin düşürülmesi, harç fazının arttırılması, kullanılan lif miktarının makul değerlerde kalması gibi önlemler alınmıştır. Bu önlemler sonucunda teze konu olan tüm beton serilerinde V kutusu aparatından akışın gerçekleşmesi sağlanmıştır.

V kutusu akışı değerleri incelendiğinde çimentolu hava sürüklenmemiş seride lifsiz (C00) serisinin en düşük değeri verdiğini bununla birlikte mikro lif kullanımının V kutusu akışını çok etkilemediği görülmektedir (Şekil 6.6). Karma lif kullanımı ve makro lif kullanımının (ZP 305) V kutusu sürelerini lifsizine kıyasla neredeyse yarı yarıya arttırdığı ve 9 sn değerine çıkarttığı görülmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki 12 sn üst sınırı lifsiz KYB için kabul edilen bir değer iken, 9 sn çelik lifli KYB için çok başarılı bir sonuçtur. Hava sürüklenmiş çimentolu seri incelendiğinde tüm serilerde 4 sn civarında bir V kutusu akışı gözlemlenmektedir. Hava sürükleyicinin bu seri betonun viskozitesini önemli ölçüde düşürdüğü ve bunu yaparken liflerin akış ağzında birikmediği gözlemlenmiştir. Yine hava sürüklenmiş çimentolu seride az da olsa lif türlerinin etkisi görülmektedir. Narinliği en düşük lif olan OL 6/16 ayrıca kısa boyuyla da akışı hiç etkilememiş ve lifsiz kontrolüyle aynı akış süresini (4 sn) yaratmıştır.



Şekil 6.6 V kutusu akış süreleri ve yayılma çapları.

Cürüflu matrisler incelendiğinde hava sürüklenmemiş serilerde en uzun akış süresini karma lif kullanımının (S03) yarattığı (6,6 sn) gözükmemektedir (Şekil 6.6). Mikro ve makro çelik liflerin tek başına kullanımı yaklaşık aynı akış sürelerine sebep olmuştur. Sadece çimento bağlayıcılı hava sürüklenmemiş seri ile cüruf ikameli hava sürüklenmemiş seri kıyaslandığında granüle yüksek fırın cürufu kullanımıyla Vt sürelerinin kısaldığı (%0 ila %29) yani viskozitenin cürufu ile birlikte önemli ölçüde düştüğü görülmektedir.

Hava sürüklenmiş cüruf ikameli seriler incelendiğinde sadece çimentolu hava sürüklenmiş serisine kıyasla daha uzun akış süreleri görülmektedir (%2 ila %38). Yine bu seri içinde en başarılı lif kombinasyonu mikro lifli karışımdır (S12). Karma kullanım (S13) ile ortalama bir performans elde edilmiştir. ZP 305 kullanımı liffsiz kontrole göre akış süresini %41 uzatmıştır. Cüruf içeren serilerde hava sürüklemenin beklendiği üzere viskoziteyi düşürdüğü (S00 hava sürüklemeye birlikte S10 olarak %27 daha kısa sürede akmıştır) görülmüştür.

## 6.2 Bölümle İlgili Genel Değerlendirme

Genel bir değerlendirme olarak tüm serilerde V kutusu akışı en kısa olan lifsiz serilerin en büyük yayılma çapına sahip olduğu, hava sürüklemenin V kutusu akışını kısalttığı, ZP 305 lifi kullanımının hava sürüklenmemiş cüruf ikameli seri dışında en büyük akış uzamalarına sebep olduğu buna rağmen akışın 9 sn'nin altında kaldığı, hava sürüklemeyle birlikte EFNARC alt sınırı olan 6 sn değerinin altına inildiği, hava sürüklenmemiş serilerde cüruf ikamesinin akış süresini önemli oranda kısalttığı (kimyasal katkı ihtiyacını azaltmasına rağmen) ve daha düzgün kalıp yüzeyi oluşturduğu söylenebilir.

Yapılan deneme karışımlarında 80 kg/m<sup>3</sup> çelik lif dozajı ile kendiliğinden yerleşebilirliğin sağlanamadığı görülmüştür. 60 kg/m<sup>3</sup> lif dozajında tasarımın hassas dengelere sahip olduğu görülmüştür. Taze hal açısından 40 kg/m<sup>3</sup> çelik lif dozajı sahada kullanım düşünüldüğünde uygun bir dozajdır.

## BÖLÜM YEDİ

### BASINÇ YÜKLERİ ALTINDAKİ PERFORMANS

Bu bölümde KYB örnekleri üzerinde uygulana tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen dayanımların ve elastisite modüllerinin beton yaşıyla değişimi incelenmiştir.

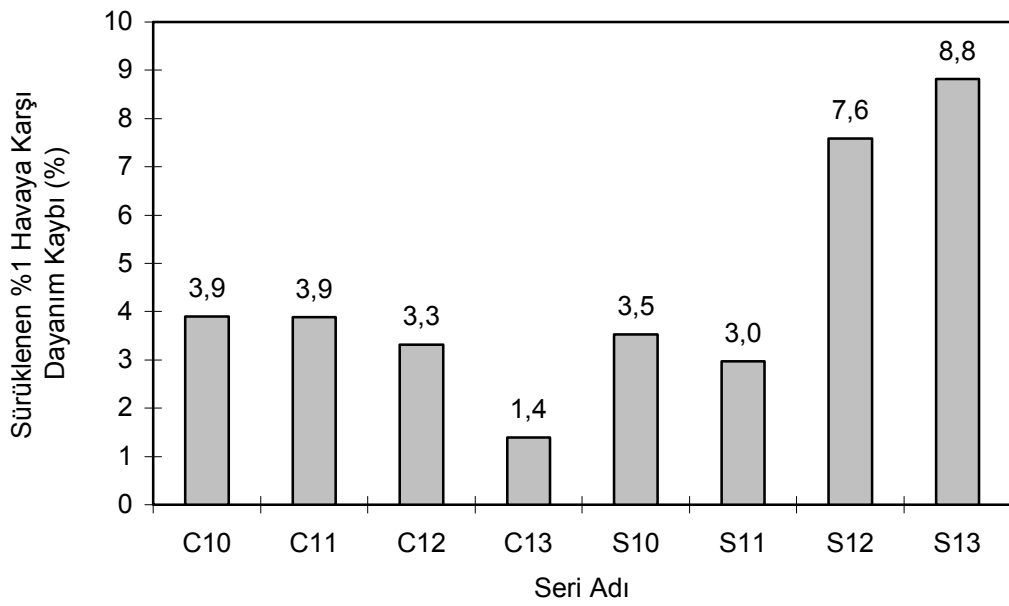
#### 7.1 Basınç Dayanımlarının ( $f_c$ ) Değerlendirilmesi

Tablo 7.1’de 7, 28, 56 ve 90 günlük (su kürü) numunelerin deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama basınç dayanımları verilmiştir.

Tablo 7.1 KYB basınç dayanımları

<b>Beton kodu</b>	<b>Birim</b>	<b>Yaş (gün)</b>			
		<b>7</b>	<b>28</b>	<b>56</b>	<b>90</b>
C00	MPa	45,9	50,1	49,0	49,0
C01		44,5	52,7	54,9	54,3
C02		45,2	52,0	56,2	56,4
C03		48,3	52,1	53,4	52,5
C10		31,2	37,0	39,0	40,4
C11		36,8	47,8	46,2	46,9
C12		40,3	43,9	48,1	49,3
C13		41,4	45,5	50,0	50,4
S00		43,2	52,2	54,9	54,5
S01		39,8	53,4	55,7	53,1
S02		42,0	50,6	55,3	59,6
S03		42,0	54,8	55,6	62,4
S10		35,0	47,4	45,0	46,6
S11		36,2	48,5	49,3	49,0
S12		36,3	43,3	46,1	50,6
S13		34,2	41,6	45,0	44,8

Şekil 7.1’de sırf çimentolu “C” serisi ve cüruf ikameli “S” serisi hava sürüklenmemiş KYB’lerin bünyelerinde var olan hava yüzdelere ilaveten katkı kullanarak sürüklenen her %1 hava için basınç dayanımı kayıpları (%) verilmektedir. Bu değerler, hava sürüklenmemiş bir serinin (örn: C01) hava sürükleyici katkı eklenerek üretilen (örn: C11) serisiyle kıyaslanması sonucu bulunmuştur. Karşılaştırılan dayanımlar 90 günlük dayanımlardır. Bunu sebebi puzolanik bir malzeme olan cürufun çimentoya göre geç dayanım artışından kaynaklı haksız ve yanlış bir kıyaslama yapmamaktır.



Şekil 7.1. %1 hava sürüklemeye (yalnı matrisin hava içeriğine ilaveten) karşılık gelen basınç dayanımı kayıpları.

Şekil 7.1’den görüldüğü üzere 90 günlük nihai dayanımlara bakıldığında %5 – 6 arası hava içeren hava sürüklenmiş serilerdeki basınç dayanımı kaybı %1,4 ila %8,8 arasında değişmektedir. “C” serisi betonlarda en büyük dayanım azalışı %3,9 ile lifsiz seri C10 ve C11’de görülmüştür. Bu seride çelik lif ilaveleri hava sürüklemenin yarattığı dayanım düşüşlerini azaltma eğilimindedir. Burada çarpıcı olan sonuç C13 serisinin çok düşük bir kayba (%1,4) uğramasıdır. ZP305 ve OL 6/16 liflerinin karma olarak kullanılması hava sürüklemenin yarattığı matris süreksizliklerini en iyi şekilde

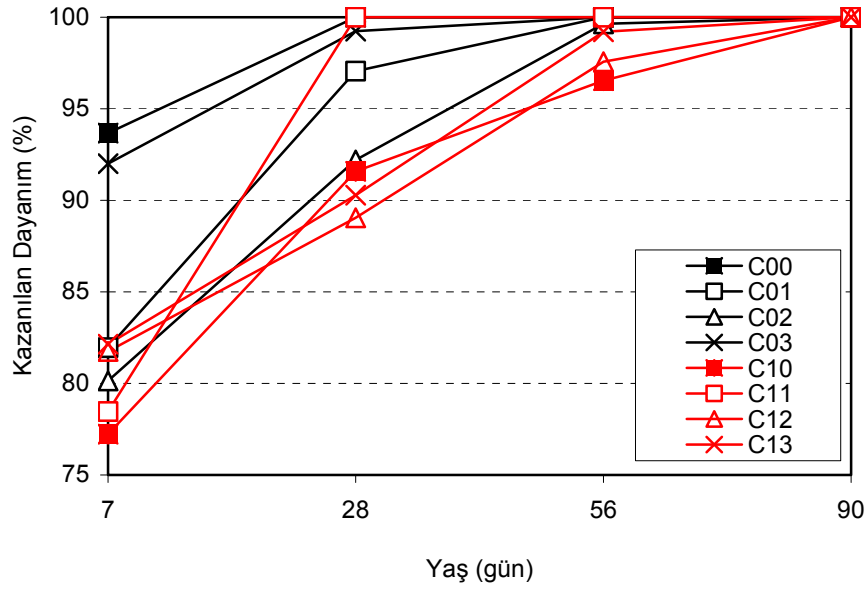
karşılamaştır ve lifsiz seride görülen dayanım kaybının (%3,9) üçte biri seviyelerinde kalmasına sebep olmuştur.

Cüruf ikameli “S” serilerine bakıldığında lif kullanımı hava sürüklemenin basınç dayanımını düşürücü etkisi karşısında kötü bir performans sergilemiş ve ZP305 kullanımı dışında lifsiz değerinden (S10, %3,5) daha büyük kayıplara sebep olmuştur. Sadece 40 kg/m<sup>3</sup> ZP305 içeren cürufli seri (S11), lifsiz duruma göre daha az kayba uğramıştır. 40 kg/m<sup>3</sup> OL 6/16 mikro lifli kullanılan seri (S12, %7,6) lifsiz duruma göre daha büyük kayıp yaşamıştır. Ancak cürufli serilerde göze çarpan karma lif kullanımının sürüklenen %1 hava başına kaybettiği basınç dayanımının %8,8 gibi büyük bir değer oluşudur.

Tüm serilere eşit dozajda katılan hava sürükleyici sonunda tüm hava sürüklenmiş serilerin hava içeriği %5 – 6 arasındadır. “C” serisi betonlarda çelik lifli serilere sürüklenen havanın lifsizine göre daha düşük kayıplar vermesinin sebebi çelik liflerin yük aktarımı yapıp boşluk uçlarında basınç etkisinde oluşan yığılmaları azaltması olabilir. İki farklı narinlikteki ZP305 ve OL 6/16 lifleri sinerjik etki yaratarak bu aktarımı daha da iyi seviyelere çıkartmış gibi görünmektedir. Ancak cürufli seride ZP 305 kullanımı dışında lifli serilerde dayanım düşüşü artmıştır. Cürufli ve çimentolu lifsiz matrislerde dayanım kayıp seviyesi aynıyken (%3,5) lifler işin içine girdiğinde çimentolu matriste fayda, cürufli matriste zarar getirdiği görülmektedir. Bu durumun sebebi hava sürüklenmemiş halde çimentodan daha gelişmiş olan lif – cürufli matris aderansının, hava sürüklendiği zaman çimentoya göre daha fazla zarar görmesi olabilir.

Şekil 7.2’de “C” serisi KYB’lerin nihai basınç dayanımına (90 günlük) oranla kür süresine yani yaşa bağlı olarak dayanım ilerlemeleri verilmiştir. Bazı serilerde 28. günden sonra 90 günlük değerler aşılmış gibi görünmesine rağmen (maksimum 2 MPa’ya kadar) bu dayanımlar için %100 nihai dayanımlarını kazandığı kabul edilmiştir.





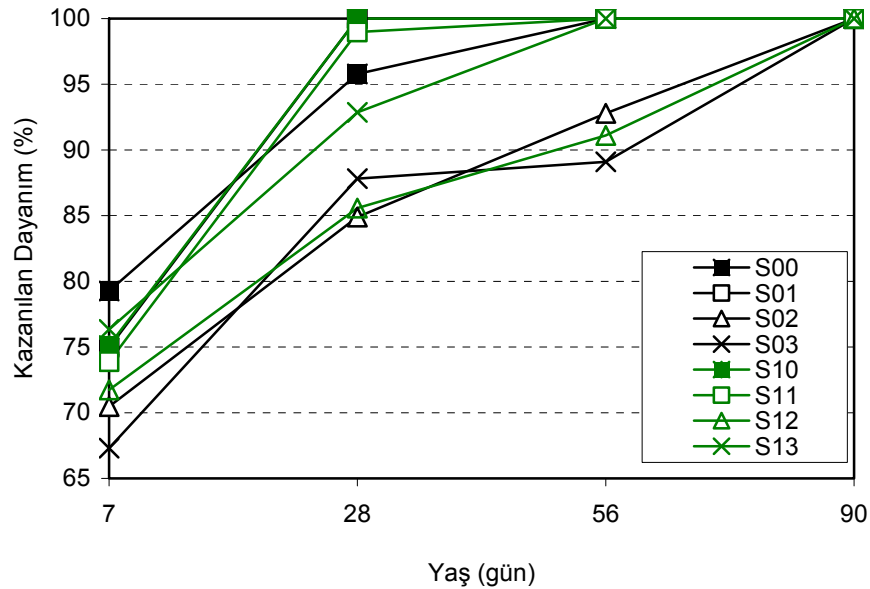
Şekil 7.2 “C” serisi KYB’lerin yaşa bağlı olarak basınç dayanımlarının gelişimi.

Şekil 7.2’de görüleceği üzere hava sürüklenmemiş seriler ilk 7 günde nihai dayanımlarının %80 ila %95’ini kazanmışlardır. İlk 7 günde %94 ile en hızlı dayanım kazanan lifsiz KYB’dir (C00). Bu seriyi takiben sırasıyla karma lifli (C03, %92), makro lifli (C01, %82) ve mikro lifli (C02, %80) KYB’ler gelmektedir. 28. günde lifsiz (C00) KYB dayanımının tamamını kazanmışken, 7. gündeki sıra takip edilmiş ve C00’ın peşinden sırasıyla karma lifli (C03, %99), makro lifli (C01, %97) ve mikro lifli (C02, %92) KYB’ler gelmektedir. 56. günde hava sürüklenmemiş “C” serileri nihai dayanımlarına ulaşmışlardır. Burada fark edilen önemli nokta KYÇLB’lerin dayanımlarını lifsizlerine kıyasla geç kazanmasıdır. Ayrıca karma lif kullanımı lif kombinasyonlarından en hızlı dayanım kazananıdır.

Şekil 7.2’den hava sürüklenmiş “C” serisi KYB’lerin ilk 7 günde nihai dayanımlarının %77 ila %82’sini kazandığı görülmektedir. Bu seriler arasında 7. günde en az dayanım kazanan lifsiz (C10, %77) KYB’dir. 7. günde nihai dayanımlarının en büyük kısmını kazanan C12 ve C13 (%82) serileridir. 28. günde makro lifli C11 serisi sıçrama yaparak nihai dayanımına ulaşmıştır ve diğer seriler diğer seriler dayanımlarının %90’ı mertebelerindedirler. 56. günde karma lifli seri (C13) nihai dayanımına ulaşmıştır. Onu mikro lifli (C12) ve makro lifli (C11) ve lifsiz (C10) serileri sırasıyla %99, %98 ve %97 ile takip etmektedir.

Çimentolu “C” serilerinin dayanım kazanma hızları genel olarak değerlendirildiğinde hava sürüklemenin dayanım artış hızını azalttığı, hava sürüklenmemiş serilerde lif ikamesinin dayanım artış hızını azalttığı ve lifliler arasında en iyi performansın karma lif kullanımıyla sağlandığı görülmektedir. Hava sürüklenmiş serilerde ise ilk 7 günde aksi bir durum vardır. Lif kullanımı dayanım artış hızını arttırmıştır. Makro lifli seri 28. günde nihai dayanımına ilk olarak erişirken diğer seriler dayanımlarına 90 günde erişmişlerdir. Beton içerisindeki hava boşluklarının dayanımı düşürdüğü bilinmektedir ayrıca yavaş gelişim durumu hava sürükleyicilerin priz geciktirici etkisinden kaynaklanabilir. Ayrıca hava sürüklenmemiş KYÇLB’de ilk 7 günde lif – matris aderansı tam değerine ulaşmadığı için dayanımın yavaş geliştiği, hava sürüklenmiş KYÇLB’de ise tam gelişmemiş aderanslarına rağmen boşlukların yarattığı süreksizlikleri karşılamada başarılı olduğu söylenebilir.

Şekil 7.3’te yüksek fırın cürufu (YFC) ikameli “S” serilerinin zamana bağlı dayanım kazanma hızları verilmektedir.



Şekil 7.3 “S” serisi KYB’lerin yaşa bağlı olarak basınç dayanımlarının gelişimi.

Ağırlıkça %50 YFC ikameli “S” kodlu serilerde ilk 7 günde nihai (90 günlük) dayanımlarının %67 ila %80’ini kazandıkları görülmektedir. 28. günde bu değer %85

ila %100'e, 56. günde %90 ila %100'e ulaşmaktadır. Hava sürüklenmemiş cürüflu serilerde 7. günde en hızlı dayanım artışı lifsiz seridedir (S00, %80). Peşinden sırasıyla %75 ile makro lifli (S00), %70 ile mikro lifli (S02) ve %67 ile karma lifli seri (S03) gelmektedir. 28. günde makro lifli seri nihai dayanımına ulaşırken lifsiz seri %95 mertebelerindedir. Lifsiz seri (S00) nihai dayanımına 56. günde ulaşırken mikro lif içeren seriler olan S02 ve S03 nihai dayanımlarına 90. günde ulaşmışlardır (Şekil 7.3).

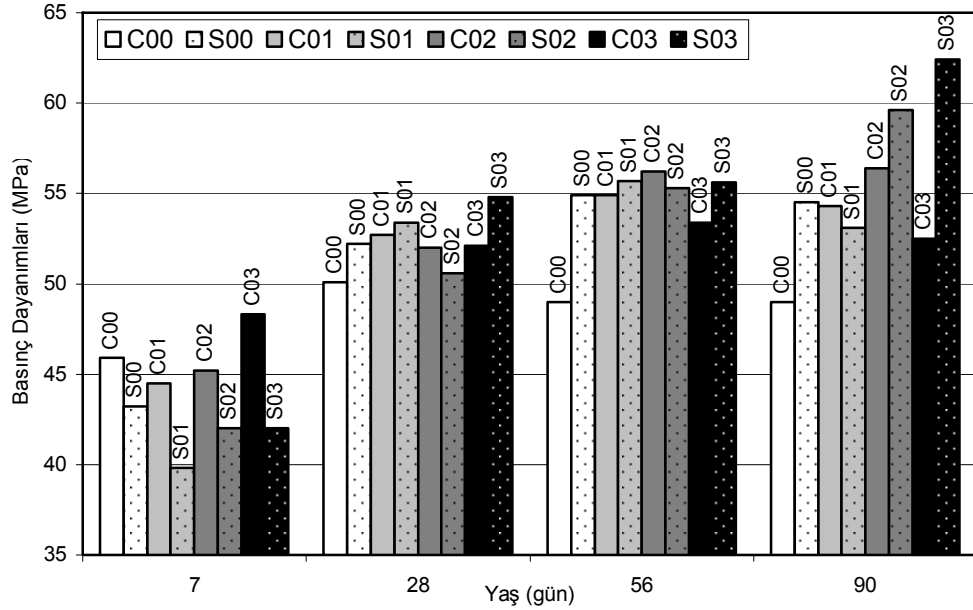
Hava sürüklenmiş serilere bakıldığında 7. günde karma lifli (S13) ve lifsiz (S10) ve makro lifli (S11) serilerin %75 mertebelerinde dayanım kazanarak önde olduğu görülmektedir. 28. günde lifsiz seri ve neredeyse makro lifli seri nihai dayanımına ulaşırken, karma lifli seri 56., mikro lifli seri 90. günde nihai dayanımlarına ulaşmışlardır (Şekil 7.3).

Cürüflu matriste ilk 7 günlük erken dönemde hava sürüklenmemiş durumda lifsiz serinin (S00) önde olması yine lif – matris aderansının yavaş gelişmesiyle açıklanabilir. Hava sürüklenmiş seride ise ilk 7 günde lifli serilerin lifsiz seri ile neredeyse aynı oranda dayanım kazanması yine çimentolu seride olduğu gibi sürüklenen hava boşluklarının yarattıkları süreksizlikleri, liflerin tam olmayan aderansına rağmen karşılayabilmesiyle açıklanabilir. Cürüflu tüm serilerde dikkat çeken diğer nokta mikro lif içeren serilerin daha geç dayanım kazanmasıdır ve genel olarak mikro lif içeriği arttıkça bu eğilim daha çarpıcı olmaktadır. İnce öğütülmüş yüksek puzolanik özellikli katkıların lif – matris ara yüzeyini geliştirdiği bilinmektedir (Bentur ve ark., 1995). 40 kg/m<sup>3</sup> dozajda daha çok tane içeren mikro lifler (OL 6/16), ZP 305'in neredeyse 4 katı ara yüzey yaratmaktadır. Mikro liflerin yarattığı yüksek özgül yüzeyin cürüflu matrisle aderansının ilerleyen yaşlarda ilerlemesi söz konusu gibi gözükmektedir.

“C” ve “S” serileri kıyaslanacak olursa “C” serilerinin ilk 7 günde %77 ila %94, “S” serilerinin %67 ila %80 oranında dayanım kazandığı görülmektedir. 28. günde bu değerlerin “C” serisi için %90 ila %100, “S” serisi için %85 ila %100 olduğu görülmektedir. 56. günde ise “C” serileri dayanımlarının %97 ila %100'ünü

kazanırken “S” serileri dayanımlarının %89 ila %100’ünü kazanmışlardır. Puzolanik bir katkı olan cürufun lif ve hava sürüklenme etkisi dahil dayanım artışının çimentoya göre daha yavaş olduğu görülmektedir (Şekil 7.2 ve 7.3).

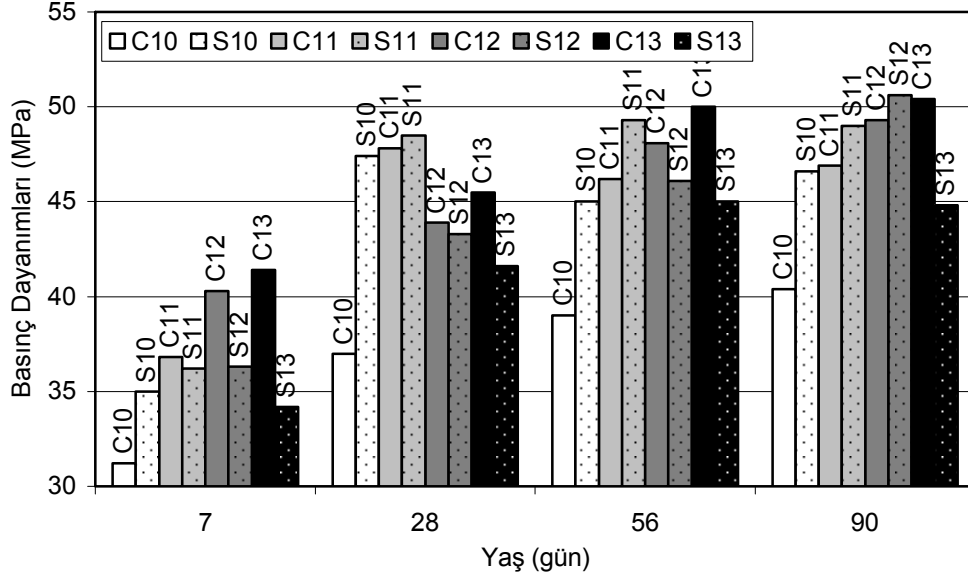
Şekil 7.4’te hava sürüklenmemiş “C” ve “S” serilerinin basınç dayanımları sütun grafik halinde verilmektedir.



Şekil 7.4 Hava sürüklenmemiş “C” ve “S” serilerinin basınç dayanımları.

Şekil 7.4’ten görüleceği gibi cürufllu seriler 7. günde çimentolu serilerden daha az dayanıma sahipken 28. günden itibaren genel trend olarak çimentolu kontrollerinden daha yüksek basınç dayanımlarına erişmişlerdir. Çimentolu serilerde lif ilavesinin 7. günde düşük mertebelerde dayanım kayıplarına sebep olabildiği görülürken, 28. günden itibaren sürekli biçimde basınç dayanımı artışı yarattıkları görülmektedir. Aynı şekilde cürufllu ikamesinde 7. günde lifler dayanım kaybı yaratırken, 28. gün ve sonrasında genel eğilim liflerin dayanımı arttırdığı şeklindedir.

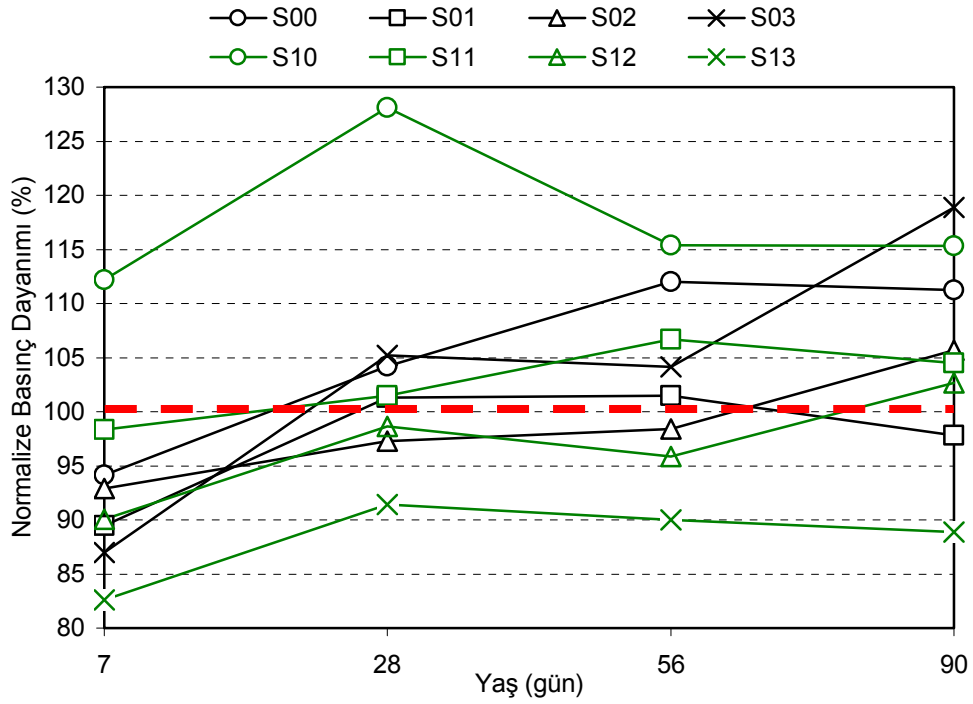
Şekil 7.5'te hava sürüklenmiş "C" ve "S" serilerinin basınç dayanımları sütun grafik halinde verilmektedir.



Şekil 7.5 Hava sürüklenmiş "C" ve "S" serilerinin basınç dayanımları.

Şekil 7.5'ten görüleceği üzere 7. günde lifsiz çimentolu hava sürüklenmiş seri (C10), %50 cüruf ikameli durumundan daha düşük dayanıma sahipken yine 7. günde çimentolu matraste bulunan lifler daha iyi davranmakta ve cürufllu lifli seriden daha büyük dayanıma erişmektedir. Bir haftalık kür sonrası cürufllu matrislerden karma lif dışında dayanımı kötü etkileyen bir lif kombinasyonu yoktur. 28.gün ve sonrasında çimentolu serilere katılan liflerin dayanımı arttırdığı görülmektedir. Cürufllu seride ise 28. günde mikro lif içeren S12 ve S13 (karma) serileri lifsiz hallerine göre düşük dayanıma sahipken, 56. ve 90. günlerde sadece karma liflerin lifsize göre düşük dayanıma sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 7.6'da ağırlıkça %50 cüruf ikamesinin tüm serilerde zamana bağlı olarak yarattığı etki bağıl olarak gösterilmektedir. "C" serisine cüruf ikamesi ile oluşturulan seriler "S" kodu ile adlandırılmaktadır.



Şekil 7.6. Ağırlıkça %50 cüruf ikamesinin basınç dayanımına etkisi.

Kırmızı kesikli çizgi “C” serisi cüruf içermeyen serilerin ilgili yaşta sahip oldukları dayanımların referans kabul edildiğini göstermektedir.

Hava sürüklenmemiş serilerde (siyah renkli) 7 günlük bağıl dayanımlara bakıldığında cüruf ikamesinin dayanımı %5 ila %13 arasında düşürdüğü gözlenmektedir (Şekil 7.6). Bu yaşta en büyük düşüşü %13 ile karma lifli seri göstermiştir. En iyi performans %5 ile lifsiz seridir. Erken dönemde hava sürüklenmemiş lifli matrislerin cüruf ikamesinden daha kötü etkilendiği görülmektedir. 28. günden itibaren lif – matris aderansının puzolanik reaksiyonlarla gelişmesi sonucu lifli seriler kontrollerine (çimentolu serilere) erişmişler ve mikro lifler dışında aşmışlardır. Bu yaşta en iyi performansı %5 artış ile lifsiz (S00) seri ve karma lifli (S03) seri göstermiştir. Mikro lif içeren seri ise (S02) kontrolüne göre %3 mertebelerinde geri kalmış gözükmemektedir. 56. günde ise 28. güne oranla lif etkilerinde önemli bir değişiklik olmamışken lifsiz matris kontrolünün dayanımını %13 aşmıştır. Nihai dayanımlar olarak kabul edilebilecek gün olan 90. günde cürufli matrisle karma lif kullanımının buluşması çimentolu seriye göre %20’ye yakın bir dayanım artışı sağlamıştır. Benzer şekilde 56. güne mikro lifli (S02) seri dayanıma

katkıda bulunmamışken 90. günde kontrolüne göre %5 fazla dayanıma sahiptir. Cürüflu lifsiz matrisin (S00) gelişiminin 56. günde durduğu görülmektedir (Şekil 7.6).

Hava sürüklenmemiş matrislerde genel bir değerlendirme yapılacak olursa cüruf ikamesi erken dönemde (7 gün) çimentoya göre geç dayanım kazanışlarından kaynaklı dayanımlarının kontrollerine göre düşük olduğu görülmektedir. Bununla beraber erken dönemde cürüflu matrislerde lif – matris aderansının gelişmemesi yüzünden lifli serilerde çimentoda yakalanan performansın gerisinde kalmıştır. Ancak 28 günden sonra puzolanik reaksiyonların ilerlemesi sonucu lif – matris aderansı gelişmekte ve %100 çimentonun liflerle sergiledikleri performansı aşmaktadırlar. Hava sürüklenmemiş cürüflu serilerde 7. günde en kötü performansı sergileyen karma lifli seri (S03), 90. günde en yüksek dayanım seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 7.6).

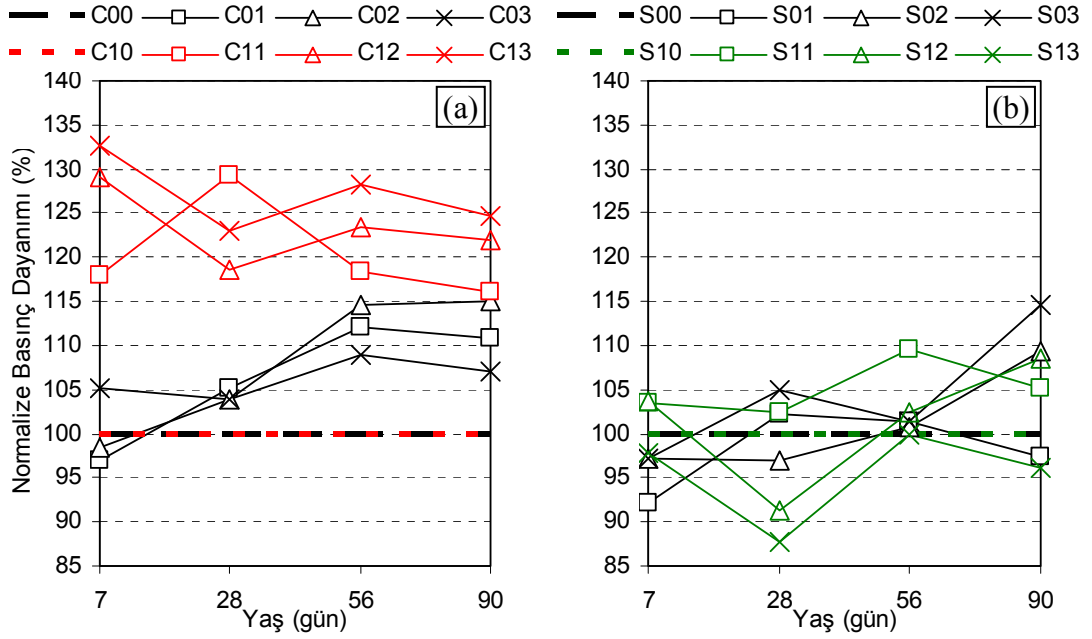
Hava sürüklenmiş serilerde (yeşil renkli) 7 günlük bağıl dayanımlara bakıldığında lifsiz matrisin cüruf ikamesine pozitif yanıt verdiği ve %12 dayanım artışı sağladığı görülmektedir. Ancak lifli seriler cüruf ikamesi sonucu erken dönemde %2 (S11) ile %17 (S13) oranında dayanım kaybına uğramışlardır. 28. günde lifsiz matrisin (S10) dayanımının hızla geliştiği (%27 artış), lifli serilerde cüruf ikamesi sonucu oluşan dayanım kayıplarının azaldığı, cürüflu matristeki makro liflerin ise çimentolu matrisle aynı performans seviyesine eriştiği görülmektedir. 56. günde cüruf ikamesi yalın KYB’de %15 dayanım artışı sağlamıştır ve bu değer 28 günlük sağladığı artışın altında kalmıştır. Makro lifli seride (S11) 56. günde cüruf ikamesi sonucu kontrol serisinin değeri %5 mertebelerinde aşılmıştır. 90. günde lifsiz ve makro lifli serilere cüruf ikamesi sonucu oluşan dayanım artışı sabitlenmiş ve sırasıyla %15 ve %5 seviyelerinde kalmıştır. Karma lifli KYÇLB’ye cüruf ikamesinin olumsuz performansı 90. günde de değişmemiştir ve %12 (S13) kayıp görülmektedir. Mikro lifli matrise cüruf ikamesi sonucu 56. günden 90. güne performans artmış ve dayanımlar çimentolu kontrolünü az da olsa aşmıştır (Şekil 7.6).

Hava sürüklenmiş serilerde cüruf ikamesinin yarattığı davranış irdelenecek olursa cüruf ikamesi lifsiz KYB’de tüm yaşlarda dayanım artışına (%15 mertebelerinde) sebep olmuştur. Dayanım artış oranı 28. günde tavan yapmıştır. Erken dönemde mikro lif içeren (S12 ve S13) serilere cüruf ikamesi net bir olumsuz etki yaratmıştır. 28. günden itibaren yalnızca makro lif içeren matrislere katılan cüruf, çimentolu kontrolünden daha büyük dayanımlara çıkılmasına sebep olurken yalnız mikro lif içeren seride (S12) bu davranış 90. günde yakalanmıştır. Karma lifli seri ise 7. günde yaşadığı %17’lik kaybı 90. günde %12’ye düşürebilmiştir. Hava sürüklenmiş cürufli KYB’lerde matris dayanımının zamanla artması lif – matris ara yüzeyinin de zamanla gelişmesine sebep olmaktadır. Ancak hava sürüklenmiş karma lifli KYÇLB’ye cüruf ikamesi 90 günde telafi edilememiş bir miktar dayanım kaybına sebep olmuştur (Şekil 7.6).

Hem hava sürüklenmiş hem de hava sürüklenmemiş serilerde cüruf ikamesi genel olarak nihai (90 günlük) dayanımları arttırmıştır. Artış zamanla görülmektedir. Puzolanik reaksiyonlar sonucu lif – matris ara yüzeyinin de zamanla geliştiği ve çimentolu matristen daha iyi performans sergilemesi için genel olarak 56 gün ve üzeri kür süresine ihtiyaç duyduğu söylenebilir. Liflerin cüruf ikamesine verdikleri reaksiyon zamanla değişmekte olsa da 90. günde karma lifin hava sürüklenmemiş seride (S03) en iyi davranırken, sürüklenmiş seride en kötü (S13) düşüşü yaratması göze çarpmaktadır (Şekil 7.6). Bu durum C13 betonu sürüklenen %1 hava için en az dayanım kaybına uğrayan betonken, S13’ün en çok dayanım kaybına uğrayan beton olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 7.1).

Şekil 7.7’de tüm serilerde çelik lifin zaman içinde basınç dayanımına etkisi verilmektedir. Bu grafikte çelik lifin lifsiz kontrol betonlarına göre yarattığı etki ve zamanla değişimi sunulmaktadır. %100’den geçirilen kesikli çizgi lifsiz betonun ilgili yaştaki dayanımının referans alındığını göstermektedir.





Şekil 7.7 Çelik liflerin çimentolu (a) ve cürüflu (b) serilerde basınç dayanımına etkisi.

Şekil 7.7’de verilen iki ana grafiğin birinde çimentolu matrise sahip betonlar (a), ve diğerinde ağırlıkça %50 cüruf ikame edilmiş betonlar (b) irdelenmektedir. Hava sürüklenmemiş çimentolu seriler incelendiğinde (a) 7. günde karma lif kullanımının dayanımı %5 mertebesinde arttırdığı ancak diğer lif kombinasyonlarının dayanım kaybına (%2-3) neden olduğu gözükmektedir. 28. günde tüm liflerin yaklaşık %5’lik bir katkısı vardır. 56. günde %14,12 ve %9 ile sırasıyla mikro, makro ve karma liflerin katkısı gözükmektedir. 90. günde bu sıralama değişmeden benzer dayanım artışları sürmektedir. Hava sürüklenmiş çimentolu serilere bakıldığında 7. günden itibaren liflerin dayanımı arttırdığı görülmektedir. 7. gün için karma lifler %33, mikro lifler %29, makro lifler %18 dayanım artışı yaratmaktadırlar. 28. günde karma ve mikro liflerin sağladığı dayanım artışı %10 mertebesinde düşerken, makro lifler %12 daha dayanım artışı yaratarak %30’luk bir katkıya erişmişlerdir. 56. günde karma lif %28, mikro lif %23, makro lif %18 dayanım artışı yaratmıştır. 90. günde 56. günde yapılan katkılar %1 ila 3 azalsa da sıralama değişmemiştir. 90. günde karma liflerin en büyük katkıyı yaparken makro liflerin en düşük katkıyı yaptıkları ve bu katkılar arasında %10’luk bir fark olduğu görülmektedir. Şekil 7.7 (a)’da dikkati çeken hava sürüklenmemiş serilerde liflerin 7. günden 90. güne mevcut katkıları artarak devam ederken, hava sürüklenmişlerde bu katkıların zamanla

azalmasıdır. Hava sürüklenmiş matrisin erken dönemde sergilediği zayıf performansın liflerce artırıldığı ancak matris sağlamlaştıkça liflerin çarpıcı etkisinin az da olsa azaldığı şeklinde bir yorum yapılabilir. Bu durum liflerin hava sürüklenmemiş matriste dayanım kazanma hızlarını düşürmesiyle yani ilerleyen dönemlerde nihai dayanımlarına yaklaşmalarıyla ve hava sürüklenmiş matrislerde ilk 7 günde liflerin dayanım artış hızını arttırmasıyla paralellik göstermektedir (Şekil 7.2). Sonuç olarak hava sürüklenmiş KYB’lerde lif ikamesi hava sürüklemenin getirdiği dayanım düşüşlerini azaltmada etkilidir. Hava sürüklenmemiş KYB’lerde ise çelik lifler ilerlemiş yaşlarda etkin olmaktadır.

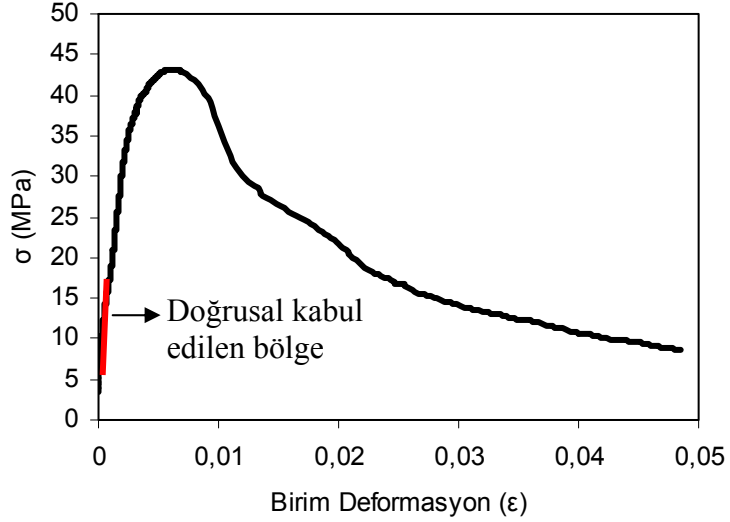
Şekil 7.7’de hava sürüklenmemiş cürufli serilerde liflerin dayanıma etkisi (b) incelendiğinde çelik liflerin 7. günde dayanımı %3 (S02 ve S03) ile %7 (S03) düşürdüğü görülmektedir. 28. günde karma ve makro lifler %5 ve %2 dayanım artışı yaratırken mikro lifler (S02) 7 günde yarattığı kayıp seviyelerinde kalmıştır. 56. günde tüm lif kombinasyonları yalın KYB ile aynı basınç değerlerine gelmişlerdir. 90. günde karma lif kullanımı %15, mikro lif kullanımı %10 dayanım artışı yaratırken, makro lif kullanımı yalın betonun dayanımının %4 gerisinden gelmektedir. Görüleceği üzere erken dönemde (7 gün) dayanım düşüşü yaratan çelik lif kullanımı, 28 günden itibaren dayanım kazandırmaya başlamış ve 90. günde makro lif dışında %10 – 15 gibi hatırı sayılır bir değerde dayanım artışı yaratmıştır. Bu durum hava sürüklenmemiş cürufli matriste çelik lif kullanımının makro lifler dışında dayanım kazanma hızını yavaşlatmasıyla paralellik göstermektedir (Şekil 7.3).

Hava sürüklenmiş cürufli matriste çelik liflerin etkisi incelendiğinde (Şekil 7.7 - b) 7. günde mikro ve makro liflerin dayanımı %4 mertebelerinde arttırdığı, karma lif kullanımının %3 azalttığı görülmektedir. 28. günde makro lifler dayanıma %3’lük katkısı sürerken, mikro ve karma lif kullanımının %9 – 13 değerinde azalttığı görülmektedir. 56. günde makro lifin katkısı %10’lara ulaşırken, mikro ve karma lifler yalın beton dayanımına erişmektedir. 90. günde mikro lifler %10 dayanım artışına erişirken makro lifli seri %5 artış seviyesine gerilemiştir. Genel eğilim olarak hava sürüklenmiş matriste çelik lifler erken dönemde (7 gün) yalın KYB

performansına yakın dayanım seviyeleri yaratmışken 28. günde bir miktar düşüş yaratmaktadırlar. Ardından 56. günde yalın matrisin performansı yakalanırken nihai dayanım olarak 90. günde karma lif dışında % 5 -10 mertebelerinde dayanım artışları yaratmaktadırlar. Şekil 7.3'e bakıldığında lifsiz beton (S10) erken dönemde lifli serilere yakın değerlerde dayanım kazanma hızına sahipken nihai dayanımına 28. günde yani liflilerinden daha önce erişmektedir. Bu durum dayanımın gelişmesine rağmen ara yüzeyin daha geç geliştiğine işaretler. İlk 7 günde hava sürüklemenin yarattığı dayanım kayıpları cürüflü matriste lifler tarafından karşılanabilirken 28. günde matrisin gelişmesine paralel lif – matris aderansı süreksizlik yaratan bir etmen rolüne dönmekte ve ardından zamanın ilerlemesi ile dayanım artışı yaşatmaktadırlar. Hava sürüklenmiş cürüflü KYB'lerde çelik liflerin katkısını yardımcı ve ana fayda olarak ayırabiliriz. Yani erken dönemde sürüklenmiş hava boşluklarının yarattığı dayanım kayıplarını karşılayabilmeleri “yardımcı fayda”, aderansın gelişmesiyle yalın hallerine göre sergiledikleri ileriki dönem faydası olan “ana fayda” terimleri yanlış olmayacaktır.

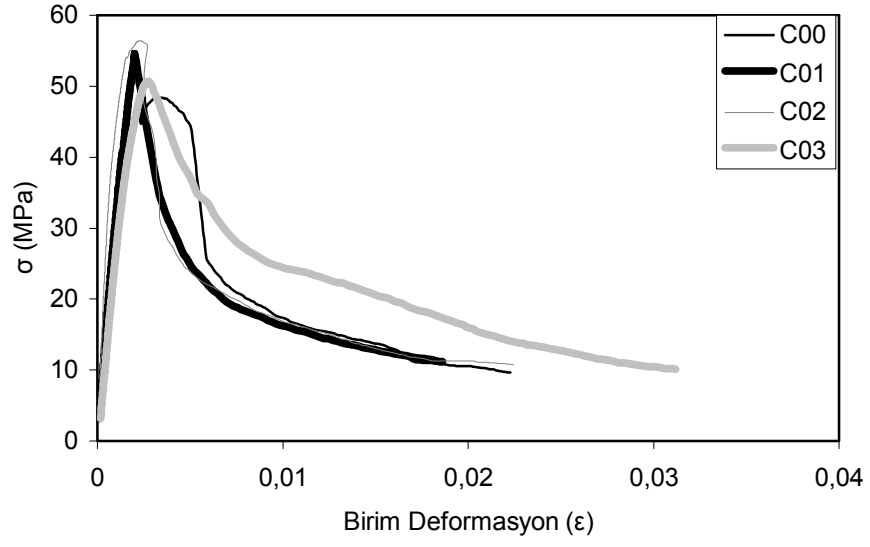
## 7.2 Elastisite Modüllerinin (E) Değerlendirilmesi

Elastisite modülleri en küçük kareler yöntemi ile hesaplanmıştır. Gerilme – birim deformasyon eğrisinin doğrusal kabul edilen kısmı 5 MPa ve maksimum gerilmenin (dayanımın) %40'ı arasındaki noktalardır. Şekil 7.8'de deneylerden elde edilen tipik bir lifli serinin gerilme ( $\sigma$ ) – birim deformasyon ( $\epsilon$ ) eğrisi verilmektedir.

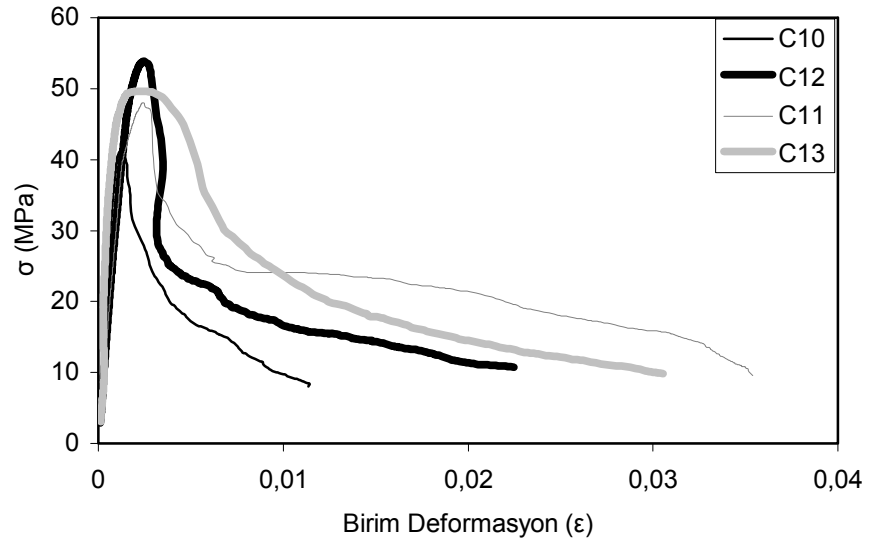


Şekil 7.8 KYÇLB'de basınç altında tipik bir  $\sigma - \epsilon$  eğrisi (C02).

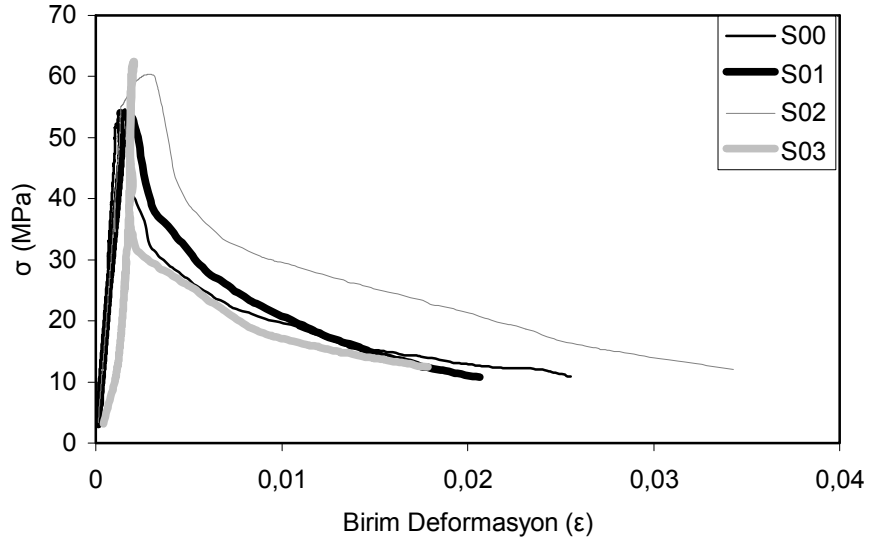
Tek eksenli basınç yüklemesi sonucu elde edilen  $\sigma - \epsilon$  eğrileri şekil 7.9, 7.10, 7.11, 7.12'de gösterilmektedir. Tüm yaşlardaki grafikler elde edilmiştir fakat 90 günlük numunelerden ilgili serinin ortalama performansına yakın olan numunelerin grafikleri verilmiştir.



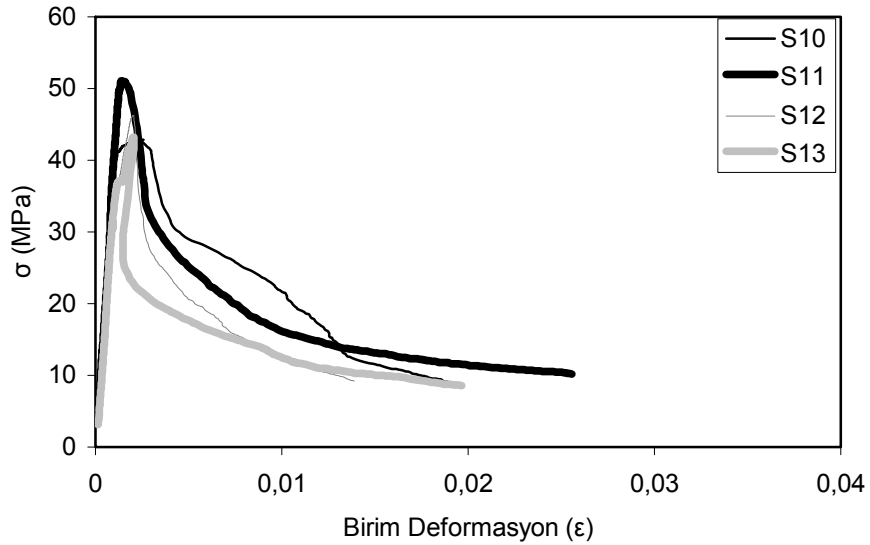
Şekil 7.9 Hava sürüklenmemiş çimentolu serilerin  $\sigma - \epsilon$  eğrisi .



Şekil 7.10 Hava sürüklenmiş çimentolu serilerin  $\sigma - \epsilon$  eğrisi.



Şekil 7.11 Hava sürüklenmemiş cürüflu serilerin  $\sigma - \epsilon$  eğrisi.



Şekil 7.12 Hava sürüklenmiş cürüflu serilerin  $\sigma - \epsilon$  eğrisi.

Deneylede maksimum gerilmenin %80'ine inilene kadar yükleme sürmüştür. Deneylede sırasında maksimum yüke kadar sağlıklı deformasyon okumalarının gerçekleştirilebildiği ancak numunenin dağılma sürecinde yani pik gerilme sonrası kuyruk aşamasında bazı sorunlarla karşılaşılmıştır. LVDT'lerin (deformasyon ölçen cihazlar) bağlı olduğu çerçevenin betonun dağılma aşamasında destek gibi

davranarak yada numuneye tutturulduğu bölgelerdeki gerilme yığılmalarından dolayı bu bölgeleri çatlatarak yanlış okumalara sebep olabildiği görülmüştür. Ayrıca lifsiz seriler için 0,2 KN/s gibi düşük bir hızda kuyruk bölgelerinin elde edilebildiği görülmüştür. Bu da deneyin çok uzun sürmesine sebep olduğundan lifli seriler için kuyruğun okunabildiği arttırılmış bir yükleme hızı (0,6 KN/s) uygulanmıştır.

Şekil 7.9, 7.10, 7.11 ve 7.12 incelendiğinde tüm serilerim nihai birim deformasyon değerlerinin 0,01 – 0,04 aralığında olduğu görülmektedir. Yalnız KYB'lerin, KYÇLB'ye kıyasla daha az nihai birim deformasyonla deneyi sonlandırması beklenirken çelik lifli seriler kadar deformasyon yapabilmişlerdir. Buradan hareketle 40 kg/m<sup>3</sup> (hacmen yaklaşık %0,5) çelik lif dozajının betonun kırılma sonrası sünek davranış kazanması için çok etkili olmadığı ve az da olsa süneklik davranışının çok düşük yükleme hızlarında görülebileceği söylenebilir.

Basınç dayanımı tayini sonrası numuneler gözlendiğinde lif içermeyen KYB'lerin tuz buz olduğu yada dağıldığı gözlenirken KYÇLB'lerin hala bir miktar yük taşıyacak kadar bütünlük içerisinde olduğu görülmüştür. Ayrıca mikro lifler bu dağılmayı daha çok engellemiştir. Sayıca makro (ZP305) liflerden daha çok sayıda olmaların matrisin her tarafında dağılmayı önleyici rol almalarına sebep olmuştur. Karma lif kullanımı da makro lif kullanımına göre dağılmayı daha çok engellemiştir. Bunun sebebi içerdikleri 20 kg/m<sup>3</sup>'lük mikro (OL 6/16) lifleridir (Şekil 7.13). Bu etkinin lif dozajının ve matris dayanımının artmasıyla daha da belirginleştiği El-Dieb (2009)'in çalışmasından görülmektedir.



Şekil 7.13 Basınç deneyi sonrası liflerin dağılıma azaltıcı etkisi.

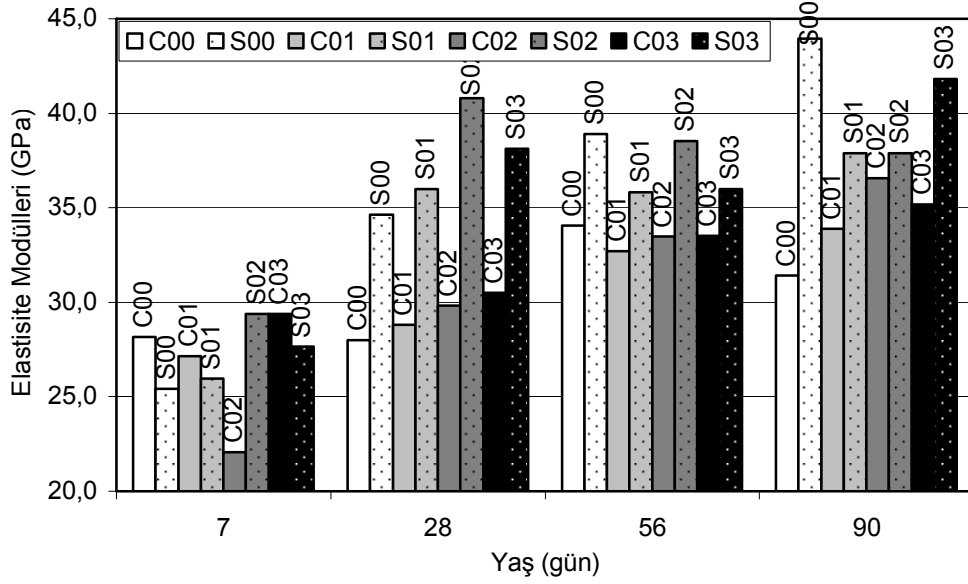
Tablo 7.2’de 7, 28, 56 ve 90 günlük (su kürü) numunelerin deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama elastisite modülleri verilmiştir.

Tablo 7.2 KYB elastisite modülleri .

<b>Beton kodu</b>	<b>Birim</b>	<b>Yaş (gün)</b>			
		<b>7</b>	<b>28</b>	<b>56</b>	<b>90</b>
C00	GPa	28,2	28,0	34,1	31,4
C01		27,1	28,8	32,7	33,9
C02		22,1	29,8	33,5	36,6
C03		29,4	30,5	33,5	35,2
C10		27,7	28,8	31,2	30,0
C11		25,5	30,5	34,7	34,1
C12		26,4	30,4	31,5	33,4
C13		28,8	29,5	35,0	32,4
S00		25,4	34,6	38,9	44,0
S01		26,0	36,0	35,8	37,9
S02		29,4	40,8	38,5	37,9
S03		27,7	38,1	36,0	41,8
S10		27,4	33,9	33,1	31,1
S11		30,0	34,5	34,1	36,3
S12		28,5	31,6	32,7	35,7
S13		30,1	31,0	36,2	37,7



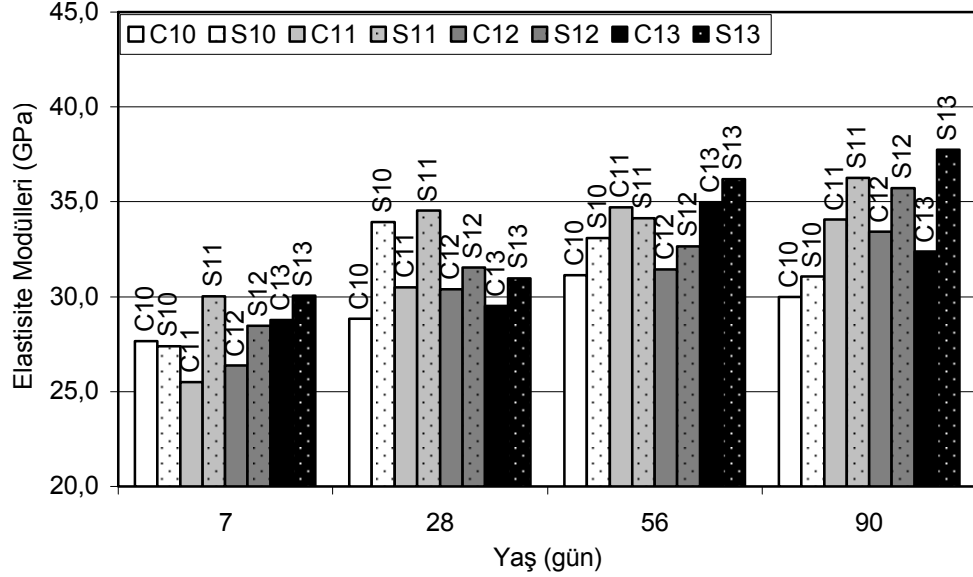
Şekil 7.14'te hava sürüklenmemiş “C” ve “S” serilerinin elastisite modülleri verilmektedir.



Şekil 7.14. Hava sürüklenmemiş “C” ve “S” serilerinin elastisite modülleri.

Şekil 7.14'ten genel eğilime bakıldığında hava sürüklenmemiş “C” serisi betonlarda ilk 7 günde lif kullanımının elastisite modüllerini düşürebildiği, 28. günde liflerin elastisite modülünü arttırdığı, 56. günde lifli – lifsiz elastisite modüllerinin benzer değerlerde olduğu ve nihai olarak 90. günde lif kullanımının elastisite modüllerini arttırdığı görülmektedir. Hava sürüklenmemiş “S” serisi betonlarda lif kullanımının 28. güne kadar elastisite modülünü arttırdığı, 56. gün ve sonrasında lifsiz modüllerin altında bir elastisite modülü yarattığı görülmektedir. Hava sürüklenmemiş matrislerde ikamesinin erken dönemden sonra belirgin şekilde elastisite modülünü arttırdığı görülmektedir. Bu ilişkiler basınç dayanımının gelişimiyle de yakından ilgilidir. Yaşa ilerledikçe bazı serilerde az da olsa düşüş görülmektedir. Bu durum ortalaması alınan numune sayısının kısıtlı olmasından, deneysel değişkenliklerden kaynaklanabilir.

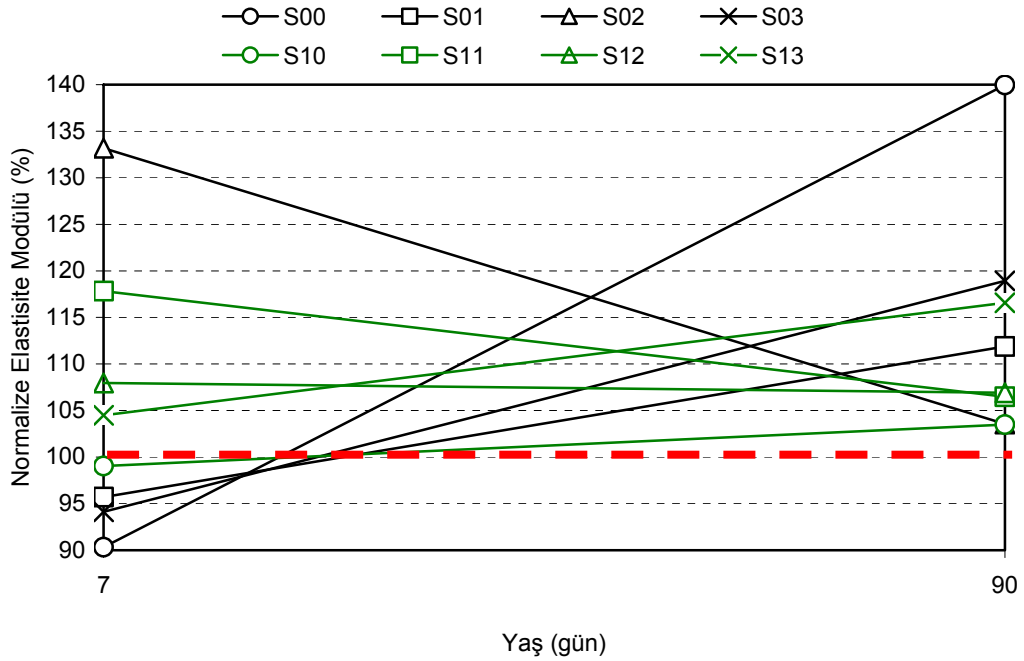
Şekil 7.15'te hava sürüklenmiş “C” ve “S” serilerinin elastisite modülleri verilmektedir.



Şekil 7.15 Hava sürüklenmiş “C” ve “S” serilerinin elastisite modülleri.

Şekil 7.15'e bakıldığında hava sürüklenmiş “C” serisi betonlarında elastisite modülüne lif etkisi erken dönemde olumsuz olabilmektedir. Bu azalmalar çok küçük değerlerde de olsa beton yaşıyla ilintili gibi gözükmemektedir. Çünkü 7. günden sonra lifler elastisite modülünü literatürde beklenebilecek miktarda (Yiğiter, 2002; DSİ, 1994) arttırmaktadırlar. Hava sürüklenmiş “S” serisi betonlarda ise liflerin her yaşta karmaşık etkiler gösterebildiği görülmektedir. Zamanla elastisite modüllerinin lokal düşüşler dışında genelde arttığı görülmektedir. Cüruf ikameli KYB'lerin tüm yaşlarda sırf çimento içeren matrislerden daha büyük elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 7.16'da ağırlıkça %50 cüruf ikamesinin tüm serilerde zamana bağlı olarak yarattığı etki bağıl olarak gösterilmektedir. “C” serisine cüruf ikamesi ile oluşturulan seriler “S” kodu ile adlandırılmaktadır. Bu grafikte erken (7) ve ileri dönem (90) elastisite modülleri kıyaslanarak net etki görülmeye çalışılmıştır.



Şekil 7.16 Ağırlıkça %50 cüruf ikamesinin elastisite modüllerine etkisi.

Şekil 7.16’da kırmızı kesikli çizgi ilgili kontrol serisinin (örneğin S00 için bu çizgi C00’ı temsil etmektedir) elastisite modülünün referans alındığını göstermektedir. Hava sürüklenmemiş seriler incelendiğinde cüruf ikamesinin erken dönemde (7. gün) makro ve karma lif kullanılan matrislerde (S01, S03) %5, yalın matrislerde %9 elastisite modülü kaybı yarattığı bunlara karşı mikro lif içeren matrislerde (S02) %33 artış sağladığı görülmektedir. Cüruf ikameli bu matrisler erken dönemde çimentolu serilere göre %5 - %12 arasında daha az basınç dayanımına sahiptirler (Şekil 7.6). S02 (mikro lif) serisi 7. günde C02’den daha az basınç dayanımına sahipken elastisite modülünün daha yüksek (%33) olduğu görülmektedir. İleriki yaşlarda (90. gün) S02 betonunu sağladığı artış azalmışken, 7. günde düşüş yaşatan matrislerin 90. günde %12 ila %40 arasında elastisite modülü artışı yarattıkları görülmektedir. Dikkati çeken lifsiz matrisin (S00) 7. günde %10 kayıp yaşarken 90. günde %40 artış göstererek en yüksek modüle sahip olmasıdır. Cüruf ikamesinin 90. günde tüm matrislerde elastisite modülünü arttırdığı gözlenmektedir. Cüruf ikamesi 7. günde basınç dayanımı kaybı yaratırken 90. günde bu farkın kapanıp artışa dönüşmesi davranışı elastisite modülleri için de geçerlidir. Puzolanik reaksiyonların ilerlemesiyle elastisite modülleri de yükselmiştir ve çimentolu matrisi geçmiştir.

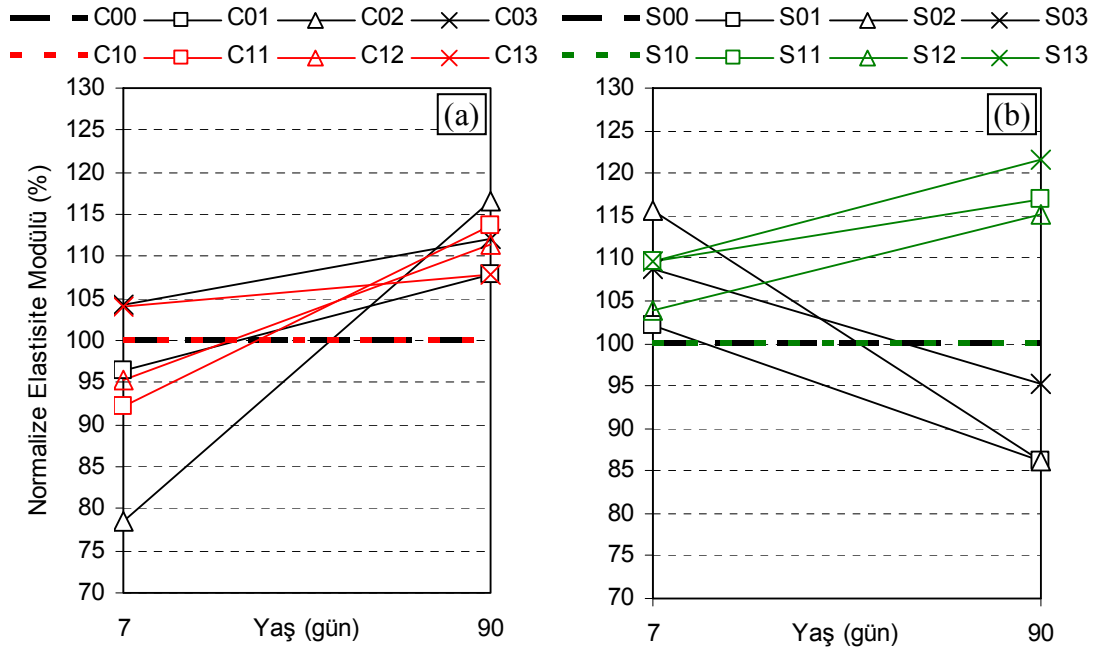
Hava sürüklenmiş matrislerde cüruf ikamesi yalın matris (S10) dışında hem 7. hem 90. günde çimentolu kontrollerinden daha yüksek (%5 - %20) elastisite modülü oluşmasına sebep olmuştur. 7. günde makro lifli matrisin (%17), 90. günde karma lifli matrisin cüruf ikamesi ile en büyük modül artışı yaşadığı görülmektedir. S13 serisinin C13 serisinde 90. günde %10 daha az basınç dayanımına sahip olmasına karşın %17 fazla elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. Diğer dikkat çeken de S10 lifsiz matrisinin kontrolünden (C10) 90. günde %15 fazla basınç dayanımına sahipken elastisite modülünün C10 ile aynı mertebelerde oluşudur (Şekil 7.16).

Genel bir değerlendirme olarak hava sürüklenmemiş serilere cüruf ikamesinin erken dönemde (7.gün) elastisite modülü kayıplarına sebep olabildiği fakat 90. günde tüm serilerde elastisite modülü artışı yarattığı görülmektedir (%4 ila %40). En fazla artış lifsiz matriste (%40) olmuştur. Hava sürüklenmiş serilerde ise cüruf ikamesinin hem erken hem ileriki dönemde elastisite modülünü arttırdığı görülmektedir. En büyük artış %17 ile karma lifli seride olmuştur (Şekil 7.16).

Ağırlıkça %50 gibi yüksek bir cüruf ikamesinin hava sürüklenmemiş matrislerde ileriki dönemlerde, hava sürüklenmiş matrislerde erken dönemden itibaren elastisite modülü artışına sebep olduğu görülmektedir. Lokal düşüşler göz önüne alınmazsa (basınç dayanımlarında S01 ve S13), cürufun hem basınç dayanımında hem de elastisite modülünde zamanla gelişen puzolanik reaksiyonlarından dolayı nihai olarak (90 gün) artış yarattığı görülmektedir. Cürufun hava sürüklenmiş matrislerde erken dönemde basınç dayanımını düşürebilirken elastisite modülünü arttırması, betonun lineer davrandığı kabul edilen bölgede (maksimum yükün %40'ına kadar) bir fayda getirmesiyle açıklanabilir. Hava sürüklenmiş matrislerde yüksek bağlayıcılık özellikli ince öğütülmüş cüruf partiküllerinin, çimentoya kıyasla daha uygun boşluk dağılımı yaratarak Hooke kanununun geçerli olduğu kabul edilen bölgede elastik oturmayı azalttığı söylenebilir. Ayrıca hava sürükleme etkisinde daha sıkı bir matris oluşturarak mikro çatlak sayısını ve yük altındaki genişlemesini azaltması bu mekanizmaya destek veriyor olabilir. Hava sürüklenmiş ve sürüklenmemiş matrislerde basınç dayanımını erken dönemde düşürebilmesi ise maksimum yükün %40'lık bölümünün aşılmasından sonra görülen makro çatlak safhasıyla alakalıdır.

Maksimum yükün %40'ı aşıldığında cürufllu matris bağlarının, puzolanik reaksiyonların yavaş gelişiminden dolayı çimentolu matrisin bağlarından daha zayıf kaldığı ve daha düşük yükte makro çatlak gelişimi oluşturarak göçmeye sebebiyet verdiği söylenebilir (Şekil 7.16).

Şekil 7.17'de tüm serilerde erken (7 gün) ve ilerlemiş (90 gün) dönemde çelik liflerin elastisite modülüne etkileri bağli olarak gösterilmektedir. Bu grafikte çelik lifin lifsiz kontrol betonlarına göre yarattığı etki ve zamanla değişimi sunulmaktadır. %100'den geçirilen kesikli çizgi lifsiz betonun ilgili yaştaki elastisite modülünün referans alındığını göstermektedir.



Şekil 7.17 Çelik liflerin çimentolu (a) ve cürufllu (b) serilerde elastisite modülüne etkisi.

Şekil 7.17 (a)'dan "C" serisi hava sürüklenmemiş KYB'ler incelendiğinde 7. günde karma lif kullanımının (C03) %5'lik bir elastisite modülü artışı yaratırken diğer liflerin %4 - %22 arası düşüş yarattığı (lifsiz duruma göre) görülmektedir. 90. günde ise lif kombinasyonlarının elastisite modülünü %8 - %16 arttırdığı görülmektedir. Burada dikkati çeken mikro liflerin (C02) erken dönemde en büyük düşüşü (%22) yaratırken, 90. günde en büyük artışı (%16) yaratmasıdır. "C" serisi hava sürüklenmiş matrislere lif ilavesinin karma lif dışında (C13) erken dönemde %5 - %7

düşüş yarattığı, 90.günde tüm lif kombinasyonlarının %7 - %15 artış yarattığı görülmektedir. Ayrıca tüm “C” serilerinde liflerin yaş ilerledikçe lifsiz matrisle yetişip arayı açtığı görülmektedir. Bu durum tüm lif kombinasyonlarının 90. günde basınç dayanımında (Şekil 7.7) yarattığı artış etkisi ile paralellik göstermektedir.

Şekil 7.17 (b)’den “S” serisi hava sürüklenmemiş KYB’ler incelendiğinde 7. günde mikro lif kullanımının (S02) %15, karma lif kullanımının (S03) %10, makro lif kullanımının %3 (S01) elastisite modülü artışı yarattığı görülmektedir. 90. günde ise tersine karma lif (%5), makro ve mikro lif (%14) düşüş yaratmıştır. “C” serisi hava sürüklenmiş matrislerde 7. günde mikro lifler (S12) %15, karma lifler (S13) %9 ve makro lifler %2 artış yaratmıştır. 90. günde bu katkılar daha da artmıştır ve tüm lifler için %15 (S12) - %21 (S13) aralığında elastisite modülü artışı görülmektedir.

Basınç dayanımlarında 7. ve 90. günde tüm “S” serisi betonlarda lifler katkı ya da düşüş yaratabilirken (Şekil 7.7), elastisite modüllerinde hava sürüklenmişlerde 7. gündeki artış 90. günde daha da artmış bunun yanında hava sürüklenmemişlerde 7. gündeki artış 90. günde düşüş davranışına dönüşmüştür (Şekil 7.17).

### 7.3 Bölümle İlgili Genel Değerlendirme

- Hava sürükleyici hem lifsiz hem de lifli KYB’de basınç dayanımı düşüşlerine yol açmıştır. Bu davranış çimentolu ve cürüflü matrislerin ikisinde de mevcuttur. Hava sürüklenerek oluşturulan boşlukların matrisle makro-kusurlar gibi davranarak basınç dayanımını azalttığı bilinmektedir. Bu etkinin bazı lifli serilerde azaltılabileceği gözlenmiştir. Genel itibariyle çimentolu seride lif kullanımının hava sürüklenme sonucu dayanım kaybını kısıtladığını, cürüflü seride ise arttırdığını söylemek mümkündür.
- “C” serisi KYB’lerde hava sürüklemenin dayanım kazanma hızını azalttığı, lif kullanımı ile erken dönem dayanım kazanma hızının arttığı görülmektedir. Hava sürüklenmemiş serilerde lif ikamesinin dayanım artış hızını azalttığı görülmektedir.

- “S” serisi betonlarda mikro lifli seriler diğer liflerden daha geç dayanım kazanmaktadır. Bu durum mikro liflerin yarattığı büyük yüzey alanının puzolanik aktivite sonucu gelişmesinin daha uzun süre almasıyla alakalı olabilir.
- Genel olarak cürüflu matrislerin her durumda çimentolu matrislerden daha geç dayanım kazandığı ancak farkın büyük olmadığı görülmektedir. Puzolanik reaksiyonların zaman içinde ilerlemesi durumu burada da görülmektedir. Ancak kullanılan cürufun yüksek puzolanik aktivite indeksi (>90) ve ince öğütülmüş yapısından dolayı bu gecikme önemsiz mertebelere sahiptir.
- Hava sürüklenmiş ve sürüklenmemiş durumda cürufun nihai dayanımı arttırdığı görülmektedir. Cürüflu serilerde lif – matris aderansının zamanla daha da gelişmesinden dolayı çimentolu matristen daha iyi performans göstermesi için ortalama 56 günlük sürenin yeterli olduğu görülmektedir.
- Çimentolu hava sürüklenmiş matrislerde lif ikamesi sürüklenen hava sonucu dayanım düşüşü eğilimini kısıtlamada erken dönemden itibaren etkinken, hava sürüklenmemiş durumda liflerin katkısı ilerleyen yaşlarda netleşmektedir.
- Hava sürüklenmiş cürüflu matriste lifler erken dönemde yalın matrisle benzer dayanımlar göstermişlerdir. İlerlemiş yaşlarda ise % 5-10 mertebelerinde dayanım artışları yaratmaktadırlar. Cürüflu lifli matrisler erken dönemde hava sürüklemenin olumsuz dayanım etkisini yalın matris kadar göğüsleyebilirken 28. günde yalın matrisin gerisinde kalmaktadırlar. Ancak ilerlemiş yaşlarda lifsiz matrise yakın ya da daha büyük dayanıma sahiptirler. Bu durumla alakalı olarak erken dönemde sürüklenmiş hava boşluklarının yarattığı dayanım kayıplarını karşılayabilmeleri “yardımcı fayda”, aderansın gelişmesiyle yalın hallerine göre sergiledikleri ileriki dönem faydası olan “ana fayda” terimleri yanlış olmayacaktır.

- Liflerin basınç dayanımına olumlu ve olumsuz etkilerinin olabildiği ancak bu etkilerin düşük mertebede olduğu bilinmektedir. KYB’de ise liflerin özellikle ilerlemiş yaşlarda basınç dayanımına olumlu etkisinin olduğu görülmektedir. Özellikle mikro lifler ve karma kullanım nihai olarak en yüksek faydaları sağlamışlardır. Bu durum matrise bağlıdır. Mikro liflerin bu etkiyi gösterebildikleri bilinirken karma lif kullanımının da sinerjik etki yaratabildiği görülmüştür.
- Basınç yükleri altında yük – birim deformasyon davranışları incelendiğinde  $40 \text{ kg/m}^3$  dozajındaki lif ilavesinin yalın matrise kıyasla önemli bir faydasının olmadığı ve kuyruk bölgesi davranışının benzer olduğu görülmektedir. Faydanın düşük lif dozajlarında görülebilmesi için düşük yükleme hızlarının kullanılmasının gerektiği söylenebilir. Ancak lifler basınç deneyi sonrası göçmüş matrisi bir arada tutmakta ve mikro liflerin bu etkisinin daha kuvvetli olduğu görülmektedir.
- %50 gibi yüksek bir oranda yüksek fırın cürufu ikamesinin KYB’nin nihai olarak basınç yükleri altındaki performansını genel olarak arttırdığı görülmektedir. İnce öğütülmüş cürufun bu etkisi bir çok çalışmada saptanmıştır (Chang, 2004; Lawrence vd., 2005). Atık bir malzeme olan YFC’nin KYB ve KYÇLB içerisinde bu denli yüksek bir oranda değerlendirilebilmesi çevresel ve ekonomik açıdan önemlidir. Çalışmada cüruf ikamesi ile çimento dozajı  $518 \text{ kg/m}^3$ ’ten  $259 \text{ kg/m}^3$ ’e düşürülmüştür. Basınç deneyleri sonuçlarına göre yüksek puzolanik özellikli ince öğütülmüş YFC’nin daha da yüksek oranlarda ikamesi (%60) mümkündür. Ayrıca bu dayanımdaki bir KYB’de lif kullanımının asıl amacının eğilme mukavemeti ve kırılma enerjisi faydası olduğu düşünülürse  $40 \text{ kg/m}^3$  dozajında katılan çelik lif türlerinin basınç dayanımı üzerinde çok olumsuz bir etki yaratmayıp nihai olarak dayanım artışı sağlaması pozitif bir sonuçtur. Hava sürükleyicilerin dayanım düşürücü etkisi KYB ve KYÇLB için önemli



düzydedir ve don dayanıklılığı için katılsa da basınç performansını önemli derecede etkilediği unutulmamalıdır.

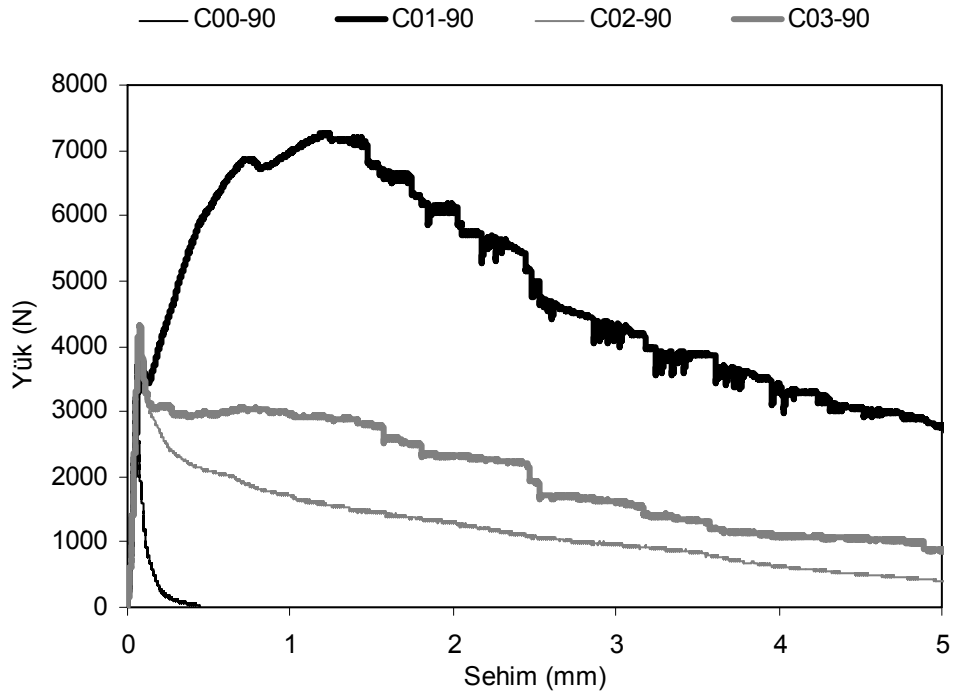
## BÖLÜM SEKİZ

### EĞİLME YÜKLERİ ALTINDAKİ PERFORMANS

Bu bölümde çentikli KYB örnekleri üzerinde uygulanan üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen yük – sehim grafiklerinin yapısı, dayanımların ve kırılma enerjilerinin beton yaşıyla değişimi incelenmiştir.

#### 8.1 Yük – Deplasman İlişkisi

Şekil 8.1’de hava sürüklenmemiş çimentolu serilerin 90 günlük yük – sehim eğrileri verilmektedir.

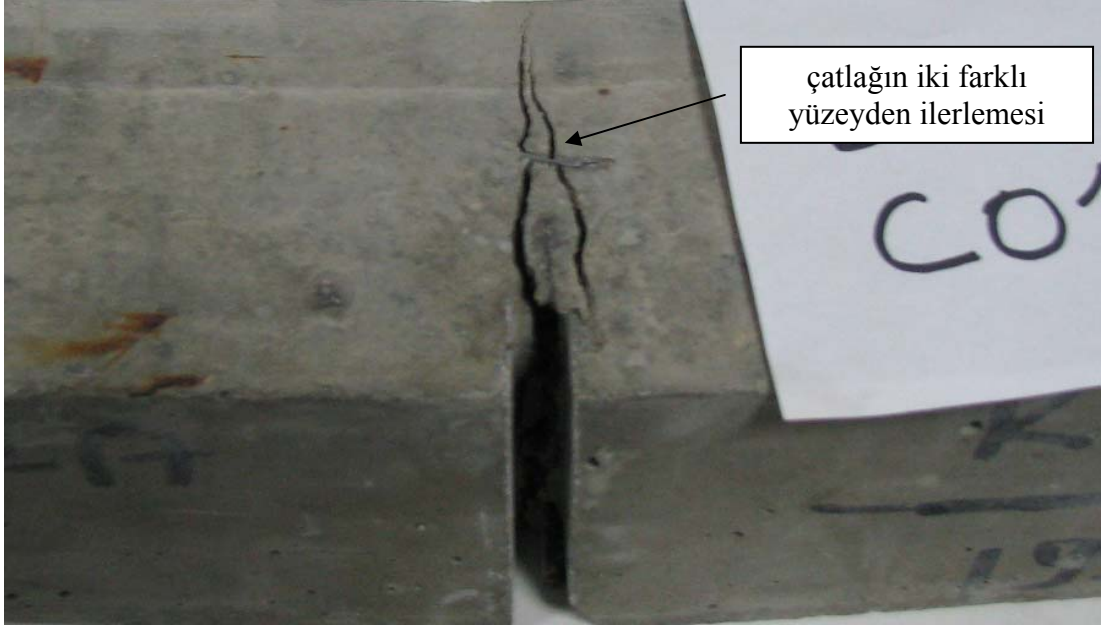


Şekil 8.1 Hava sürüklenmemiş “C” serilerinin 90 günlük yük – sehim eğrileri.

Şekil 8.1’den görüldüğü üzere lifsiz serilerin (C00) ilk çatlaktan sonra çok az bir sehim değerine kadar (<0,5 mm) kuyruk bölgesinin olduğu görülmektedir. İlk çatlak yükünden sonra gevrek kırılma görülmektedir. Yaş ilerlese de lifsiz serilerin davranışı önemli mertebede değişmemektedir. Mikro lifli seriye bakıldığında (C02) pik yükünden sonra deformasyon yumuşaması davranışı hakimdir. İlk çatlak yük

halen dayanımı belirleyen yüküdür. Karma lifli seri (C03) içerisindeki yüksek narinlikli ZP 305 lifleri bulundurması sebebiyle mikro lifli seriden daha yukarıda giden bir kuyruk bölgesine sahiptir. Ancak deformasyon sertleşmesi görülememektedir. Makro lif içeren seri (C01) net biçimde deformasyon sertleşmesi yaratmaktadır. Kuyruk bölgesi diğer lifli serilerden oldukça yukarıdadır ve tokluk değerleri çok yüksektir. Ayrıca 5 mm sehim değerinde bile taşınan yük halen önemli mertebelere sahiptir (maksimum yükün  $\approx\%40$ 'ı). Görüldüğü gibi tüm lifli seriler  $40 \text{ kg/m}^3$  çelik lif içermesine rağmen makro lif kullanımı dışında lifler belirgin bir deformasyon sertleşmesi yaratamamıştır. Bu durum lif dozajının ( $\approx\%0,5$ ) deformasyon sertleşmesinin mümkün olması açısından ZP 305 lifleri için kritik hacmin üstünde olduğunu, mikro lifler için kritik hacmin altında olduğunu ve yarı yarıya karma kullanılan durumda dahi bu hacmin güçlü bir deformasyon sertleşmesine olanak vermediğini göstermektedir. Benzer durum cürufu ve hava sürüklenmiş matrisler için de geçerlidir. Deformasyon sertleşmesi ve buna bağlı kritik lif hacminin lifli kompozitlerin performans sınıflandırması açısından önemli olduğu Naaman ve Reinhardt (2005)'in çalışmalarından görülmektedir.

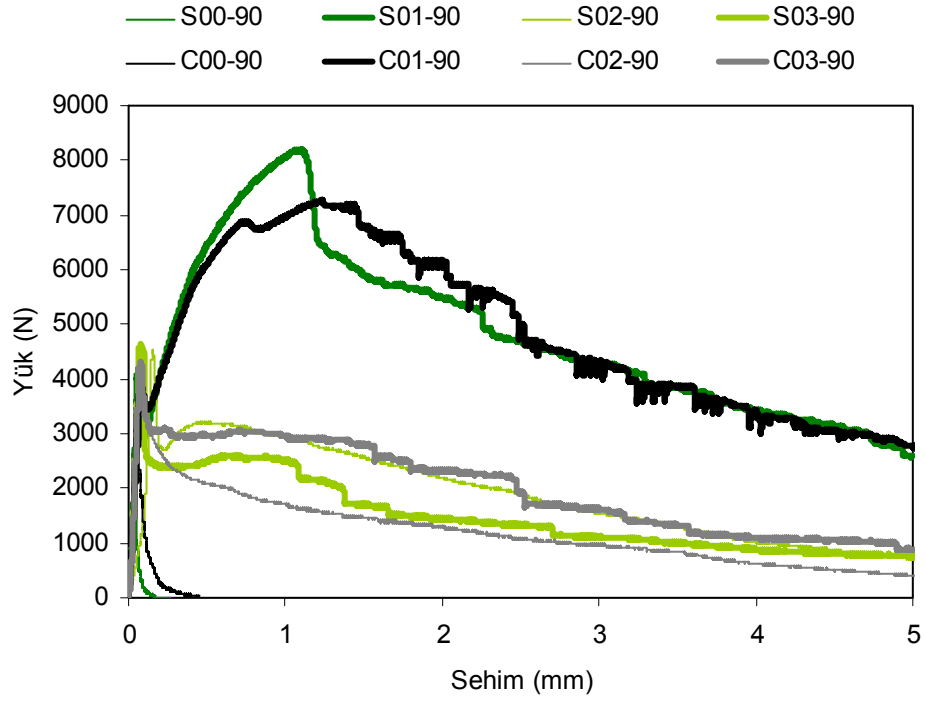
Şekil 8.1'de kuyruk bölgesinde görülen tırtıklar ani yük düşüşlerini ve toparlanmaları ifade etmektedir. Makro lifli serilerde görülen bu davranışın sebebi çatlağın en altında gerilme köprüleyen lifin kopmasından veya sıyrılmışından sonra diğer lifin devreye girmesi ve gerilmenin eski değerine yakın bir değere tekrar tırmanmasından kaynaklanmaktadır. Makro lifli serilerde adet olarak kesite çok lifin isabet etmemesi iki lif arasındaki mesafeyi açmaktadır. Ayrıca deformasyon sertleşmesi sonrası aşırı yüklenen makro lifler çengelli uçlarından dolayı ani kopabilmektedir. Bu durum lif – matris bağlantısının güçlü olduğunu göstermektedir. Deney sonrası ilerlemiş yaşlardaki bazı ZP 305 içeren örneklerde çoklu çatlak yapısının olabildiği ve makro liflerin halen matrisi güçlü biçimde tuttuğu görülmüştür (Şekil 8.2).



Şekil 8.2 Makro lif kullanımı sonucu eğilme sonrası görülen çoklu çatlak yapısı (C01).

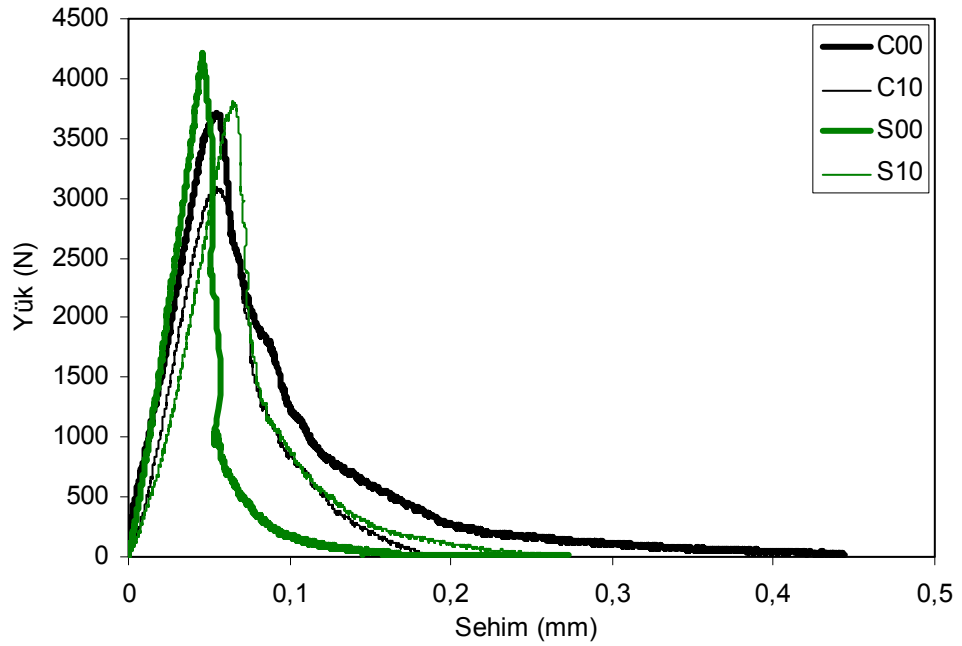
Şekil 8.2’de görülen çoklu çatlak yapısı kırılma enerjisi seviyelerini oldukça arttırmaktadır. Ancak bu durum her numunede görülmemiştir. Yine de ZP 305 liflerinin hacimce %0,5 oranında kullanılması bile kırılma parametrelerini oldukça geliştirmektedir. ZP 305 liflerinin üstün performansı Yardımcı (2008)’nın doktora tezi kapsamında yaptığı çalışmalarda da görülmektedir. ZP 305’in çengelli uç geometrisi düz liflere göre önemli faydalar sağlamaktadır. Deney sonrası kırık yüzeyi incelendiğinde bazı liflerin koptuğu, çoğu lifin çengel kısmının düzleştiği görülmektedir. Bu aşamada harcanan enerji matrisin tokluğunu ve kırılma enerjisini önemli oranda arttırmaktadır.

Cüruf ikamesi sonucu çimentolu seriye benzer yük – sehim eğrileri elde edilmiştir. Nihai dayanımların bir miktar arttığı görülmektedir. Liflerin genel etkisi cürüflü matriste de çimentolu matristeki gibidir. Şekil 8.3’te çimentolu ve cürüflü hava sürüklenmemiş matrislerin 90 günlük yük – sehim eğrileri verilmektedir.



Şekil 8.3 Hava sürüklenmemiş “C” ve “S” serilerinin 90 günlük yük – sehim eğrileri.

Cüruf ikamesinin ve hava sürüklemenin lifsiz matrislerin yük – sehim eğrisine etkisi Şekil 8.4'ten görülmektedir.



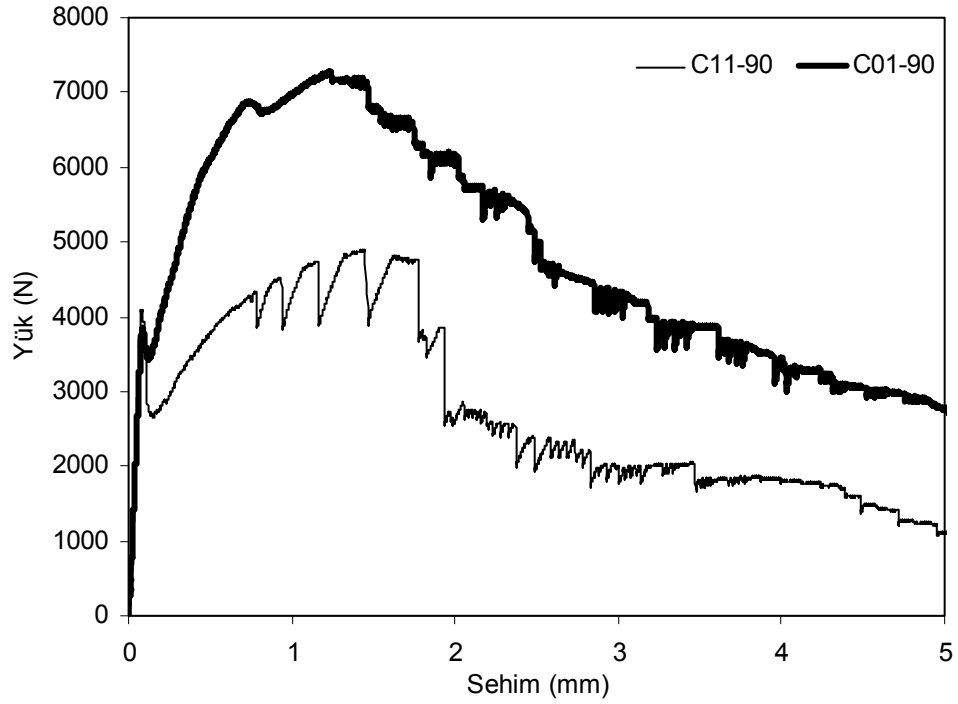
Şekil 8.4 Lifsiz “C” ve “S” serilerinin 90 günlük yük – sehim eğrileri.

Şekil 8.4'ten cüruf ikamesi sonucu lifsiz matrislerde pik yük değerinin (dayanımın) arttığı görülmektedir. Hava sürüklenme etkisinde çimentolu matriste pik yük düşmekteyken, kuyruk bölgesi kısalmaktadır. Ayrıca pik yüke kadar olan lineer kabul edilebilecek bölgenin hava sürüklenme sonucu bir miktar eğim kaybı yaşadığı görülmektedir. Yani ilk makro çatlak öncesi aynı yük değerlerinde daha çok sehim oluşmaktadır. Lifsiz matrislerin kırık yüzeylerine bakıldığında çatlağın agregayı yarararak gittiği görülmektedir (Şekil 8.5). Bu durumun sebebi matrisin ve agregaya – matris ara yüzeyinin çatlak için agregalardan daha zorlu bir yol (bu karışım özelliklerindeki betonda) olmasıdır.



Şekil 8.5 Çatlağın agregaları yarararak ilerlemesi (C00).

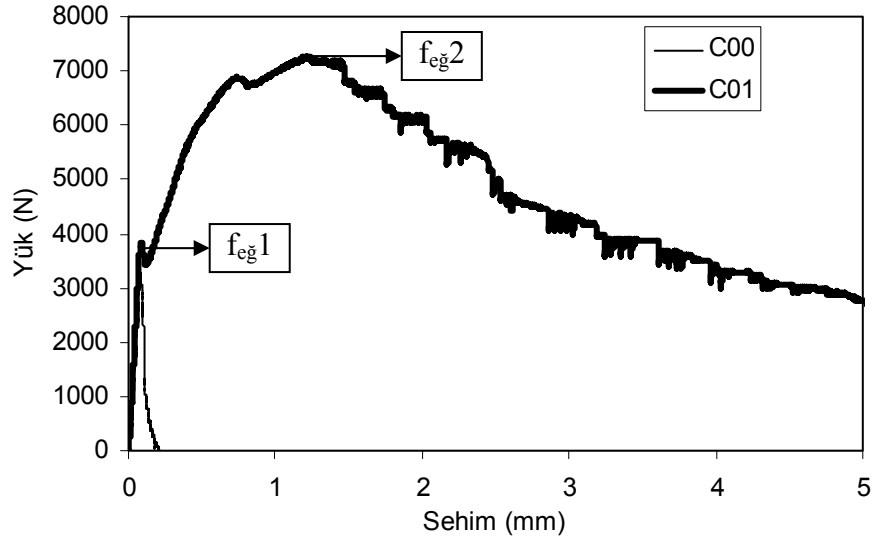
Lifli matrislere hava sürüklenme sonucu genellikle pik dayanımların düştüğü, deformasyon sertleşmesi davranışının görüldüğü serilerde bu davranışın zayıfladığı görülmektedir (Şekil 8.6). Bu iki etkinin kırılma enerjilerine etkisi deney sonuçlarında işlenmektedir.



Şekil 8.6 Hava sürüklenmemiş (C01) ve sürüklenmiş (C11) makro lifli serilerin 90 günlük yük – sehim eğrisi.

## 8.2 Eğilme Dayanımlarının ( $f_{eg}$ ) Değerlendirilmesi

Üç noktalı eğilme düzeneğinde sehim ve yüklerin beraber okunmasıyla elde edilen grafiklerde eğilme dayanımı hesabında maksimum yük kullanılmıştır. Bu yük kimi matrislerde ilk çatlak yükü ile aynıken kimi matrislerde deformasyon sertleşmesi davranışı sonucu ilk çatlak yükünden büyüktür (Şekil 8.7).



Şekil 8.7 Makro lifli C01 ve lifsiz C00 serisi için (90. gün) maksimum yüklerin farklı bölgelerde oluşu.

Şekil 8.7'den görüldüğü gibi C00 ve C01 numunelerinin ilk çatlak yükü birbirine çok yakındır. C00 lifsiz matrisi için bu ilk çatlak eğilme dayanımı yükü ( $f_{eg1}$ ) olurken, C02 numunesi için ZP 305 çelik lifi kullanımı ile oluşan deformasyon sertleşmesi sonucu yük tekrar artmış ( $f_{eg2}$ ) ve 1,2 mm sehim değerinde gecikmiş olarak oluşmuştur. Bu kırılma mekaniği davranışı kırılma enerjilerinin yorumlanmasında işlenmektedir.

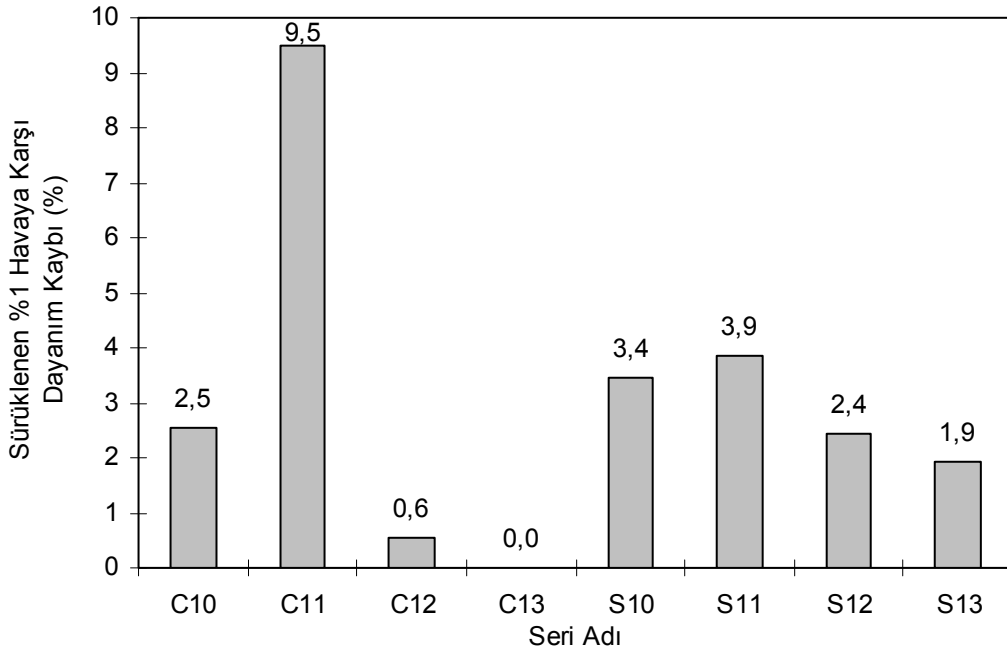
Tablo 8.1'de 7, 28, 56 ve 90 günlük (su kuru) numunelerin deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama eğilme dayanımları verilmiştir.



Tablo 8.1 KYB eğilme dayanımları

<b>Beton kodu</b>	<b>Birim</b>	<b>Yaş (gün)</b>			
		<b>7</b>	<b>28</b>	<b>56</b>	<b>90</b>
C00	MPa	6,2	6,5	6,3	6,2
C01		7,5	12,1	11,1	13,0
C02		7,1	6,8	7,1	7,2
C03		7,2	7,3	7,6	7,7
C10		5,3	5,4	5,1	5,5
C11		7,2	8,9	9,2	8,7
C12		6,3	6,9	7,0	7,1
C13		6,6	7,2	7,8	7,9
S00		6,6	6,8	7,5	7,7
S01		13,1	14,5	14,0	13,9
S02		6,2	7,8	8,4	8,0
S03		6,5	8,4	8,7	8,3
S10		5,7	6,1	7,2	6,6
S11		6,9	12,1	10,1	12,5
S12		6,1	7,0	7,7	7,6
S13		5,5	7,5	7,5	7,8

Şekil 8.8’de sırf çimentolu “C” serisi ve cüruf ikameli “S” serisi hava sürüklenmemiş KYB’lerin bünyelerinde var olan hava yüzdelere ilaveten katkı kullanarak sürüklenen her %1 hava için eğilme dayanımı kayıpları (%) verilmektedir. Bu değerler, hava sürüklenmemiş bir serinin (örn: C01) hava sürükleyici katkı eklenerek üretilen (örn: C11) serisiyle kıyaslanması sonucu bulunmuştur. Karşılaştırılan dayanımlar 90 günlük dayanımlardır. Bunu sebebi puzolanik bir malzeme olan cürufun çimentoya göre geç dayanım artışından kaynaklı haksız ve yanlış bir kıyaslama yapmamaktır. Ayrıca zamanla eğilme dayanımında görülebilen düşüşler çalışılan numune sayısının kısıtlı (3 adet) olmasından ve deneysel değişkenliklerden kaynaklanıyor olabilir.



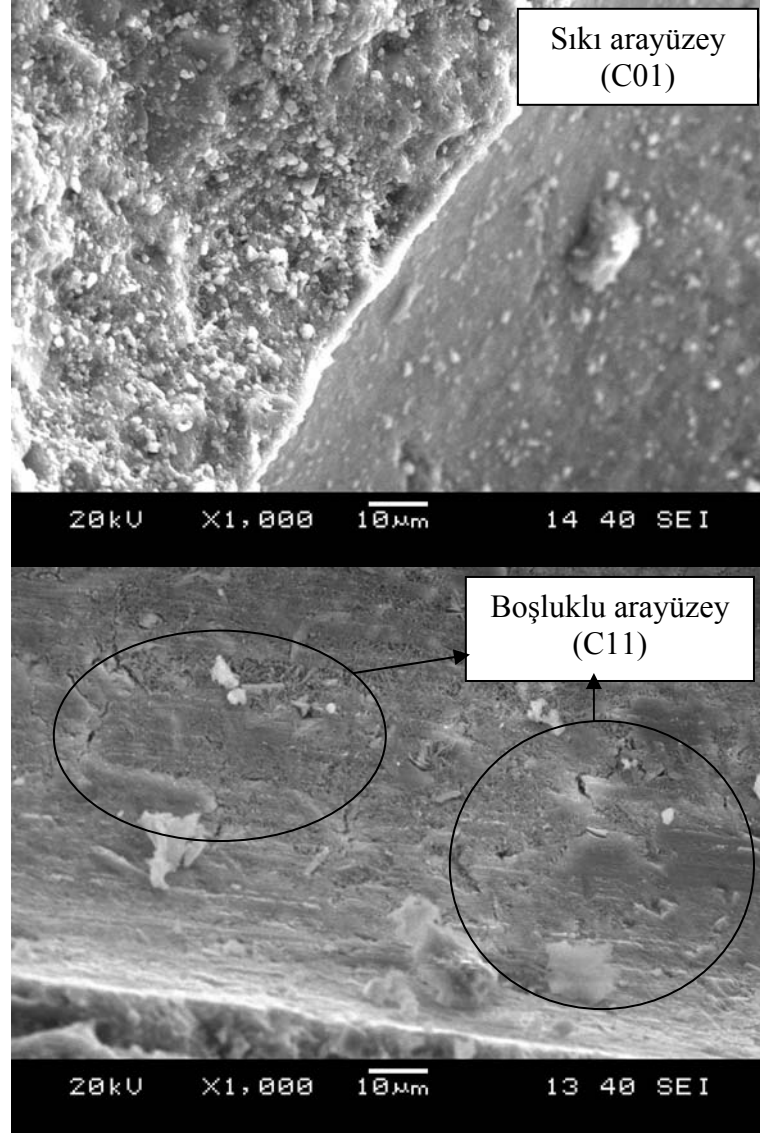
Şekil 8.8 %1 hava sürüklemeye (yalın matrisin hava içeriğine ilaveten) karşılık eğilme dayanımı kayıpları.

Şekil 8.8'den görüldüğü üzere 90 günlük nihai dayanımlara bakıldığında %5 – 6 arası hava içeren hava sürüklenmiş serilerdeki basınç dayanımı kaybı %0 ila %9,5 arasında değişmektedir. “C” serisi betonlarda C13 dayanım kaybetmemiştir. C10 serisi %2,5, C12 serisi %0,6 ve C11 serisi %9,5 dayanım kaybetmiştir. Burada dikkat çeken sonuçlardan biri C13 serisinin kayba uğramamasıdır. ZP305 ve OL 6/16 liflerinin karma olarak kullanılması hava sürüklemenin yarattığı matris süreksizliklerini en iyi şekilde karşılamıştır. Ancak C11 serisinin hava sürükleme sonucu %9,5 gibi büyük değerde eğilme dayanımı kaybetmesi makro liflerin deformasyon sertleşmesi davranışında havanın olumsuz etki yapmasıyla ilgilidir. Makro lif altına yerleşmesi muhtemel hava kabarcıklarının bu etkiyi yarattığı söylenebilir.

Cüruf ikameli “S” serilerine bakıldığında “C” serisi ile aynı sıralama mevcuttur. En iyi performansı S13 (%1,9) gösterirken en kötü performansı S11 (%3,9) sergilemiştir. ZP 305 lifleri ile sürüklenen havanın daha olumsuz etkisi net biçimde görülmektedir. Deformasyon sertleşmesinin net biçimde görüldüğü ZP 305 lifli

serilerin sertleşme safhasında çevrelerindeki mikro boşluklardan dahi çok etkilendikleri söylenebilir.

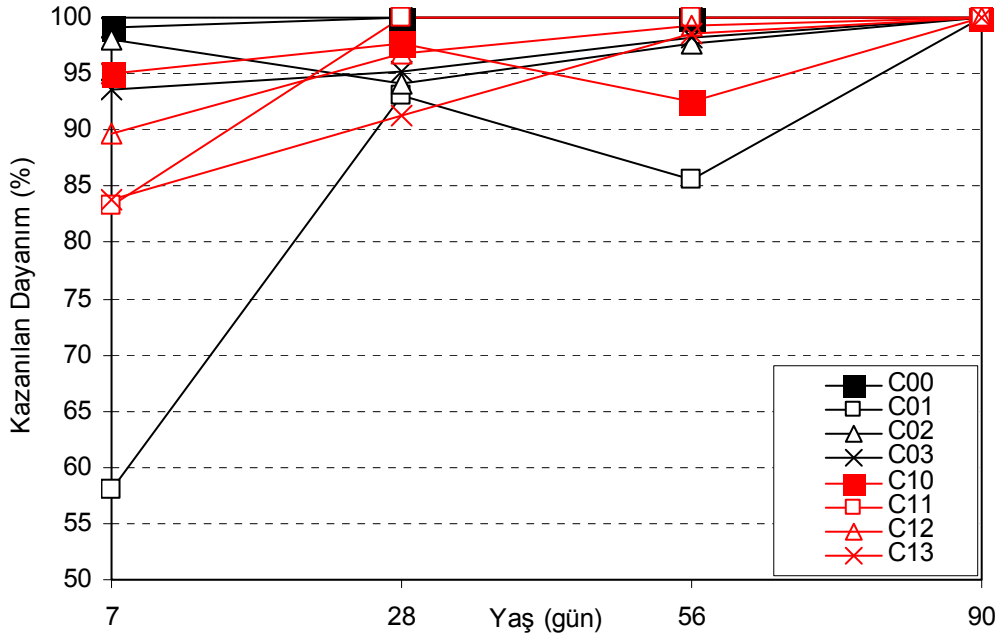
Tüm serilere eşit dozajda katılan hava sürükleyici sonunda tüm hava sürüklenmiş serilerin hava içeriği %5 – 6 arasındadır. “C” ve “S” serisi betonlarda karma ve mikro çelik lifli serilere sürüklenen havanın lifsizine göre daha düşük kayıplar vermesinin sebebi çelik liflerin eğilme altındaki çatlak köprüleme vazifesinde boşlukların oluşturduğu süreksizlikleri göğüslemesidir. Dayanım arttırıcı etkisi ile ZP305 ve kılcal çatlaklara daha çok isabet etme gücü ile mikro lifler birleştiğinde göğüsleme etkisinin güçlendiği görülmektedir. ZP305’in tek başına kullanılması ile yüksek deformasyon sertleşmesi değerleri görülmektedir. Dayanım yükünün ilk çatlak yükünün üstüne çıkması durumu arttıkça lifleri saran mikro boşluklu matrisin daha olumsuz etki yarattığı söylenebilir. Kırılmış örnek parçaları kullanılarak SEI (secondary electron imaging) yöntemi ile fotoğrafı çekilen C01 ve C11 matrislerinin lif sıyrığı bölgelerinde hava sürüklenmiş C11 matrisinin daha boşluklu bir arayüze sahip olduğu görülmektedir (Şekil 8.9).



Şekil 8.9 Hava sürüklemeye sonucu çelik lif çevresinin daha boşluklu olması (kırık yüzey).

Şekil 8.9'dan görüleceği üzere hava sürüklemeye sonucu lif çevresinde gerek siyah nokta halinde görülen mikro boşluklar gerekse  $10\mu\text{m}$  boyutuna erişen peteksi boşluklar artmaktadır. Deformasyon sertleşmesi sırasında çoğu yükün lifler tarafından matrise aktarıldığı düşünülürse bu boşlukların performans düşürücü etki yapması beklenebilir.

Şekil 8.10'da "C" serisi KYB'lerin nihai eğilme dayanımına (90 günlük) oranla kür süresine yani yaşa bağlı olarak dayanım ilerlemeleri verilmiştir. Bazı serilerde 28. günden sonra 90 günlük değerler aşılmış gibi görünmesine rağmen (maksimum 0,7 MPa'ya kadar) bunların nihai dayanımlarını kazandığı kabul edilmiştir.



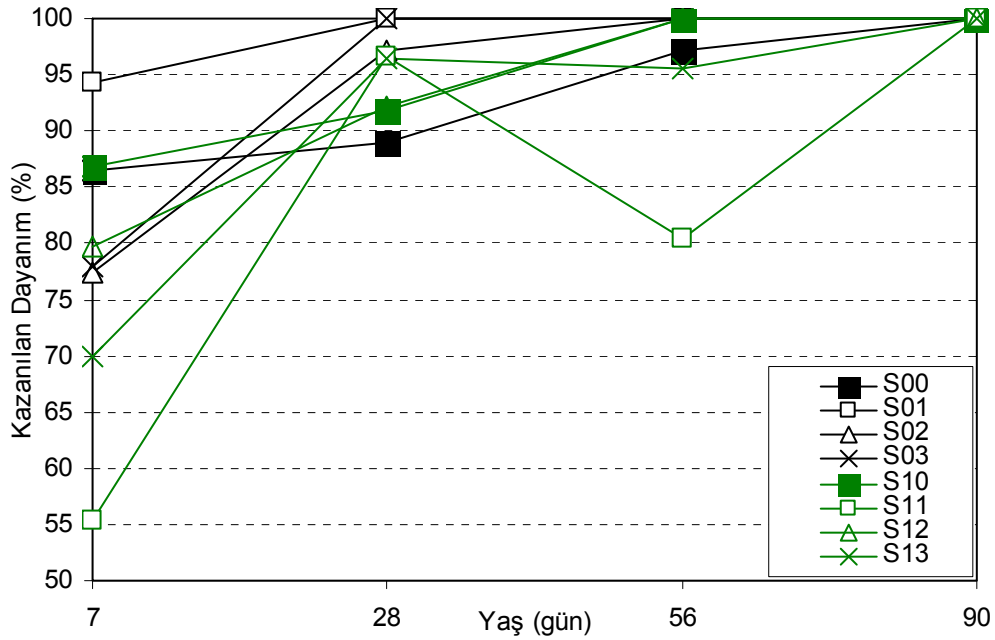
Şekil 8.10 "C" serisi KYB'lerin yaşa bağlı olarak eğilme dayanımlarının gelişimi.

Şekil 8.10'dan hava sürüklenmemiş seriler incelendiğinde 7. günde karma lif, mikro lif içeren ve lifsiz serinin dayanımının çoğunu (%94-%98) kazandığı görülürken makro lif içeren C10 serisinin %58 gibi düşük oranda dayanımını kazandığı görülmektedir. 28. günde lifsiz C00 betonu nihai dayanımına ulaşırken, lifli serilerin %94 mertebesinde dayanımını kazandığı görülmektedir. 56.günde C01 serisinde ZP 305 liflerinin yarattığı değişkenlik sebebiyle dayanım bir miktar azalmış görülmektedir. Bu yaşta C02 ve C03 dayanımlarının %97 gibi büyük bir kısmını kazanmıştır. Lif içeren KYB'lerin 90. günde nihai eğilme dayanımlarına eriştikleri görülmektedir.

Şekil 8.10'dan hava sürüklenmiş "C" serileri incelendiğinde C10 lifsiz matrisinin 7. günde dayanımının %95'ini kazandığı görülmektedir. Bu yaşta C12 %90, C11 ve C13 %84 dayanımlarını kazanmıştır. 28. günde C11 serisi nihai dayanımına

erişmiştir. Aynı yaşta C10 ve C12 serisi dayanımlarını %97 mertebesinde kazanırken, C13 %92 oranında dayanım kazanmıştır. 56. günde mikro ve karma lifli (C12, C13) seriler dayanımlarının %98'ini kazanırken, C11 makro lifli serisinin dayanımının %93'ünü kazandığı görülmektedir. Tüm lifli seriler nihai dayanımlarına 90. günde ulaşmışlardır. Ara yaşlarda bazı seriler için dayanım azalması görülmektedir. Eğilme deneyi gibi hassas bir deneyde numune farklılıklarından ve deneysel değişkenliklerden dolayı bu sonuçların olağan olduğu düşünülmektedir. Tüm yaşlarda eğilme dayanımını bulmak için her bir seriden üç numunenin test edildiği düşünülürse arttırılacak numune sayılarında bu değişkenliklerin ortadan kalkacağı düşünülebilir.

Şekil 8.11'de "S" serisi KYB'lerin nihai eğilme dayanımına (90 günlük) oranla kür süresine yani yaşa bağlı olarak dayanım ilerlemeleri verilmiştir.



Şekil 8.11 "S" serisi KYB'lerin yaşa bağlı olarak eğilme dayanımlarının gelişimi.

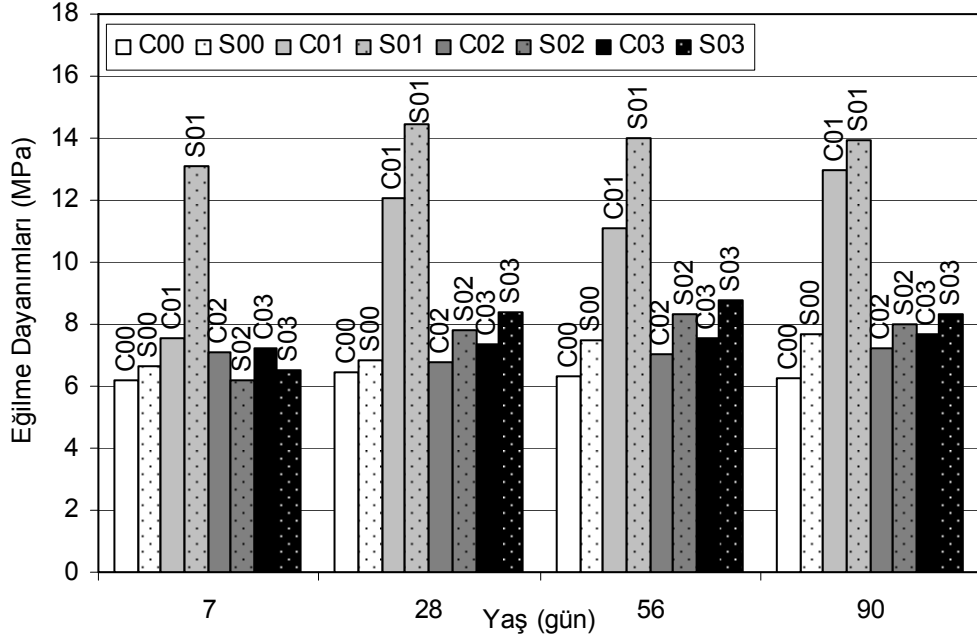
Şekil 8.11'den hava sürüklenmemiş seriler incelendiğinde 7. günde S01 betonunun dayanımının %94'ünü alırken S00'ün %86'sını, S02 ve S03'ün %77'sini kazandığı görülmektedir. 28. günde S01 ve S03 nihai dayanımlarına ulaşmıştır. Bu yaşta S02

%97 oranında dayanımını kazanmıştır. 56. günde hava sürüklenmemiş cüruf ikameli lifli serilerin tümü nihai dayanımlarına ulaşırken, lifsiz S00 betonu nihai dayanımına 90. günde ulaşmıştır.

Şekil 8.11'den hava sürüklenmiş seriler incelendiğinde 7. günde S11'in %86 oranında dayanımını kazandığı görülmektedir. Bu yaşta S12, S13 ve S11 sırasıyla %80,%70 ve %55 dayanım kazanmışlardır. 28. günde karma ve makro lifli seriler (S03, S01) nihai dayanımlarına erişmiştir. Bu yaşta S12 %97, S10 %88 oranında dayanım kazanmıştır. 56. günde lifsiz ve mikro lifli seriler nihai dayanımlarına erişirken karma lifli seri 28. gün dayanım kazanma oranında kalmıştır. 56. günde makro lifli S11 serisinin %80 dayanım kazanma oranına gerilediği görülmektedir. Bu durum makro liflerin eğilme deneyinde aktif kesit içine denk gelme oranında yarattığı değişkenlikten kaynaklanmaktadır. Karma ve makro lif kullanılan serilerin (S13, S11) 90. günde nihai dayanımlarına ulaştıkları görülmektedir.

Şekil 8.10 ve Şekil 8.11'e bakıldığında %50 cüruf ikamesinin genel olarak eğilme dayanımı kazanma hızlarını 7.gün dışında çok etkilemediği görülmektedir. 28. güne kadar cüruf lu lifsiz matrislerin dayanım kazanma hızlarının çimentolu lifsiz matristen geri kaldığı görülmektedir. Ancak bu geri kalma durumunun %15 gibi bir farktan yukarı çıkmadığı görülmektedir. Lifler için genel bir eğilim yoktur ancak 7. günde mikro lif içeriğinin artmasıyla erken dönem eğilme dayanımı kazanma hızının yükseldiği (S02 dışında) söylenebilir. Bu durum, mikro liflerin tek başına kullanımı sonucu eğilme dayanımı değerlerinin çok gelişmemesiyle ilgilidir.

Şekil 8.12’de hava sürüklenmemiş “C” ve “S” serilerinin basınç dayanımları sütun grafik halinde verilmektedir.

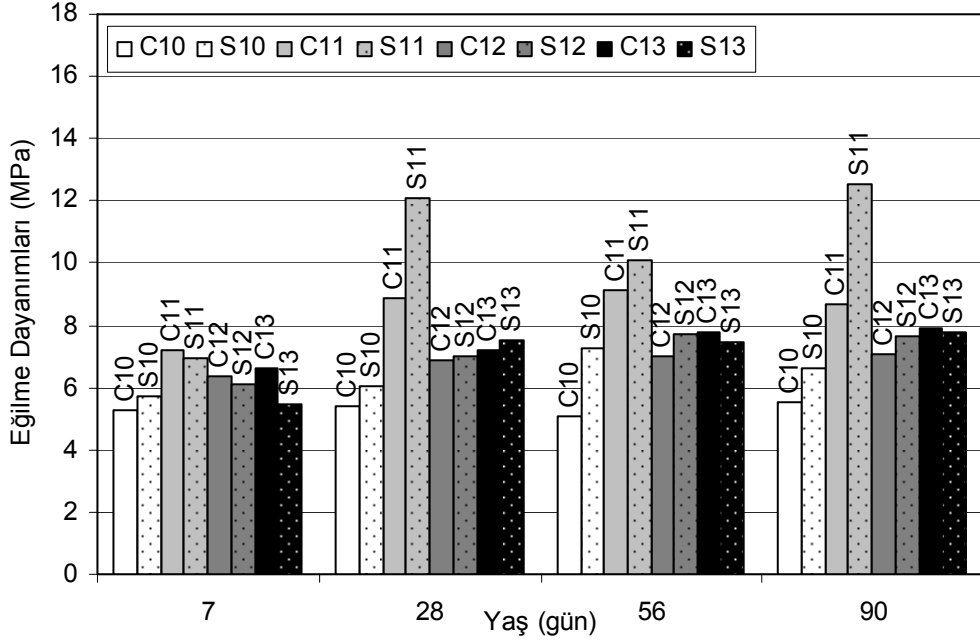


Şekil 8.12 Hava sürüklenmemiş “C” ve “S” serilerinin eğilme dayanımları.

Şekil 8.12’den görüldüğü gibi hava sürüklenmemiş matrislerde cüruf ikamesi 7. günde mikro lif içeren matrislerde düşüş yaratırken, 7. günden sonra tüm matrislerin dayanımını arttırmaktadır.



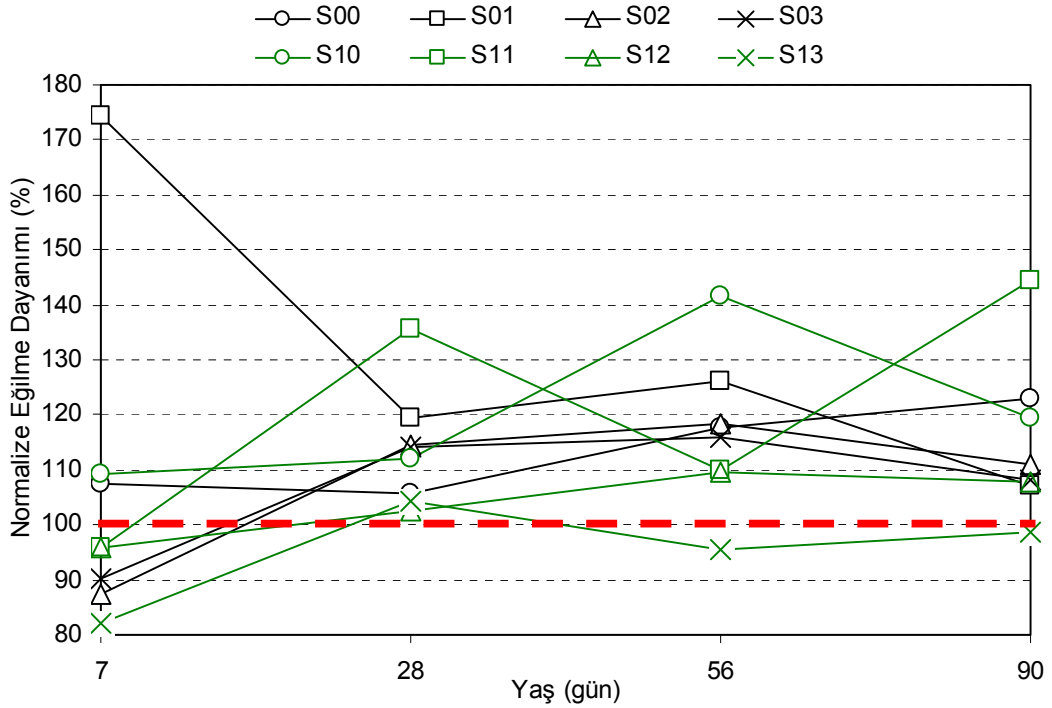
Şekil 8.13'te hava sürüklenmiş "C" ve "S" serilerinin eğilme dayanımları sütun grafik halinde verilmektedir.



Şekil 8.13 Hava sürüklenmiş "C" ve "S" serilerinin eğilme dayanımları.

Şekil 8.13'te 7. günde hava sürüklenmiş serilerde cüruf ikamesi dayanımları bir miktar düşürebilmektedir. 28.gün ve sonrasında karma ve mikro lif kullanımı durumunda cüruf ikamesinin dayanımı çok geliştirmedeği görülmektedir. Ancak lifsiz ve makro lifli matriste cüruf ikamesi fayda getirmektedir.

Şekil 8.14'te ağırlıkça %50 cüruf ikamesinin tüm serilerde zamana bağlı olarak yarattığı etki bağıl olarak gösterilmektedir. "C" serisine cüruf ikamesi ile oluşturulan seriler "S" kodu ile adlandırılmaktadır.



Şekil 8.14 Ağırlıkça %50 cüruf ikamesinin eğilme dayanımına etkisi.

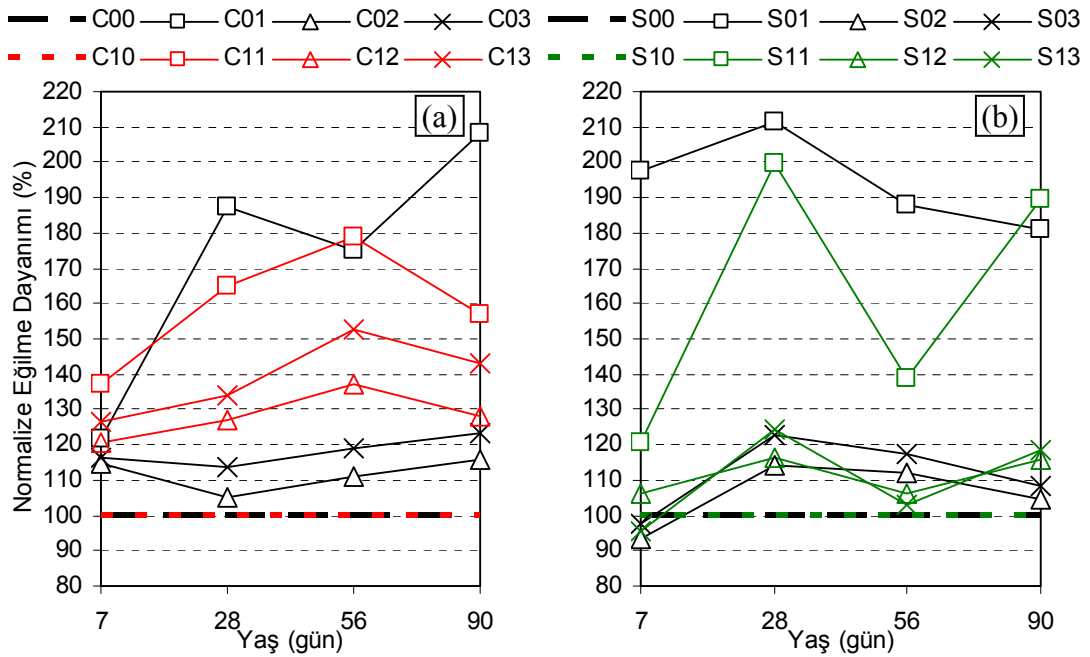
Şekil 8.14'te kırmızı kesikli çizgi "C" serisi cüruf içermeyen serilerin ilgili yaşta sahip oldukları dayanımların referans kabul edildiğini göstermektedir. Hava sürüklenmemiş serilere cüruf ikamesinin etkisi incelendiğinde 7. günde makro lifli serinin (S01) eğilme dayanımında %75'lik, lifsiz matriste (S00) %8'lik bir artışın olduğu görülmektedir. Karma (S03) ve mikro (S02) lif bulunan serilerde ise %10-%12 oranında düşüş vardır. 28. günde cüruf ikamesi sonucu makro lifli seride %20, karma ve mikro lifli seride %12, lifsiz matriste %6 eğilme dayanımı artışı olduğu görülmektedir. 56. günde tüm serilerde 28. güne göre dayanım artışlarının %5 artmıştır. 90. günde hava sürüklenmemiş serilere cüruf ikamesi sonucu nihai olarak lifsiz matriste %22, lifli matrislerde %10 eğilme dayanımının artışı vardır.

Şekil 8.14'ten hava sürüklenmiş matrislere cüruf ikamesinin etkisi incelendiğinde lifsiz matrisin (S10) % 10 eğilme dayanımı artışı yaşarken mikro ve makro lifli

matrisin %3, karma lifli matrisi %18 kayıp yaşadığı görülmektedir. 28. günde makro lifli matriste %35, lifsiz matriste %12 dayanım artışı olmuştur. Aynı yaşta mikro ve karma lifli (S12, S13) çimento matrisli halleriyle benzer dayanımda olduğu görülmektedir. 56. günde lifsiz cüruf ikameli hava sürüklenmiş matrisin (S10) eğilme dayanımı çimentolu kontrolüne göre %40 daha fazladır. Bu yaşta makro ve mikro lif içeren matrislerin (S11 ve S12) %10 dayanım artışı yaşadıkları, bununla beraber karma lifli (S13) matrisin %5 dayanım kaybı yaşadığı görülmektedir. Nihai dayanımlar incelendiğinde (90. gün) makro lifli matrisin (S11) %45, lifsiz matrisin %20, mikro lifli matrisin %9 dayanım artışı yaşarken karma lifli hava sürüklenmiş matrise cüruf ikamesinin bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Ağırlıkça %50 cüruf ikamesinin hava sürüklenmemiş durumda erken dönemde (7.gün) makro lifli seriye büyük katkısı olduğu (%40) görülmektedir. Ayrıca 7. günde diğer lifli serilerin ikameden dolayı dayanım düşüşü yaşadıkları görülürken bu durum 28. günden itibaren düzelmiştir. Nihai olarak cüruf ikamesinin en olumlu etkisi hava sürüklenmemiş serilerde %22 ile lifsiz matriseyken, hava sürüklenmiş serilerde %45 ile makro lifli matrisedir. Diğer matrislere hava sürüklemenin faydası kısıtlıdır (%0 ila %10).

Şekil 8.15'te tüm serilerde erken (7 gün) ve ilerlemiş (90 gün) dönemde çelik liflerin eğilme dayanımına etkileri bağıl olarak gösterilmektedir. Bu grafikte çelik lifin lifsiz kontrol betonlarına göre yarattığı etki ve zamanla değişimi sunulmaktadır. %100'den geçirilen kesikli çizgi lifsiz betonun ilgili yaştaki eğilme dayanımının referans alındığını göstermektedir.



Şekil 8.15 Çelik liflerin çimentolu (a) ve cürüflü (b) serilerde eğilme dayanımına etkisi.

Şekil 8.15 (a)'dan çimentolu hava sürüklenmemiş matriste lif etkisi incelendiğinde 7.günde tüm liflerin %15-%20 arasında eğilme dayanımını arttırdığı görülmektedir. 28. günde karma lif kullanımı makro lif kullanımı (C01) dayanımı %89 gibi büyük bir değerde arttırdığı görülürken karma lif kullanımı (C03) %14, mikro lif kullanımı (C02) %5 artış yaratmaktadır. 56. günde makro lif kullanımı ile %75, karma lif kullanımı ile %20 ve mikro lif kullanımı ile %10 oranında eğilme dayanımı artışı yaratmıştır. 90. günde nihai dayanımlara bakıldığında makro lif kullanımı ile %110 gibi muazzam bir değer yakalanmıştır. Karma lif kullanımı ile %23, mikro lif kullanımı ile %15 değerinde nihai artış yaşanmıştır. Görüldüğü gibi erken dönemde çok gelişmemiş matris içerisinde lif geometrilerinin farkları belli olmazken, 90. günde hem uzun boyu hem de çengelli ucuyla makro lifler matrisin eğilme altındaki davranışını tamamen değiştirmiştir. Her yaşta lif kombinasyonları içinde makro lifler arttıkça dayanım artış değeri artmaktadır.

Şekil 8.15 (a)'dan hava sürüklenmiş çimentolu seri incelendiğinde 7. günde makro liflerin (C11) %39, karma liflerin (C13) %22, mikro liflerin (C12) %15 dayanım artışı yarattığı görülmektedir. 56. günde lif kullanımı sonucu eğilme dayanımı artış oranları daha da artmıştır. Makro, karma ve mikro lif kullanımı ile sırasıyla %65

%34 ve %27 mertebelerinde dayanım artışı yakalanmıştır. 56. günde makro, karma ve mikro lif kullanımı ile sırasıyla %80, %52 ve %38 oranında eğilme dayanımı artışı görülmektedir. Nihai eğilme dayanımlarına bakıldığında 56. gündeki artış değerleri bir miktar düşerek makro, karma ve mikro lif kullanımı için sırasıyla %56, %42, %28 değerinde kalmıştır. Hava sürüklenmiş çimentolu seri içinde makro lif kullanımı arttıkça dayanım artış seviyesi yükselmiştir.

Şekil 8.15 (b)'ten hava sürüklenmemiş cüruf ikameli matriste liflerin etkinliği incelendiğinde 7. günde makro lif kullanımı (S01) ile %99'luk bir dayanım artışı, karma lif (S03) ve mikro lif kullanımı (S02) kullanımı ile sırasıyla %2 ve %8 oranında dayanım kaybı görülmektedir. 28. günde tüm liflerin katkısı artmaktadır. Makro, karma ve mikro lifler için artış değerleri sırasıyla %110, %22 ve %13'tür. 28. günden sonra lif kullanımı ile sağlanan katkılar bir miktar düşerek makro lif kullanımı için %89, karma lif kullanımı için %18 ve mikro lif kullanımı için %11 oranlarında kalmıştır. Nihai olarak 90. günde makro, karma ve mikro lif kullanımı ile sırasıyla %81, %9 ve %4 oranında dayanım artışı yaşanmıştır.

Şekil 8.15 (b)'ten hava sürüklenmiş cüruf ikameli serilere bakıldığında 7. günde makro lif kullanımının (S11) %20, mikro lif kullanımının (S12) %5 oranında artış, karma lifli serinin (S13) ise %3'lük bir düşüş yarattığı görülmektedir. 28. günden sonra tüm lif türleri için dayanım kazandırma evresi başlamıştır. 28. günde makro, karma ve mikro lifler sırasıyla %100, %23 ve %16 dayanım artışı yaratmışlardır. 56. günde lifsiz matrisin en büyük dayanım değerine ulaşması ve lifli serilerde görülen değişkenlik sebebiyle dayanım artış seviyeleri azalmaktadır. Bu yaşta görülen dayanım artışları makro, mikro ve karma lif kullanımı ile sırasıyla %40, %7 ve %3 olmuştur. Nihai dayanımlara bakıldığında makro lif kullanımı ile %90'lık, karma ve mikro lif kullanımı ile sırasıyla %18'lik ve %16'lık dayanım artış seviyesi yakalanmıştır.

Şekil 8.15 (a) ve (b)'e göre genel bir değerlendirme yapıldığında nihai dayanım değerini arttırmada en başarılı lif türünün ZP305 makro lifi olduğu ve peşinden yine %50'si makro lif olan karma lifin geldiği görülmektedir. OL 6/16 lifi 2000 MPa

çekme dayanımına sahiptir. ZP 305 ise 110 MPa çekme dayanımına sahiptir. Ancak eğilme dayanımını arttırmada narinliğin ve lif geometrisinin daha önemli olduğu (narinlik ZP 305 için 55, OL 6/16 için 37,5) görülmektedir. Şüphesiz ZP 305 lifinin çengelli uç geometrisi lifin matristen sıyrılmasını güçleştirerek deformasyon sertleşmesi davranışına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca çimentolu serilerde tüm lifler erken dönemden itibaren (7. gün) eğilme dayanımını arttırıcı etki gösterirken, erken dönemde cürufli serilerde mikro lif içeren kombinasyonların dayanım kaybı yaratabilecekleri görülmektedir. Nihai olarak kazanılan dayanımlara bakıldığında makro, karma ve mikro lif sırasının değişmediği görülmektedir. Dayanım önemli derecede arttıran unsurun ZP 305 lifi kullanımı olduğu görülmektedir. Bu artış tüm seriler için %60 ila %110 gibi önemli mertebelere sahiptir. Nihai olarak ZP 305 lifinin katkısı en fazla çimentolu hava sürüklenmemiş serideyken (%110) ardından cürufli hava sürüklenmiş seri (%90) gelmektedir. Çimentolu matriste hava sürüklenme sonucu erken dönemde makro lifin dayanım arttırıcı etkisi, hava sürüklenmemiş durumun yaklaşık 2 katıdır. Makro lifler çimentolu matriste hava sürüklemenin etkisini erken dönemde karşılamaya başlamıştır. Cürufli matriste ise yine erken dönemde hava sürüklenmiş matriste ZP 305'in dayanım arttırma oranı, hava sürüklenmiş durumun 5 katı mertebelerindedir. Cürufli matriste hava sürüklenme erken dönemde ZP 305'in etkinliğini kısıtlamaktadır. Çimentolu matriste ise ilerleyen dönemde (90. gün) hava sürüklemenin ZP 305'in etkinliğini kısıtlayıcı etkisi görülmektedir. Bu durumun sebebi cüruf kullanımı sonucu çimentolu matristen daha yüksek eğilme dayanımları alınması için 28 günlük kür süresine ihtiyaç duyulmasındandır.

### 8.3 Kırılma Enerjilerinin ( $G_F$ ) Değerlendirilmesi

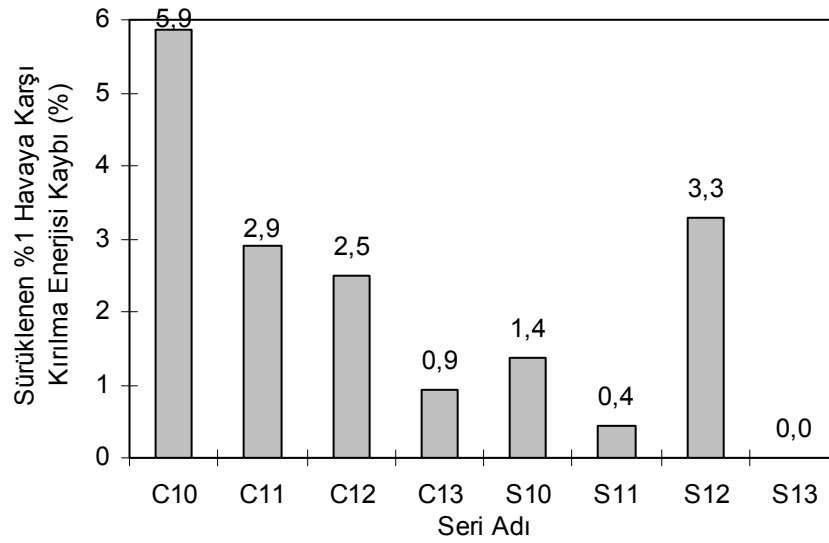
Kırılma enerjilerini çentikli örnekler üzerinde gerçekleştirilen üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen (kapalı devre servo kontrol eğilme presi ile) yük – sehim eğrilerinin alt alanlarının ve numune sehiminin yaptığı işin eğilmeye çalışan aktif kesit alanına bölünmesiyle bulunmuştur. Hesaplarda kullanılan alt alan lifsiz numuneler için tamamen ayrılana kadar, lifli numuneler için 5 mm sehim değerine kadar bulunan yük – sehim eğrilerinden elde edilmiştir.

Tablo 8.2’de 7, 28, 56 ve 90 günlük (su kürü) numunelerin deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama kırılma enerjileri verilmiştir.

Tablo 8.2 Güne bağlı olarak ortalama kırılma enerjileri

<b>Beton kodu</b>	<b>Birim</b>	<b>Yaş (gün)</b>			
		<b>7</b>	<b>28</b>	<b>56</b>	<b>90</b>
C00	N/m	73	74	74	74
C01		2716	4050	3764	3691
C02		1247	1434	1688	1937
C03		2753	3333	3744	3161
C10		56	60	53	55
C11		3458	3535	3305	3314
C12		1530	1525	1645	1754
C13		2655	2408	2389	3076
S00		51	48	47	56
S01		2999	2999	3633	4690
S02		1161	1667	1928	2295
S03		2548	2549	2688	2804
S10		47	49	56	53
S11		3374	3677	4419	4636
S12		1257	1542	1811	2144
S13		2323	2669	2590	2842

Şekil 8.16’da sırf çimentolu “C” serisi ve cüruf ikameli “S” serisi hava sürüklenmemiş KYB’lerin bünyelerinde var olan hava yüzdelere ilaveten katkı kullanarak sürüklenen her %1 hava için kırılma enerjisi kayıpları (%) verilmektedir. Bu değerler, hava sürüklenmemiş bir serinin (örn: C01) hava sürükleyici katkı eklenerek üretilen (örn: C11) serisiyle kıyaslanması sonucu bulunmuştur. Karşılaştırılan dayanımlar 90 günlük dayanımlardır.

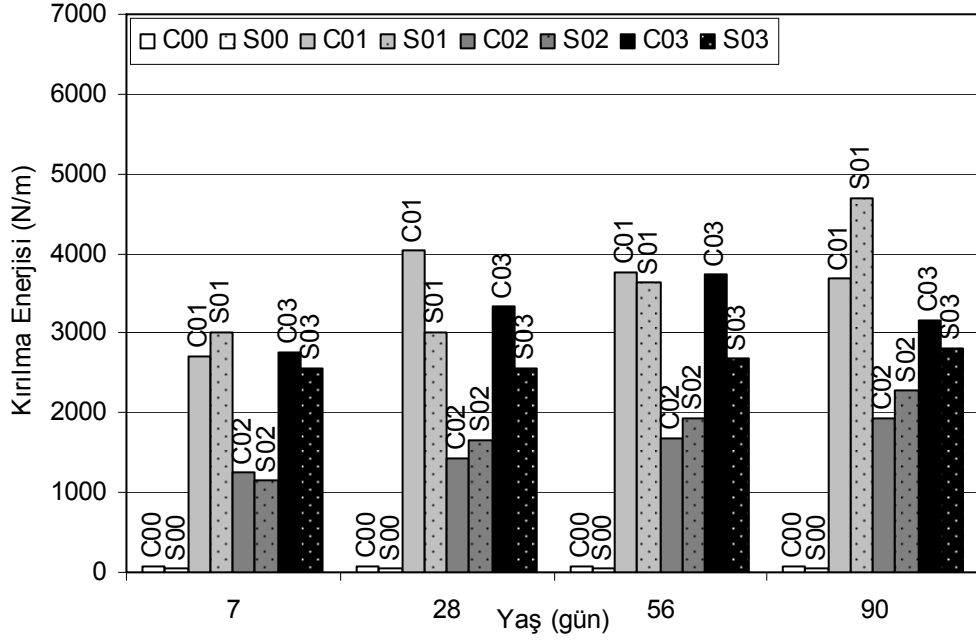


Şekil 8.16 %1 hava sürüklemeye (yalnı matrisin hava içeriğine ilaveten) karşılık kırılma enerjisi kayıpları (%).

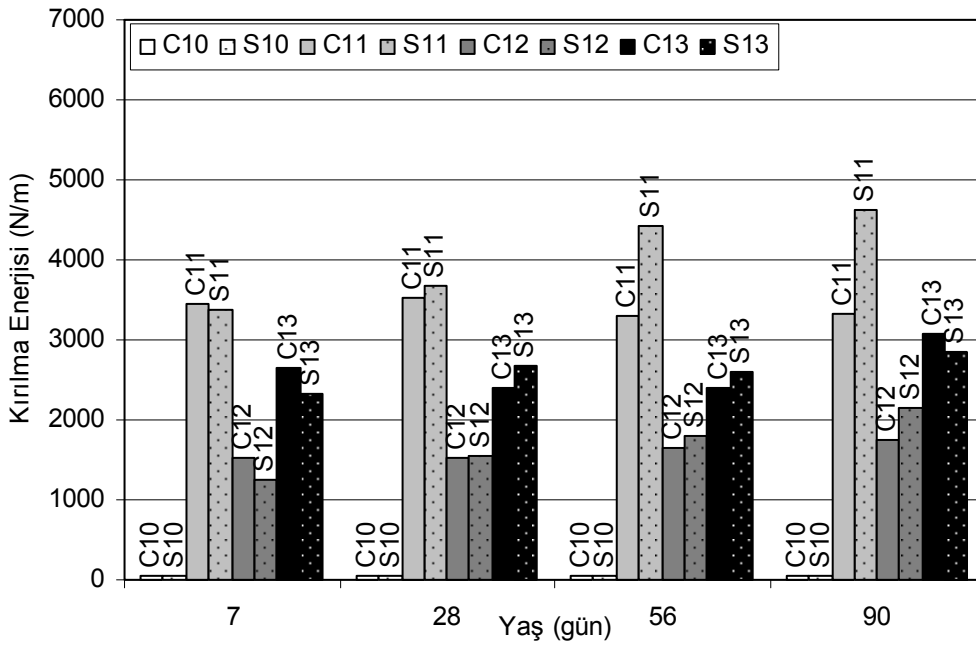
Şekil 8.16’da hava sürükleme neticesinde kırılma enerjilerinde kayıplar olduğu görülmektedir. Kayıp %5,9’u aşmamaktadır. “C” serisi betonlarda hava sürükleme sonucunda en büyük kayıp %5,9 ile lifsiz (C10) KYB’dedir. Yine bu seride karma lifli seri en az kayıp yaşamıştır. (C13, %0,9). “C” serisi betonlarda lifli serilerde daha az kayıp yaşanmıştır. “S” serisi cüruf ikameli KYB’lerde en büyük kayıp %3,3 ile mikro lifli seridedir (S12). S13 karma lifli seri hava sürükleme sonucu kırılma enerjisi kaybı yaşamamıştır. Hava sürükleme sonucu yük – sehım eğrisinin pik yük değerinin düşme oranı, gerekse kuyruk bölgelerinin davranışı kırılma enerjilerini belirlemektedir. Hava sürükleme sonucu kırılma kesitine denk gelmesi muhtemel binlerce mikro hava boşluğunun lifsiz matrislerde kırılma yolunu kısalttığı, lifli matrislerde ilk çatlak yükünün düşüklüğünden ve daha zayıf matrisin liflerden daha kolay kurtulmasından dolayı bu kayıpların oluştuğu söylenebilir. Eğilme dayanımlarına bakıldığında en az eğilme dayanımı kaybı yapan C13 ve S13 serilerinin daha az kırılma enerjisi kaybına uğradığı görülmektedir. Ancak birim alanda birim çatlak gelişirken harcanan enerji olarak tanımlanabilen kırılma enerjisini salt eğilme dayanımıyla açıklamak mümkün değildir.



Şekil 8.17’de ve 8.18’de “C” ve “S” serilerinin kırılma enerjileri sütun grafik halinde verilmektedir.



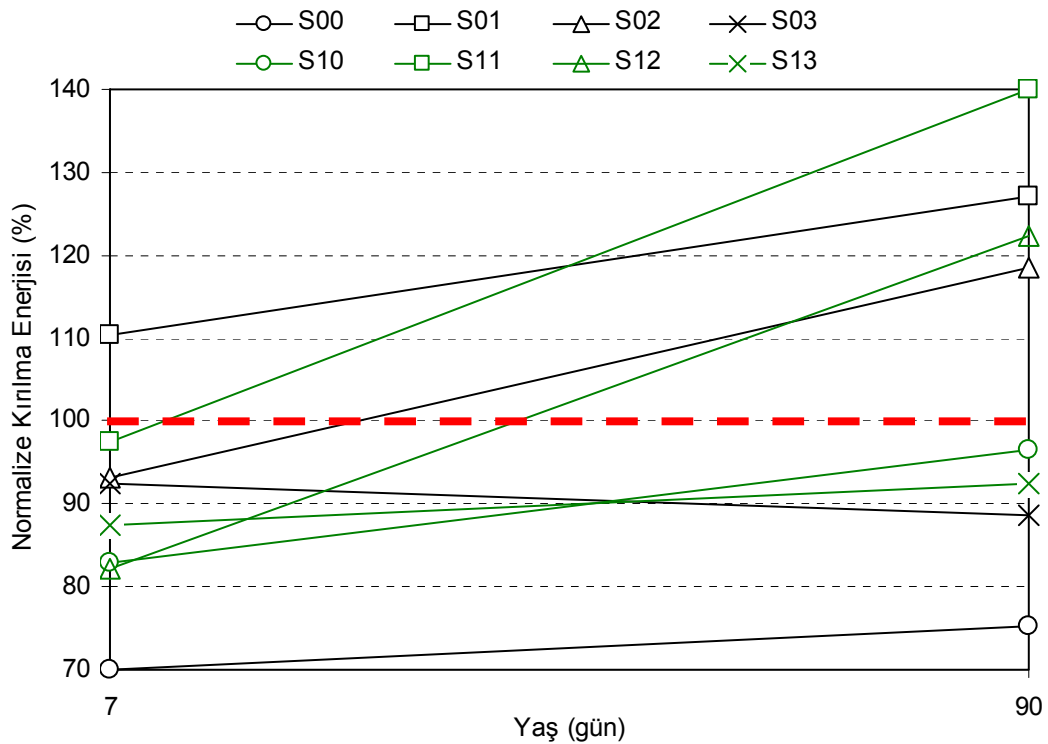
Şekil 8.17 Hava sürüklenmemiş “C” ve “S” serilerinin kırılma enerjileri.



Şekil 8.18 Hava sürüklenmiş “C” ve “S” serilerinin kırılma enerjileri.

Şekil 8.17 ve Şekil 8.18'e bakıldığında lifsiz serilerin  $G_F$  değerlerinin lifli serilerinkinden kat be kat az olduğu görülmektedir. Lifler matrisin eğilme altındaki yük – sehim eğrisinin kuyruk kısmı davranışını tamamen değiştirmektedirler. Böylelikle maksimum yükten sonra haber vermeksizin kırılan gevrek matrisler değil, dayanım yükü aşıldıktan sonra aşamalı olarak yük kaybeden matrisler oluşturulmaktadır. Bu da çatlak ilerlemesi için gereken enerjiyi arttırmaktadır. Ayrıca %50 cüruf ikamesinin genel eğilimi değiştirmedeği ve çimentodan yer yer daha yüksek kırılma enerjileri verdiği görülmektedir.

Şekil 8.19'da ağırlıkça %50 cüruf ikamesinin tüm serilerde 7. ve 90. günde yarattığı etki bağıl olarak gösterilmektedir. "C" serisine cüruf ikamesi ile oluşturulan seriler "S" kodu ile adlandırılmaktadır. Kırmızı kesikli çizgi ilgiliseri için cüruf ikame edilmemiş halin referans alındığını göstermektedir.



Şekil 8.19 Ağırlıkça %50 cüruf ikamesinin kırılma enerjisine etkisi.

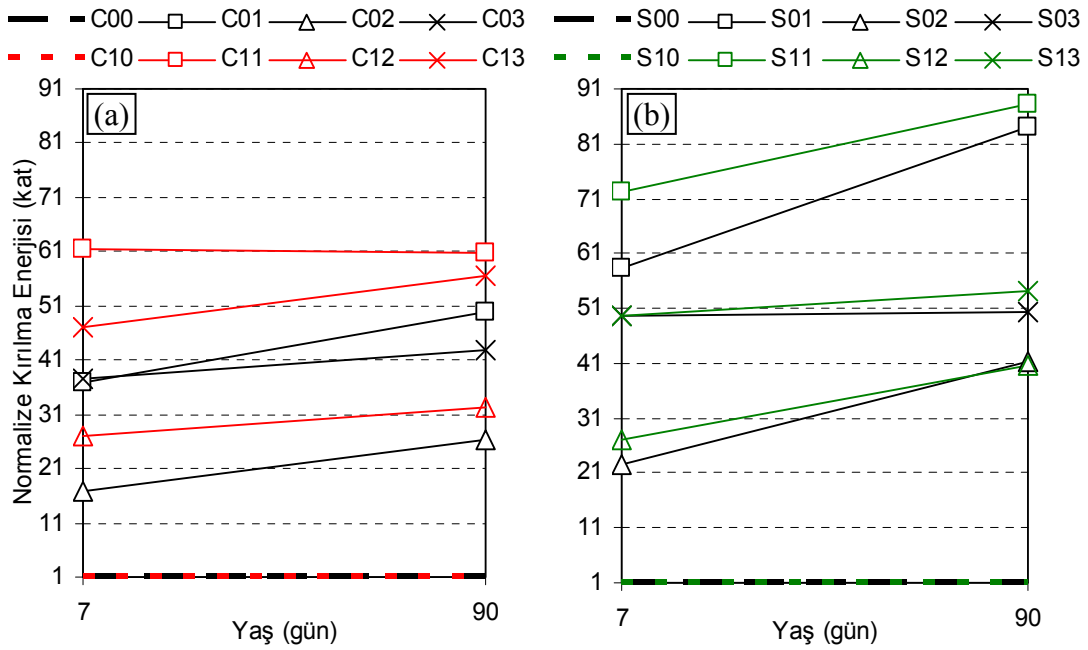
Şekil 8.19'dan hava sürüklenmemiş serilerde cüruf ikamesinin etkisi incelendiğinde erken dönemde (7.gün) makro lifli seride (S01) %10  $G_F$  artışı görülürken, mikro

(S01) ve karma (S03) serilerinin çimentolu kontrollerine göre %7 geride kaldıkları görülmektedir. Lifsiz (S00) seriye cüruf ikamesi erken dönemde %30'luk bir  $G_F$  kaybı getirmiştir. Cüruf ikamesi 90. günde makro lifli seride %27, mikro lifli seride %18  $G_F$  kazancı görülmektedir. 90. günde karma lifli serinin %10 civarındaki kaybı sürerken, lifsiz seri kayıp 7. günden beri biraz gelişerek %25'lik kayıp değerinde kalmıştır.

Şekil 8.19'dan hava sürüklenmiş serilerde cüruf ikamesinin etkisine bakıldığında erken dönemde tüm serilerde  $G_F$  kaybı görülmektedir. Makro (S11), karma (S13), mikro lifli (S12) seriler için kayıp oranı sırasıyla %3, %14 ve %17 dir. Lifsiz serinin kaybı erken dönemde mikro lifli seri ile aynıdır. 90. günde makro ve mikro lifli serilerin cüruf ikamesinden nihai olarak olumlu etkilendiği görülmektedir ve artış değerleri sırasıyla %40 ve %22'dir. Nihai (90. gün) olarak cüruf ikamesinden olumsuz etkilenen seriler karma lifli ve lifsiz seridir. Bu lif kombinasyonları için %5 dolaylarında düşük düzeyde bir olumsuz etkilenme söz konusudur.

Cürufun erken dönemde makro lifli seriler hariç kırılma enerjisini düşürdüğü görülmektedir. Ardından gelişen hidrasyon ve ara yüzeyle birlikte makro ve mikro lifli serilerde önemli mertebelerde (%20 - %40) kırılma enerjisi artışı olmuştur. Makro lifli seride fayda en büyük değerdedir. Cüruf ikamesiyle gelişen ara yüzey ve matris dayanımı makro liflerin sıyrılmasını güçleştirmiş ve ilk çatlak sonrası davranış en çok makro lifli seride gelişmiştir. Bununla beraber cüruf matrisin artan dayanımı ve agrega – matris ara yüzeyi lifsiz durumda daha gevrek kırılmaya sebep olmuştur. Hava sürüklenme lifsiz cüruf ve çimentolu matrisin gevreklik farkını önemli oranda azaltmaktadır. Karma lif kullanımının nihai olarak sırf çimentolu matrisle daha yüksek performans sergilediği görülmektedir (Şekil 8.19).

Şekil 8.20'de çimentolu ve cüruf matrislerde liflerin kırılma enerjisini kaç katına çıkarttığı gösterilmektedir. İlgili matrisin lifsiz halinin kırılma enerjisi “1 birim” olarak gösterilmiştir.



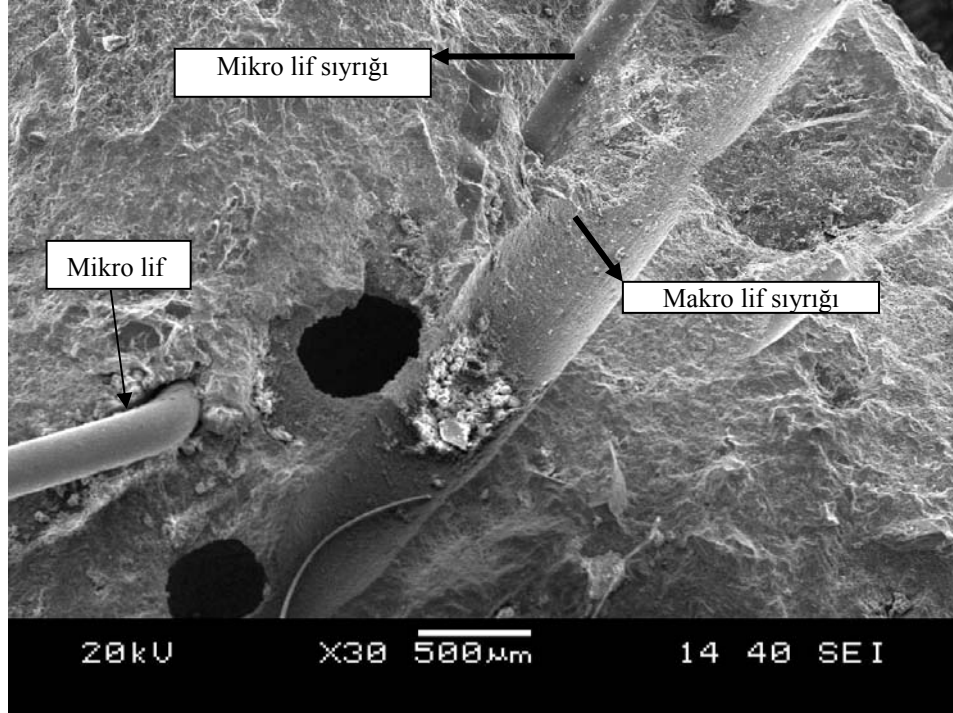
Şekil 8.20 Liflerin çimentolu (a) ve cürüflü (b) matrislerde kırılma enerjisini artırma derecesi.

Şekil 8.20 (a)'da hava sürüklenmemiş çimentolu matrislerde erken dönemde (7. gün) makro (C01) ve karma (C03) çelik lif kullanımı sonucunda  $G_F$  değerinin 37 katına çıktığı görülmektedir. Bu yaşta mikro liflerin katkısı 16 kat mertebesindedir. İlerlemiş dönemde (90. gün) makro lifler 50, mikro lifler 42 kat  $G_F$  yaratmaktadır. Mikro lif kullanımı sonucu nihai olarak lifsiz matrisin 26 katı  $G_F$  elde edilmiştir. Hava sürüklenmiş çimentolu matrislerde hem erken dönemde hem ileriki dönemde lif kullanımının hava sürüklenmemiş durumdan daha yüksek katkı yarattığı görülmektedir. 7. günde makro (C10), karma (C13) ve mikro (C12) liflerin  $G_F$  değerini sırasıyla 27, 47 ve 61 katına çıkarttıkları görülmektedir. Nihai faydalara bakıldığında makro liflerin katkısının 7. günle aynı olduğu (61 kat), karma liflerin katkısının makro liflere yaklaşarak 57 kat değerine çıktığı, mikro liflerin katkısının 31 katta kaldığı görülmektedir.

Şekil 8.20 (b)'de hava sürüklenmemiş cürüflü matrislere bakıldığında erken dönemde makro (S01), karma (S03) ve mikro (S12) lif kullanımının lifsiz matrisin (S00) kırılma enerjisini sırasıyla 60, 50, 22 katına çıkarttığı görülmektedir. Nihai olarak (90. gün) makro liflerin katkısı gelişen lif – matris aderansından dolayı 85 kata çıktığı görülmektedir. Karma liflerin faydasının 7. günden 90. güne gelişmediği

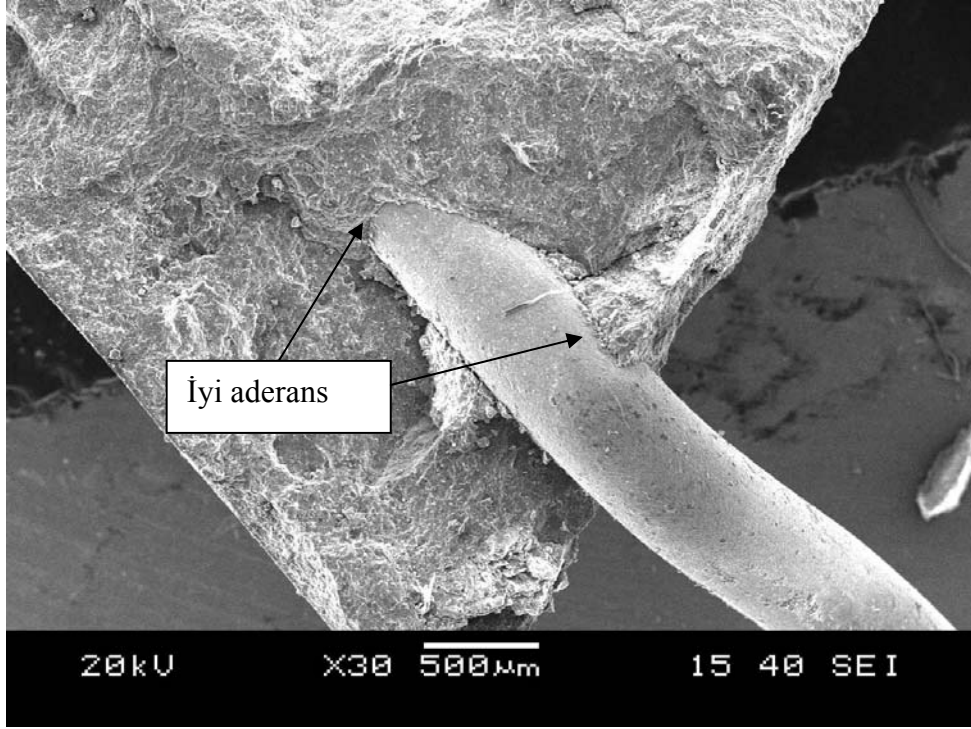
görülmektedir (50 kat). Mikro lif kullanımı sonucu nihai olarak lifsiz matrisin  $G_F$  değerinin 41 katına ulaşılmıştır. Hava sürüklenmiş cürüflu matrislerde liflerin katkısı hava sürüklenmemiş duruma yakın mertebelerdedir. 7. günde makro (SS11), karma (S13) ve mikro (S12) lif kullanımıyla sırasıyla lifsiz (S10) matrisin 72, 20, 56 katı kırılma enerjileri elde edilmiştir. Nihai olarak (90. gün) makro, karma ve mikro lif için yalın matrisin kırılma enerjisini katlama değeri sırasıyla 88, 54, 41 olmuştur.

Hem cürüflu hem çimentolu matrislere bakıldığında tüm yaşlarda karışımın narinlik oranı arttıkça kırılma enerjileri artmaktadır. Ayrıca hava sürüklenmiş matrislerde lifler kırılma enerjilerini az da olsa daha büyük değerlerde arttırmışlardır. Bu durumun sebebi hava sürüklenmiş lifsiz matrislerin hava sürüklenmemiş eşleniklerine kıyasla daha düşük kırılma enerjisine sahip olmasıdır. Karışımlarda ZP 305 çelik lifi arttıkça kırılma enerjisi artmaktadır. ZP 305 lifleri yüksek narinlikleri ve uzun boylarıyla matristen daha zor ve geç sıyrılmaktadır. Mikro lifler ise kısadır ve çatlak açılırken gerilme köprüleme özelliklerini erken kaybetmektedirler. Ayrıca ZP 305 liflerinin kancalı uç yapısı matrisle kenetlenmeyi oldukça güçlendirmektedir. Böylelikle lifler sıyrılırken bu kancalı kısmın düzleşmesi için harcanan enerji kırılma enerjisini oldukça arttırmaktadır (Şekil 8.21). ZP 305 liflerinin ve uzun boya sahip narin liflerin bu faydası Yardımcı (2008), Betterman ve ark. (1995) tarafından vurgulanmıştır.



Şekil 8.21 Liflerin sıyrılırken matriste bıraktığı etkinin kırık yüzey fotoğrafı (C13).

Makro lifli serilerde eğilme altına bu liflerin yer yer koptuğu gözlemlenmektedir. Bu durum kırılma enerjisini azaltıcı bir etkidir. Ani kopan lifler dayanımı arttıracak kadar yük taşıyabiliyor olsa da kırılma açısından gevrek davranış işaretidir. Lifsiz KYB’de çatlakın agregaları yararak ilerlemesinden anlaşılacağı üzere deneyler kapsamında üretilen matrislerin gevrek yapıda olduğu ve lif – matris, agreg – matris ara yüzeylerinin fazla güçlü olmasından kaynaklı kırılma enerjisi kayıplarının olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 8.22). Aynı lif dozajında daha az gevrek bir matrisle daha büyük kırılma enerjileri elde etmek mümkündür. Benzer durum Şengül vd. (2006)’nin çalışmasında da görülmektedir.



Şekil 8.22 Matrisin lifleri sıkıca çevrelemesi (Kırık yüzey fotoğrafı, C13).

#### 8.4 Bölümle İlgili Genel Değerlendirme

- %50 gibi yüksek bir oranda cüruf ikamesi sonucu nihai olarak eğilme dayanımlarının arttığı, bu artışın ilerlemiş yaşlarda belirginleştiği görülmektedir. 28. günden itibaren lif kullanılan cüruf ikameli serilerin dayanımları çimentolu matrise erişmekte ve ilerleyen yaşlarda genellikle aşmaktadır. Cüruf kullanımının özellikle makro lifli seride büyük dayanım artışı yarattığı görülmektedir.
- Hava sürüklenme sonucu eğilme dayanımları düşmektedir. Hava sürüklemenin olumsuz etkisi en çok makro lifli seride görülmektedir.
- Çelik lif kullanımı sonucu eğilme dayanımları artmaktadır. Nihai olarak tüm serilerde en çok makro lif kullanımı dayanımı arttırmaktadır. Onu sırasıyla karma lif ve mikro lif izlemektedir. Cüruf lu ve çimentolu matriste (C01 hariç) lif kullanımı hava sürüklenmiş serilerde daha büyük dayanım artışına sebep olmuştur. Hava sürüklemenin matris dayanımını düşürücü etkisi makro lif

kullanımı dışında liflerle kısıtlanabilmiştir. Cürüflu ve çimentolu seriler bu anlamda benzer davranmaktadır.

- Genel olarak lif kullanılan serilerde sürüklenen %1 havaya karşılık kırılma enerjisi kaybı lifsizlerine göre azdır. Karma lif kullanımının bu noktada en başarılı olduğu görülmektedir.
- Cüruf ikamesi sonucu nihai olarak makro ve mikro lifli serilerin kırılma enerjisi artarken, karma lif ve lifsiz durumda kırılma enerjisi kaybı mevcuttur. Cüruf ikamesi hava sürüklenmiş serilerde (aynı liflerin dayanıma etkisinde olduğu gibi) kırılma enerjisini hava sürüklenmemiş serilere kıyasla daha çok arttırmıştır.
- Lif kullanımı gevrek yalın matrislerin kırılma enerjisini katbekat arttırmıştır (25 – 90 kat). Bu durum eğilme dayanımı artışlarından daha belirgindir. Çelik lifler eğilme yükleri altında betonun ani göçmesine engel olmaktadır. Dayanım arttırıcı etkilerinden ziyade kırılma davranışını değiştirici etkileri önemlidir.
- Liflerin kırılma enerjisini arttırma etkinliği narinlikleri ile doğru orantılıdır. Beton içerisinde makro lif içeriği arttıkça kırılma enerjileri o denli artmaktadır. Mikro lifler %0,5 dozajda eğilme dayanımını arttırıcı etki gösteremezken yalın matrisin eğilme yükleri altındaki davranışını tamamıyla değiştirmiştir. Mikro liflerin kırılma enerjisine makro liflerden daha az olan katkısının sebebi kısa boylarından dolayı sıyrılabilmeleri için makro liflere göre daha az enerji gerekmesidir.
- Hava sürüklenmiş serilerde lif kullanımı sonucu kırılma enerjisi artışı hava sürüklenmemişlerine göre daha yüksektir. Liflerin kırılma enerjisi katkıları yaşla beraber gelişmektedir. Cürüflu matrislerin (karma lif kullanımı dışında) erken dönemden ilerlemiş döneme kırılma enerjilerinin artışı, çimentolu



seriden daha büyüktür. Yani cürufun puzonalik reaksiyonlarının gelişmesi ile gelişen lif – matris ara yüzeyi ilerleyen yaşlarda etkin olmaktadır.

- Genel bir değerlendirme olarak %50 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikamesi KYB'nin kırılma enerjisi üzerinde makro ve mikro lifli serilerde önemli artışlar yaratmaktadır ancak karma ve lifsiz kullanımda düşüş yaratabilmektedir. Cüruf kullanımı eğilme dayanımlarında genel olarak önemli artışlar yaratmaktadır. %50 gibi yüksek bir oranda cüruf ikamesi yüksek toz ihtiyacı olan KYB için çok uygundur. Çimento dozajını 518 kg/m<sup>3</sup>'ten 259 kg/m<sup>3</sup>'e düşürmüştür. Bu durumun çevresel ve ekonomik etkileri düşünüldüğünde atık bir malzeme olan cürufun KYB içerisinde yüksek oranlarda kullanılması yerinde olacaktır. Ayrıca geleneksel betona göre pahalı bir özel beton türü olan KYB'nin maliyeti yüksek miktarda cüruf kullanımıyla bir miktar düşürülebilir.
- Sonuçlara göre 40 kg/m<sup>3</sup> dozajda makro lifler ile dayanım ve enerji yutma, mikro ve karma lifler ile enerji yutma seviyeleri artırılabilir.
- Çelik liflerin eğilme dayanımlarını arttırmalarından ziyade kırılma davranışı üzerindeki etkileri daha belirgindir. Bu açıdan sünek göçme davranışının istendiği yapılarda az da olsa çelik lif kullanmak betonun kırılma sonrası davranışı açısından çok etkilidir. Kendiliğinden yerleşen betonlar ile çelik liflerin buluşması, geleneksel betonun çelik lif kullanımı sırasında çıkarttığı yerleştirme sorunlarına dolayısıyla makro boşluk sorunlarına çözüm niteliğindedir. Ayrıca bu boşluksuz yapının liflerin etkinliğini artırması beklenebilir.
- Genel olarak Liflerin KYB'nin eğilme performansını önemli oranda geliştirdiği görülmektedir. Mikro lifle hem dayanım hem de enerji yutma artmaktadır. Mikro ve karma liflerle enerji yutma artmıştır. Hava sürükleyiciler hem lifli hem de lifsiz KYB'de eğilme dayanımını azaltmıştır. Cürufu ve çimentolu matrisler bu anlamda benzer davranışa sahiptir.

## **BÖLÜM DOKUZ**

### **DONMA – ÇÖZÜLME DAYANIKLILIĞI**

Bu bölümde KYB ve KYÇLB örneklerine uygulanan 300 donma – çözülme (D-Ç) çevrimi sonrası mekanik özelliklerdeki değişimler incelenmektedir. Bir çevrim 14 saat havada donma geçiren numunelerin 2 saat suda çözülmesiyle oluşturulmuştur. Çevrimler -18 ila +10 °C ortam sıcaklığı arasında yapılmıştır. Numunelerden birinin çekirdeğinden okunan sıcaklık değerleri donma ve çözülme sonunda sırasıyla -16 ile +8 °C'dir. Deney sıcaklıkları ASTM C-666 (B) standartındaki sıcaklıklara benzer olsa da soğutma hızı bu standarttakinin yarısı kadardır. Doğadaki koşullara benzeyen bir soğutma prosedürü uygulanmıştır.

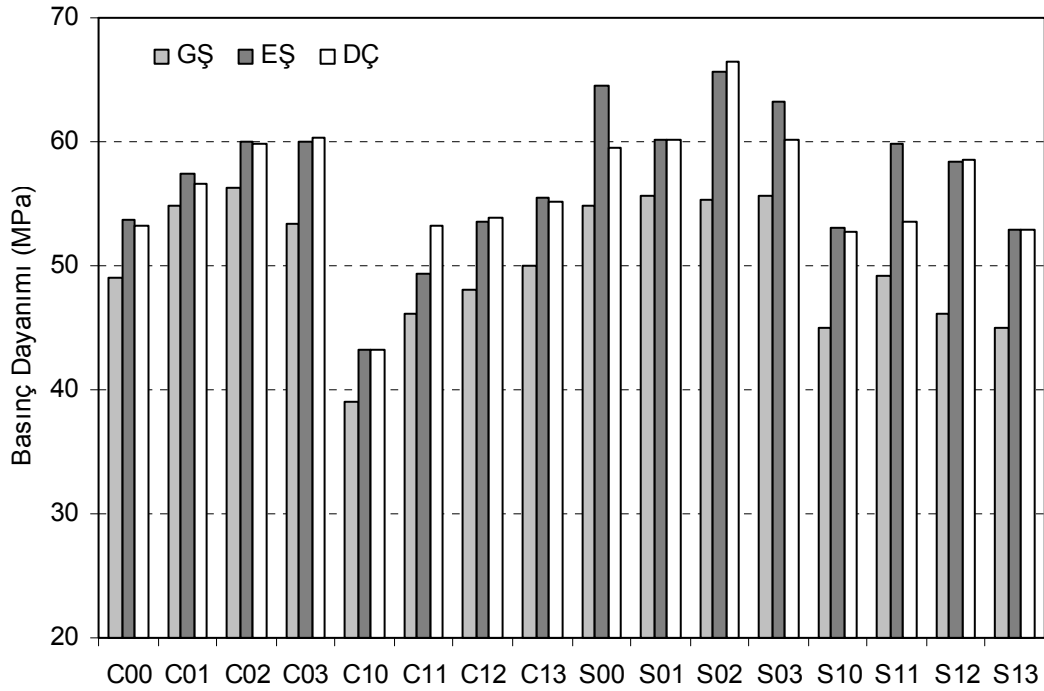
Örneklere D-Ç çevrimine kadar 56 gün su kuru uygulanmıştır. Su kuru ardından çevrimler başlamıştır. Çevrimlere giriş dayanımları, kırılma enerjileri ve elastisite modülleri ile çevrim sonrası değerleri bulunmuştur. Deney uygulama metodları yaşa bağlı mekanik incelemelerde kullanılanlardır. Çevrimler sürerken ultra ses geçiş hızları (UPV) ve boy değişimleri takip edilmiştir. Çevrimler 200 gün (300 çevrim) sonra tamamlanmıştır. Ardından bu güne kadar (256 gün) suda bekleyen eşlenik numuneler ve 300 çevrim geçirmiş numuneler mekanik performans açısından kıyaslanmıştır.

#### **9.1 D – Ç Sonrası Basınç Yükleri Altındaki Performans**

Tablo 9.1'de 300 D-Ç çevrimine maruz kalan ve eşlenik (su kuru tutulan) numunelerin basınç dayanımları verilmektedir. Şekil 9.1'de bu dayanımlar sütun grafik halinde gösterilmiş ve Şekil 9.2'de çevrimler sonrası basınç dayanımı değişimleri (%) eşlenik dayanımlarla kıyaslanarak verilmiştir.

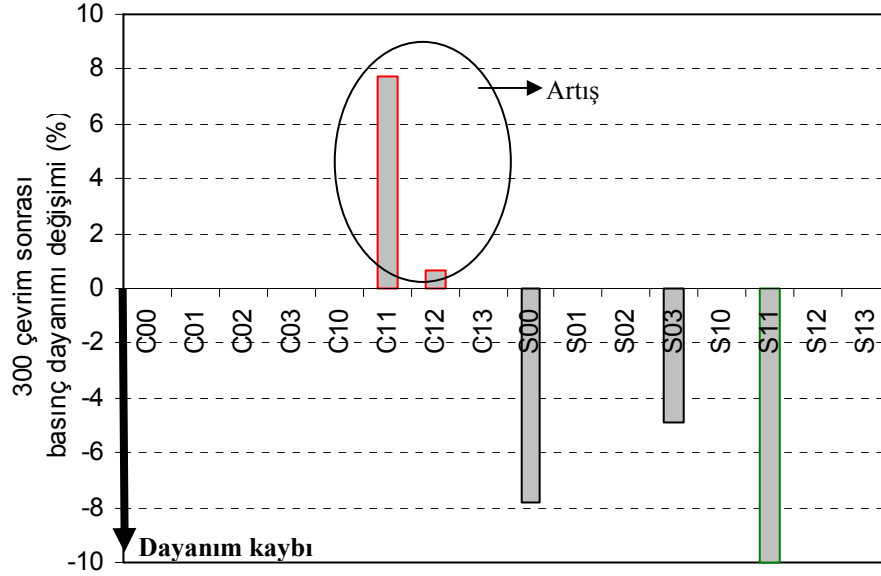
Tablo 9.1 Çevrimlere giriş, çevrimlere eşlenik ve çevrim sonrası basınç dayanımları

Beton kodu	Birim	Dayanım Türü		
		Giriş	Eşlenik	D-Ç
C00	MPa	49	54	53
C01		55	57	57
C02		56	60	60
C03		53	60	60
C10		39	43	43
C11		46	49	53
C12		48	53	54
C13		50	55	55
S00		55	65	60
S01		56	60	60
S02		55	66	66
S03		56	63	60
S10		45	53	53
S11		49	60	54
S12		46	58	58
S13		45	53	53



Şekil 9.1 D-Ç çevrimlerinden önce ve sonra basınç dayanımları (DÇ: 300 çevrim sonrası dayanım, EŞ: çevrimler sürerken suda bekleyen numunelerin dayanımı, GR: çevrimlere giriş dayanımı).

Şekil 9.2’de 300 çevrim sonrası dayanım kayıpları verilmektedir. Kıyaslamalar çevrimler boyunca su küründe tutulan eşlenik numunelerle yapılmıştır. Çevrimler sonrası hiçbir seri çevrime giriş dayanımının altına düşmemiştir.



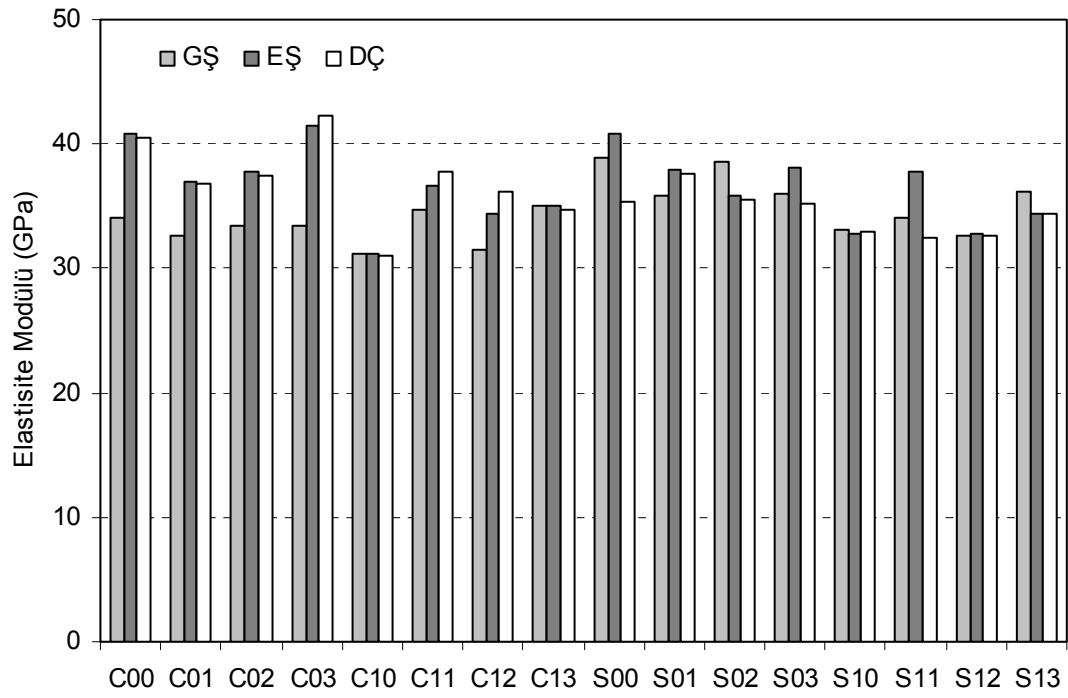
Şekil 9.2 D-Ç sonrası basınç dayanımlarının değişimi.

Şekil 9.2’den cüruflu seriler incelendiğinde %4 ila %10 arasında değişen düşük düzeyde kayıp görülmektedir. Hava sürüklenmiş makro lifli seride (S11) kayıp en büyük değerdedir (%10). Hava sürüklenmemiş lifsiz seri (S00) %8 ve hava sürüklenmemiş karma lifli seri (S03) %4,5 oranında kayıp yaşamıştır. Hava sürüklemenin don hasarına karşı etkili bir yol olduğu bilinmesine rağmen cüruflu matriste bir tek makro lif kullanımında düşüş görülmesi negatif bir etkileşimin olduğunu göstermektedir. S00 lifsiz matrisi ve S03 karma lifli matrisin düşük seviyelerde de olsa don hasarına uğraması %50 oranında cürufluk ikamesinin 56 gün kür süresine rağmen bir miktar olumsuzluk sergileyebileceğini göstermektedir. Ancak kayıpların önemsiz mertebelerde olduğu unutulmamalıdır. Lifsiz cüruflu matriste (S00), mikro ve makro liflerin don hasarını engelledikleri görülmektedir. Çimentolu serilerde kayıp yoktur. Hatta C11 ve C12 betonlarında çevrimler kür etkisi yaratıp dayanımları bir miktar (%8, %1) arttırmıştır.

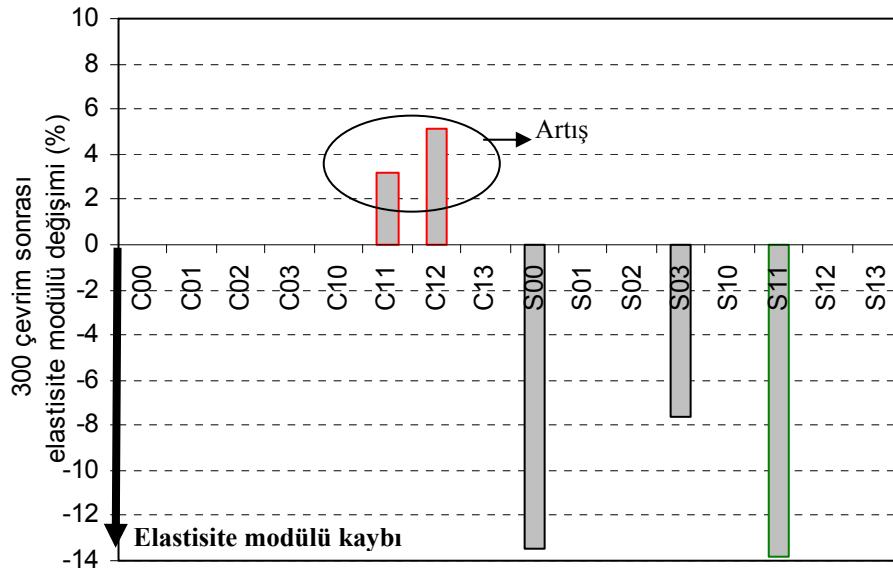
Tablo 9.2’de 300 D-Ç çevrimine maruz kalan ve eşlenik (su küründe tutulan) numunelerin elastisite modülleri verilmektedir. Şekil 9.3’te elastisite modülleri sütun grafik halinde gösterilmiş ve Şekil 9.4’te çevrimler sonrası elastisite modüllerinin değişimleri (%) eşlenik dayanımlarla kıyaslanarak verilmiştir.

Tablo 9.2 Çevrimlere giriş, çevrimlere eşlenik ve çevrim sonrası elastisite modülleri

<i>Beton kodu</i>	<i>Birim</i>	<i>Dayanım Türü</i>		
		<i>Giriş</i>	<i>Eşlenik</i>	<i>D-Ç</i>
C00	GPa	34	41	41
C01		33	37	37
C02		33	38	38
C03		34	42	42
C10		31	31	31
C11		35	37	38
C12		31	34	36
C13		35	35	35
S00		39	41	35
S01		36	38	38
S02		39	36	36
S03		36	38	35
S10		33	33	33
S11		34	38	33
S12		33	33	33
S13		36	34	34



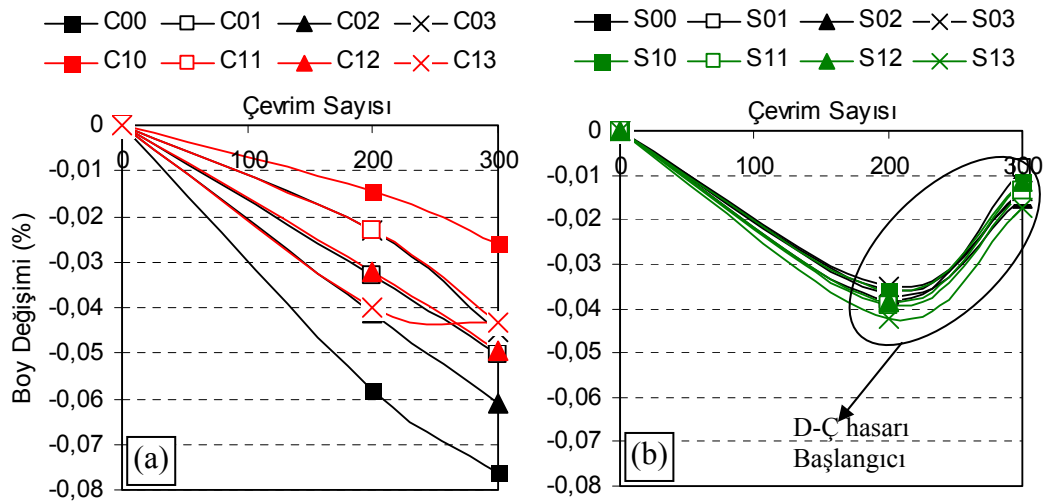
Şekil 9.3 D-Ç çevrimlerinden önce ve sonra elastisite modülleri (DÇ: 300 çevrim sonrası elastisite modülü, EŞ: çevrimler sürerken suda bekleyen numunelerin elastisite modülü, GR: çevrimlere giriş elastisite modülü).



Şekil 9.4 D-Ç sonrası elastisite modüllerinin değişimi.

Şekil 9.4'ten cürüflü seriler incelendiğinde %8 ila %14 arasında değişen basınç dayanımı kayıplarıyla paralel düşük düzeyde kayıplar görülmektedir. Hava sürüklenmiş makro lifli seride (S11) bu değer en büyük değerdedir (%14). Hava sürüklenmemiş lifsiz seri (S00) %13 ve hava sürüklenmemiş karma lifli seri (S03) %8 oranında kayıp yaşamıştır. Basınç dayanımı kaybeden numuneler elastisite modülü de kaybetmişlerdir. Cürüflü matriste görülen kayıplar düşük seviyelerde de olsa %50 oranında cüruf ikamesinin 56 gün kür süresine rağmen bir miktar olumsuzluk sergileyebileceğini göstermektedir. Ancak kayıpların önemsiz mertebelerde olduğu unutulmamalıdır. Lifsiz cürüflü matriste (S00), mikro ve makro liflerin don hasarını engelledikleri görülmektedir. Çimentolu serilerde kayıp yoktur. C11 ve C12 betonlarında çevrimler kür etkisi yapıp dayanımlarda olduğu gibi elastisite modüllerini de bir miktar (%3, %5) arttırmıştır.

Şekil 9.5'de çevrimler sırasında ölçülen boy değişimleri verilmektedir. Boy ölçümleri çözülme evresi sonunda yapılmıştır.



Şekil 9.5 Çimentolu (a) ve cürüflu (b) KYB'lerin çevrimler sırasındaki boy değişimi.

Görüldüğü üzere çimentolu matrislerde herhangi bir boy artışı görülmemektedir. Büzülme eğilimi sürekli. Literatürde dona dayanımlı betonların D-Ç çevrimleri sırasında büzülme davranışı içerisinde olması bilinen bir durumdur. Cürüflu serilerde de büzülme davranışı baskındır fakat 200. çevrimden sonra tüm cürüflu serilerde büzülme durmakta ve rölatif olarak şişme başlamaktadır. Cürüflu matrislerde az değerlerde görülen dayanım ve elastisite modülleri kayıpları bu durumun işareti. İlerleyen çevrimlerde (500) karışımlar arasındaki farkların daha belirgin olarak ortaya çıkması beklenebilir. Ancak 300 çevrim sonrasında her iki matrisde de belirgin bir hasar mekanizması gelişmemiştir (Şekil 9.5).

Ultra ses cihazı ile ses dalgalarının geçiş hızı (UPV) her 100 çevrimde bir hem suda bekleyen hem D-Ç çevrimleri gören beton kirişlerde kontrol edilmiştir. Eşdeğerlik için suya doygun halde ölçüm yapılmıştır. Tüm UPV'ler 4800 m/saniye civarındadır. Buradan hesaplanan tüm dinamik elastisite modülleri ( $E_d$ ) hava sürüklenmişlerde 50, hava sürüklenmemiş betonlarda 57 GPa dolaylarında çıkmaktadır. Ultra ses cihazı ile yapılan ölçümlerde net bir hasar belirtisine rastlanmamıştır. Basınç deneylerinde görülen düşük düzeydeki hasar, ultra ses cihazının suya doygun örneklerde kullanılmasından dolayı UPV'lere yansımamış olabilir. Suyu doygun ölçümlerde geçiş hızının bir miktar yükseldiği bilinmektedir (Neville, 1995).

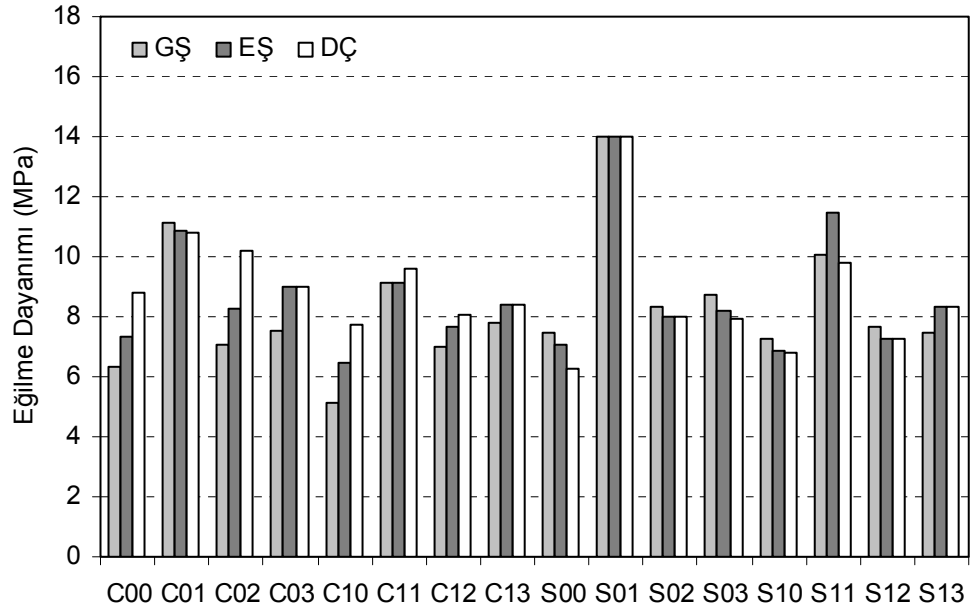


## 9.2 D – Ç Sonrası Eğilme Yükleri Altındaki Performans

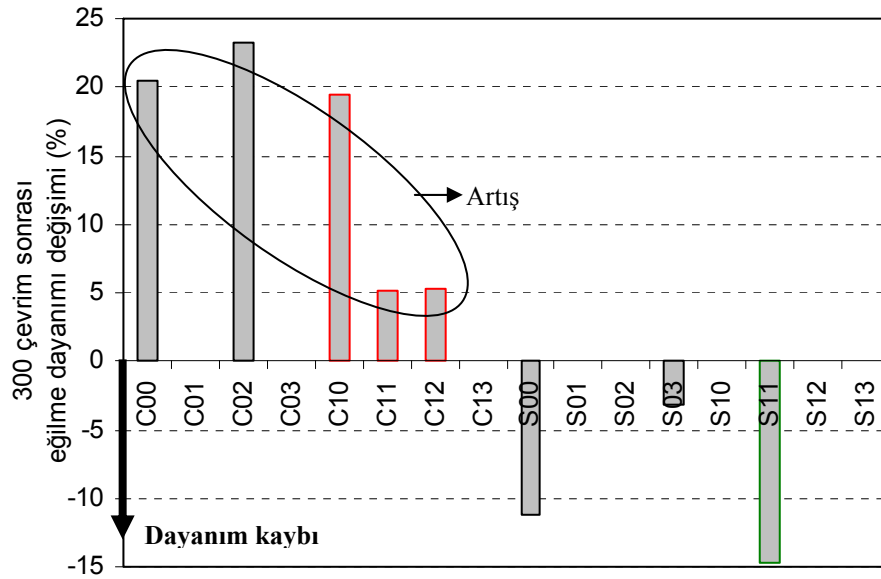
Tablo 9.3'te 300 D-Ç çevrimine maruz kalan ve eşlenik (su küründe tutulan) numunelerin eğilme dayanımları verilmiştir. Şekil 9.6'da bu dayanımlar sütun grafik halinde gösterilmiş ve Şekil 9.7'de çevrimler sonrası eğilme dayanımı değişimleri (%) eşlenik dayanımlarla kıyaslanarak verilmiştir.

Tablo 9.3 Çevrimlere giriş, çevrimlere eşlenik ve çevrim sonrası eğilme dayanımları.

<b>Beton kodu</b>	<b>Birim</b>	<b>Dayanım Türü</b>		
		<b>Giriş</b>	<b>Eşlenik</b>	<b>D-Ç</b>
C00	MPa	6,3	7,3	8,8
C01		11,1	10,8	10,8
C02		7,1	8,3	10,2
C03		7,6	9,0	9,0
C10		5,1	6,4	7,7
C11		9,2	9,1	9,6
C12		7,0	7,7	8,1
C13		7,8	8,4	8,4
S00		7,5	7,0	6,3
S01		14,0	14,0	14,0
S02		8,4	8,0	8,0
S03		8,7	8,2	8,0
S10		7,2	6,8	6,8
S11		10,1	11,5	9,8
S12		7,7	7,3	7,3
S13		7,5	8,3	8,3



Şekil 9.6 D-Ç çevrimlerinden önce ve sonra eğilme dayanımları (DÇ: 300 çevrim sonrası eğilme dayanımı, EŞ: çevrimler sürerken suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, GR: çevrimlere giriş eğilme dayanımı).



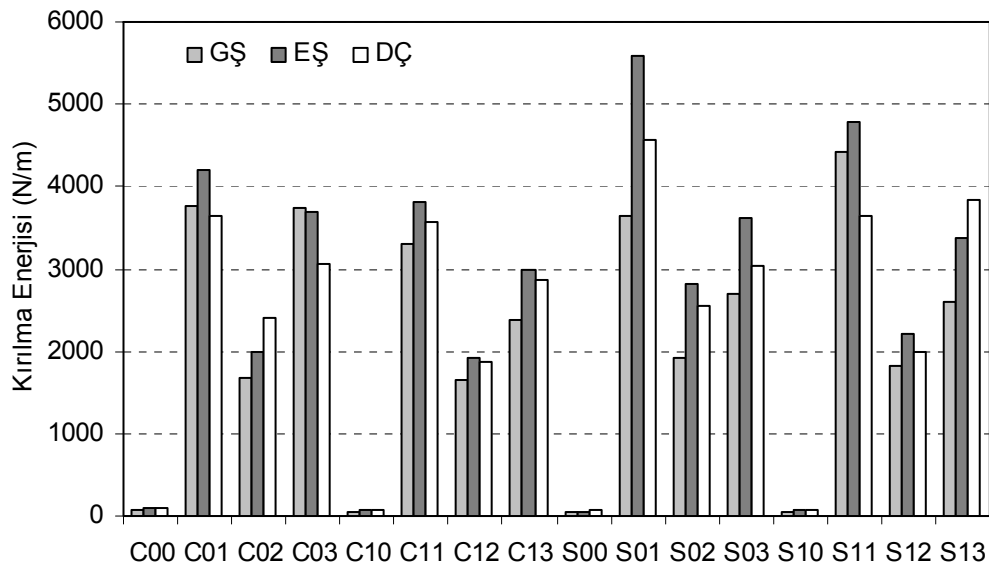
Şekil 9.7 D-Ç sonrası eğilme dayanımlarının değişimi.

Şekil 9.7’de 300 D-Ç çevrimi sonrası eğilme dayanımı değişimleri verilmektedir. Çimentolu serilerde D-Ç çevrimleri kür etkisi yaratmış ve basınç dayanımlarında olduğu gibi bazı serilerin dayanımı %5 ila %23 arasında yükselmiştir. Cüruf içeren serilerden basınç dayanımı kaybı yaşayan lifsiz (S00), karma lifli (S03) ve hava sürüklenmiş makro lifli seriler eğilme dayanımı kaybı da yaşamışlardır. Bu kayıplar S00, S03, S11 için sırasıyla %11, %3 ve %15 mertebesinde. Eğilme dayanımı kaybı da basınç dayanımı kayıplarının sırasında gitmektedir. Cürufllu hava sürüklenmemiş seride makro ve mikro lif kullanımı yalın matrisin aldığı hasarı önlerken, karma lif kullanımı azaltmıştır. Hava sürüklenmiş cürufllu matriste makro lif kullanımının, basınç dayanımı sonuçları da göz önüne alındığında olumsuz bir etkileşim yarattığı görülmektedir.

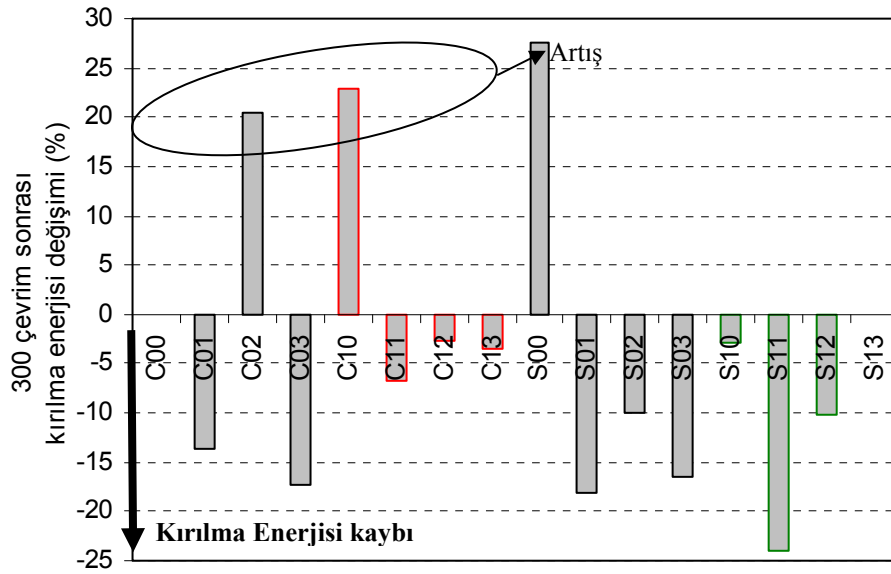
Tablo 9.4’te 300 D-Ç çevrimine maruz kalan ve eşlenik (su küründe tutulan) numunelerin kırılma enerjileri verilmektedir. Şekil 9.8’de kırılma enerjileri sütun grafik halinde gösterilmiş ve Şekil 9.9’da çevrimler sonrası kırılma enerjilerinin değişimleri (%) eşlenik dayanımlarla kıyaslanarak verilmiştir.

Tablo 9.4 Çevrimlere giriş, çevrimlere eşlenik ve çevrim sonrası kırılma enerjileri.

Beton kodu	Birim	Dayanım Türü		
		Giriş	Eşlenik	D-Ç
C00	MPa	74	90	89
C01		3764	4211	3636
C02		1688	1996	2406
C03		3744	3690	3055
C10		53	67	82
C11		3305	3820	3561
C12		1645	1910	1859
C13		2389	2978	2876
S00		47	55	70
S01		3633	5586	4571
S02		1928	2829	2545
S03		2688	3622	3028
S10		56	64	62
S11		4419	4787	3642
S12		1811	2221	1995
S13		2590	3387	3844



Şekil 9.8 D-Ç çevrimlerinden önce ve sonra kırılma enerjileri (DÇ: 300 çevrim sonrası kırılma enerjisi, EŞ: çevrimler sürerken suda bekleyen numunelerin kırılma enerjisi, GR: çevrimlere giriş kırılma enerjisi).

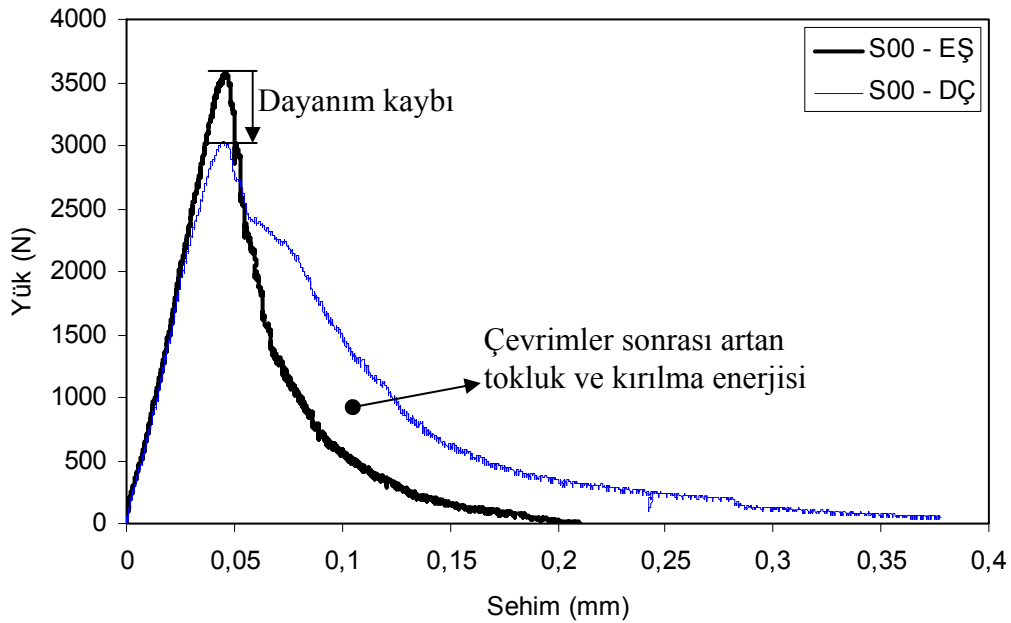


Şekil 9.9 D-Ç sonrası kırılma enerjilerinin değişimi.

Şekil 9.9’da eşlenik numunelere kıyasla D-Ç sonrası kırılma enerjilerinin değişimi görülmektedir. Eğilme dayanımından daha farklı sonuçlar mevcuttur. Çimentolu hava sürüklenmemiş C01 (makro lifli) %13, C03 (karma lifli) %16 kırılma enerjisi kaybına uğramıştır. Çimentolu hava sürüklenmiş serilere bakıldığında C11, C12 ve C13’ün %2 ila %6 arası kayba uğradığı görülmektedir. C11 ve C12 serilerinin eğilme dayanımları artmasına rağmen kırılma enerjileri azalmıştır. C10’ın hem eğilme dayanımı hem de kırılma enerjisi (%23) yükselmektedir. C00’ın eğilme dayanımının artmasına rağmen kırılma enerjisi değişmemiştir. Çimentolu serilerde genel olarak lif kullanılan KYB’lerin D-Ç ortamından lifsizine kıyasla daha çok etkilendiği (C02 hariç) ve mikro liflerin diğer lif kombinasyonlarından daha başarılı olduğu görülmektedir. Çimentolu matrislerde hava sürükleme sonucu genel itibariyle kırılma enerjisi kayıpları azalmaktadır. Çimentolu matrislerde en büyük kayıplar makro lif içeren KYB’lerde olmuştur.

Şekil 9.9’dan cüruflu hava sürüklenmemiş serilere bakıldığında S00 lifsiz serisi %10 eğilme dayanımı kaybı yaşamasına rağmen kırılma enerjisinin %27 arttığı görülmektedir. Hava sürüklenmemiş cüruflu seride lif kullanımı sonucu D-Ç zararı artmıştır. Hava sürüklenmemiş cüruflu matrisler içinde S01 (makro lifli) ve S03 (karma lifli) serilerinin kırılma enerjileri kayıpları da sırasıyla %17 ve %16 olarak en

büyüktür. Mikro lif kullanımı sonucu %10'luk kayıp görülmektedir. Lifsiz S00 serisinin eğilme dayanımı kaybına uğrarken kırılma enerjisinin %27 gibi önemli bir oranda yükselmesi zayıflayan agrega – matris ara yüzeyinin çatlak yolunu uzatmasıyla alakalıdır. Mekanik performansın araştırıldığı bölümde çatlağın agregayı yararak ilerlediğinden bahsedilmişti. Tüm lifsiz seriler içerisinde eşlenik kırılma enerjilerine bakıldığında en gevrek olduğu anlaşılan S00 matrisi için agrega – matris ara yüzeyinin hasar görmesi kırılma enerjisi açısından olumlu bir sonuç yaratmıştır. Hem kuyruk bölgesi uzamış hem de daha yukarıdan gitmiştir (Şekil 9.10).



Şekil 9.10. S00 numunesinin 300 çevrim sonrası dayanım kaybı yaşamamasına rağmen artan kırılma enerjisini gösteren yük – sehim eğrisi.

Şekil 9.9'dan cürufllu hava sürüklenmiş matrislere bakıldığında en büyük eğilme dayanımı kaybına uğrayan makro lifli serinin (S11) kırılma enerjisi kaybının da en büyük olduğu görülmektedir (%24). S12 %10, S10 %3 kırılma enerjisi kaybına uğrarken S13 serisinin kırılma enerjisi kaybını durdurduğu görülmektedir. Hava sürüklenmiş cürufllu matrislerde karma lif kullanımı kırılma enerjisi kaybını önlerken mikro ve makro lif kullanımı arttırmıştır. Cürufllu matrislerde hava sürüklenme bir tek karma lifli matrisin kırılma enerjisi kaybını azaltmıştır.

### 9.3 Bölümle İlgili Genel Değerlendirme

Genel olarak bakıldığında salt mikro lif içeren serilerin eğilme dayanımı kaybına uğramadığı ve büyük oranda kırılma enerjisi kayıplarının makro life göre daha az olduğu görülmektedir. Mikro liflerin mikro çatlaklara denk gelme ihtimali birim alandaki lif sayısının fazla olmasından dolayı daha yüksek ihtimaldedir. Ayrıca hasar geliştikçe genişmeyi kısıtlayıcı etki yaptıkları bilinmektedir (Atis ve Karahan, 2007; Nawy, 2001). Mikro liflerin çok dayanım kaybetmemiş numunelerde de olsa makro liflerden daha iyi davranması mikro çatlakları daha büyük oranda köprülemesi ile açıklanabilir.

KYÇLB'lerin KYB'lere göre 300 çevrim sonunda kırılma enerjisi noktasında daha çok zarar gördüğü görülmektedir. Bu durum çelik lif ve matris fazı arasındaki termik genişleme – büzülme farkından kaynaklanabilecek ara yüzey hasarından dolayı olabilir. Ayrıca yalın matrislerin çok düşük olan kırılma enerjilerinin, liffsiz matrisin 20-90 katı kırılma enerjisine sahip olan çelik lifli matrislerden D-Ç sonrası daha az hasar görmüş gibi gözükmesi beklenebilecek bir sonuçtur.

%50 cüruf ikameli serilerde az da olsa dayanım kayıpları ve elastisite modülleri düşüşü görülürken çimentolu kontrol karışımlarında dayanım kaybı olmamıştır. Bu durum %50 gibi yüksek cüruf ikamesinin 56 gün su kürüne rağmen çimento kadar boşluksuz ve hidrate bir yapı oluşturamadan çevrimlere başlandığını göstermektedir. Ancak kayıpların çok düşük düzeyde olduğu unutulmamalıdır. Cürufun ve diğer puzolanik katkıların bu etkiyi yapabilecekleri, ince öğütülmüş cürufun basınç dayanımlarını arttırdığı ancak ikame dozajının arttıkça kür süresine daha hasas oldukları bir çok çalışmada saptanmıştır (Kim vd., 1996; Persson, 2003; Chang vd., 2001; Chang, 2004; Lawrence vd., 2005). Genel olarak çalışmada kullanıldığı gibi yüksek bağlayıcılık özellikli ince öğütülmüş yüksek fırın cürufunun KYB içerisinde %50 ve belkide %60 ikame oranlarında kullanılması 56 gün ve üzeri kür sonrasında durabilite performansı açısından tatminkar gözükmektedir.

300 çevrim sonrası numunelerde herhangi bir görsel hasar oluşmamıştır. TS EN 206-1'de çevresel etki sınıflarına göre en olumsuz koşulda çimento dozajı 340 kg/m<sup>3</sup>, S/Ç=0,45 ve sürüklenen hava içeriği %4'tür. Bu açıdan teze konu olan karışımların D-Ç etkisine dayanıklı olduğu değerlendirilebilir. Kimi serilerde çevrimsel ortam kür etkisi yaparken kimilerinde az da olsa hasara sebep olmuştur. 0,43 S/Ç (50-60 MPa) oranlı boşluksuz bir yapıya sahip olan KYB'lerin hava sürüklemenin etkisini gösterebileceği mertebede hasar görmediği görülmektedir. Bu açıdan hava sürükleyicinin etkinliği sezilememektedir. Hasar oluşmasına neden olacak çevrime kadar çalışma devam etmektedir. Net hasar sonrası liflerin ve hava sürükleyicinin etkisi belirginleşecektir.

Özetle D-Ç çevrimlerinde iki önemli etkiden bahsedilebilir. Birinci etki su ortamında zamanla bağlayıcının reaksiyon yapması hem dayanımın hem de agrega – matris ve lif – matris aderanslarının gelişmesidir. İkinci etki ise D-Ç nedeniyle arayüzeyde oluşan hasarlar ve matriste görülen yıpranmalardır. Burada genelde kür etkisinin 300 çevrimde D-Ç hasarından baskın olduğu veya hasarların ölçülen özellikler üzerindeki etkilerinin kür etkisiyle gölgelendiği görülmektedir. Çevrim sayısının artışıyla D-Ç etkilerinin daha belirgin olarak ortaya çıkması beklenmektedir.



## **BÖLÜM ON**

### **MİKROYAPI ÇALIŞMALARI**

Bu bölümde KYB ve KYÇLB örnekleri üzerinde yapılan SEM (taramalı elektron mikroskobu), destek teknoloji olarak EDS (enerji dağıtma spektrometresi) ve DTA/TGA (diferansiyel termal analiz/termogravimetrik analiz) eşzamanlı termal analiz sonuçları aktarılmaktadır. Tüm analizler yaklaşık 300 gün yaşındaki numunelere yapılmıştır.

#### **10.1 SEM Analizleri**

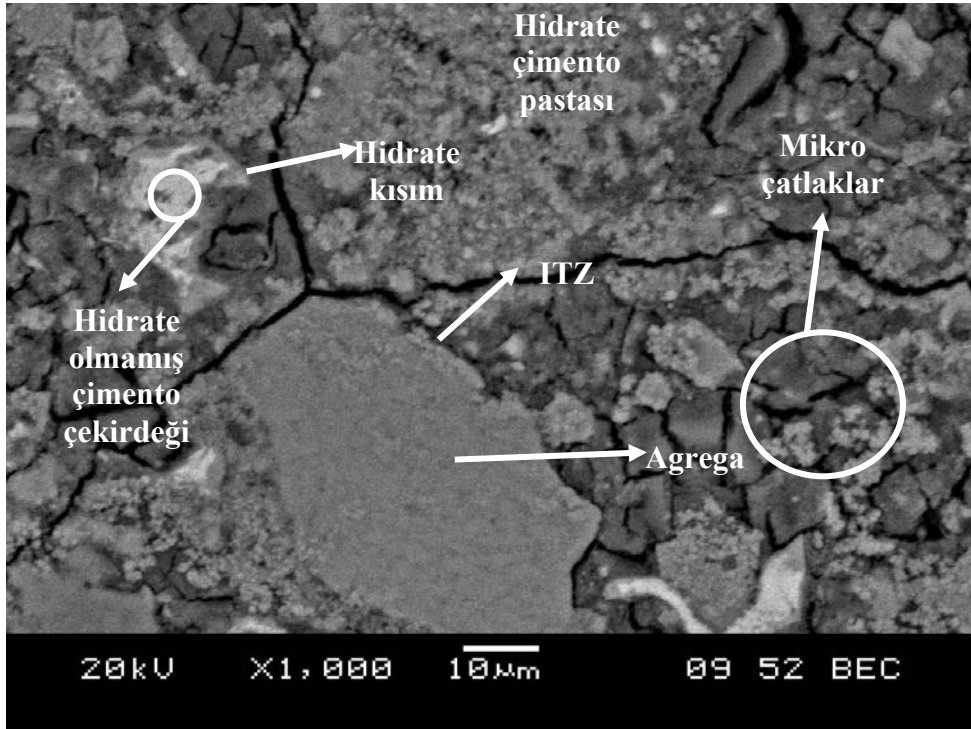
SEM çalışmalarında kırık yüzeyler için SEI, parlak yüzeyler için BEC modunda çalışılmıştır. Bazı durumlarda parlak yüzeylerde ayrıntıların görülebilmesi için SEI moduna da geçilmiştir.

D-Ç hasarlarının yakalanabilmesi için parlak kesit daha uygundur. Çatlakların ilerlediği hatlar iki boyutlu uzayda daha rahat görülebilmektedir. Ancak çevrimler sırasında hareketlenen boşluk solüsyonlarındaki mobil iyonların (Ca, Al, S, Fe vb.) boşluklarda oluşturabildiği yapıların geometrisi için kırık yüzey çalışmak daha fikir verici olabilmektedir.

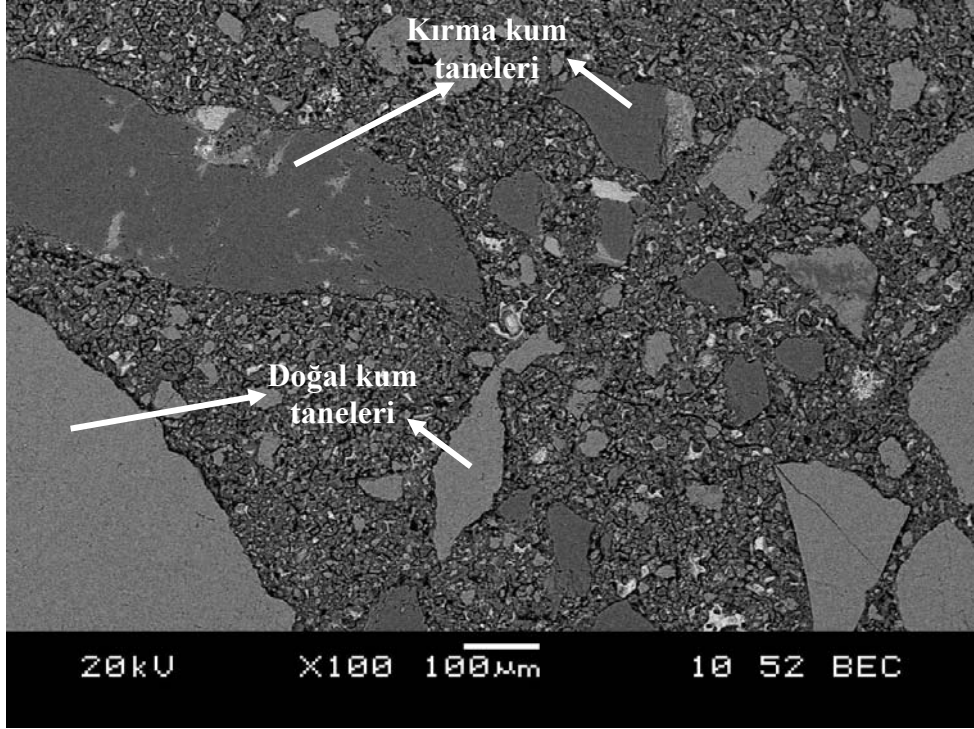
Parlak kesit numuneleri poliester kalıp dökülerek hazırlanmıştır. Poliester kalıp sertleştiğinde kalından inceye doğru 10 adet çeşitli kalınlıklarda zımparadan geçirilip yüzeyleri düzeltilip poliesterden arındırılmıştır. Parlatılmış numuneler SEM incelemesinden önce etüvde 24 saat süreyle 50°C’de kurutulmuştur. Ardından vakum altına alınıp yüzeyleri ince bir altın tabakasıyla kaplanmıştır. Kırık yüzeylerde ise sadece kurutma, vakum altına alma, kaplama ve karbon bant ile metal platform (stage) üzerine yerleştirme işlemi uygulanmıştır. SEM çalışmaları D-Ç geçirmiş örneklerde yapılmıştır.

Şekil 10.1’de sırf çimentolu (C00) seride parlak kesit üzerinden alınan SEM fotoğrafı gösterilmektedir. Bir yıllık olan bu numunelerde halen hidrate olmamış çimento çekirdekleri daha açık tondayken, hidrate olmuş dış kısım gri görülmektedir. Agreg a etrafında matrisle bağın sağlandığı ara yüzey geçiş bölgesi (ITZ) görülmektedir.

Şekil 10.2’de karışımlarda kullanılan kırma ve doğal kumların yoğunluk farklılıklarından dolayı renk farkı verdikleri görülmektedir. Elektronları yansıtma oranı bölgenin yoğunluğu arttıkça arttığından fotoğraflarda en yoğun kısımlar (hidrate olmamış çimento taneleri) en açık tonda gözükmektedir. Matriste mikro çatlaklar gözlenmektedir.



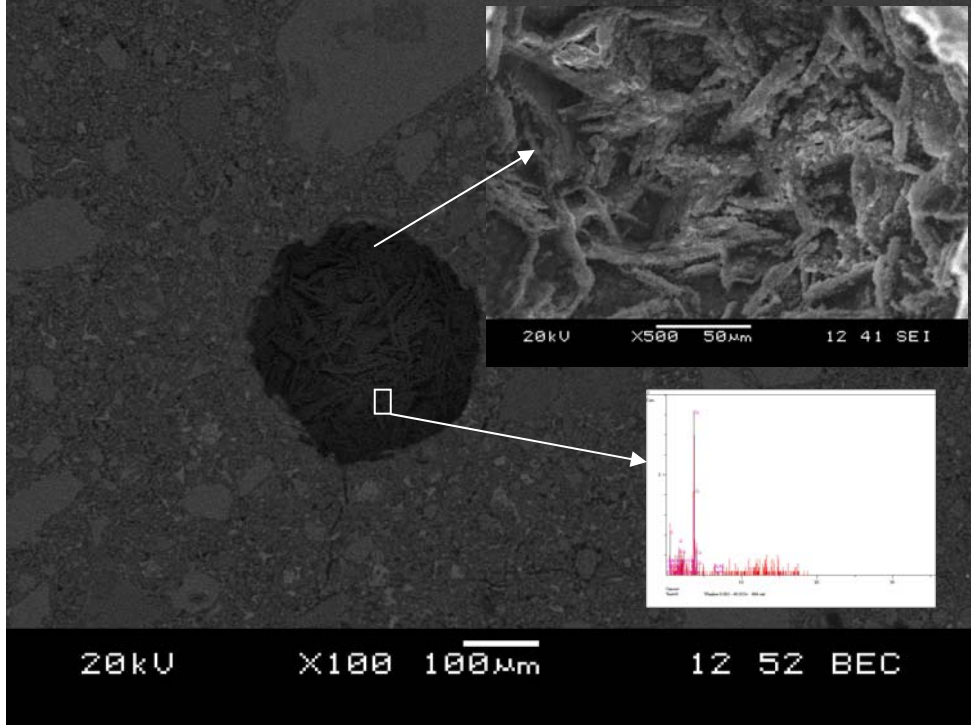
Şekil 10.1 Matristen genel bir fotoğraf (C00).



Şekil 10.2 Kırma ve Doğal kum tanecikleri (C00).

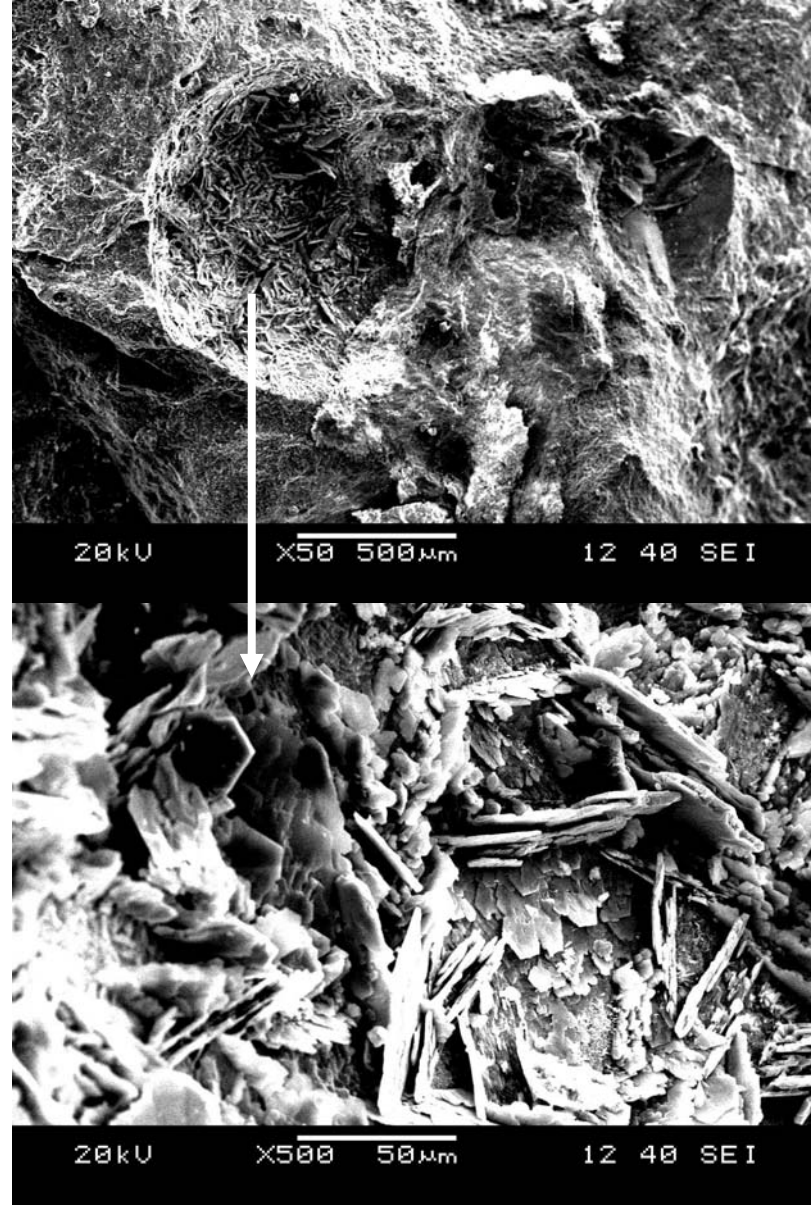
Fotoğraflarda siyah renkler çatlak ve boşluk yapısını göstermektedir. Bu bölgelerin yoğunluğu en az olduğundan koyu renkte gözükmeakteler. Donma çözülme geçirmiş örneklerde fotoğraflama yapıldığından gerek örnek hazırlama esnasında gerekse D-Ç çevrimleri sırasında oluşmuş mikro çatlaklar görülebilmektedir.

Şekil 10.3'te matris içerisinde küresel makro boşluk yapısı ve içerisinde kireçli oluşumlar görülmektedir. EDS analizinde (dikdörtgen içine alınan bölgeden) ağırlıkça %35 Ca ve %4,5 Fe ve %4 Si bulunmaktadır.



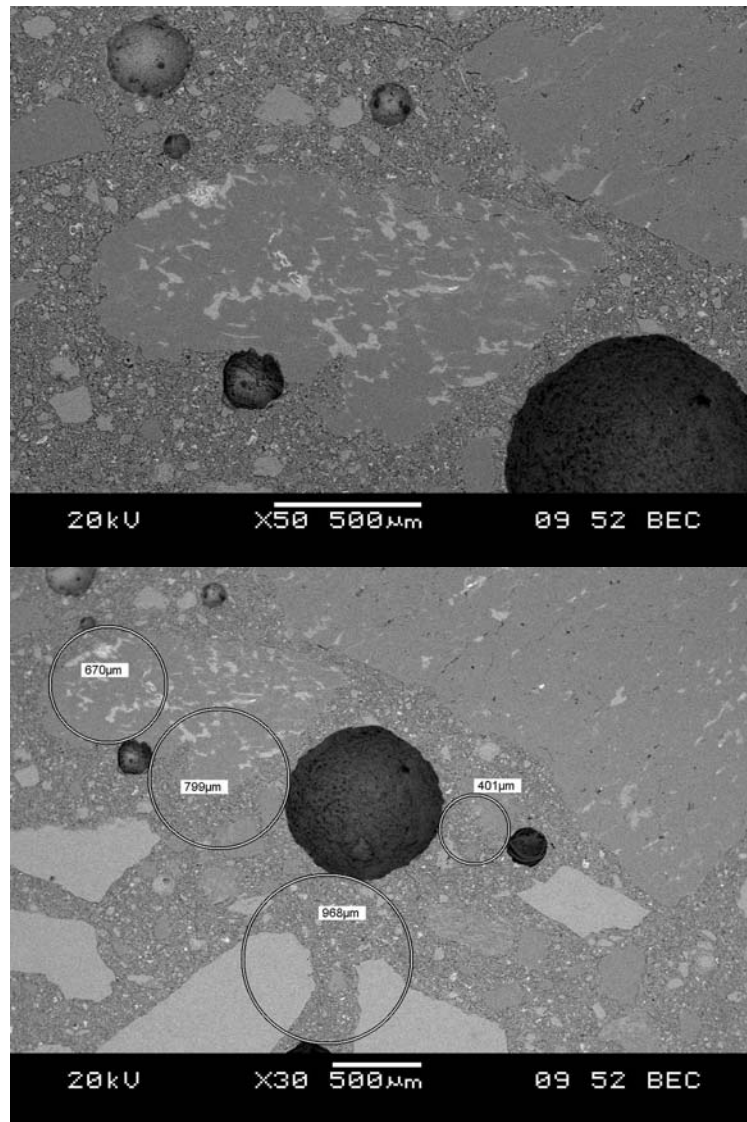
Şekil 10.3 Makro boşluk içerisindeki kireç kristali yapıları (C00).

Şekil 10.3'e benzer yapılar kırık yüzey çalışmalarında SEI modunda da saptanmıştır. 700 µm çapında büyük bir boşlukta kireç esaslı yapılarının hekzagonal plaka yapısında olduğu görülmektedir. Ca'nın ağırlıkça %62 olduğu bu yapı  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'dir (Şekil 10.4).



Şekil 10.4 Makro boşluk içerisinde  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kristalleri oluşumu (C00).

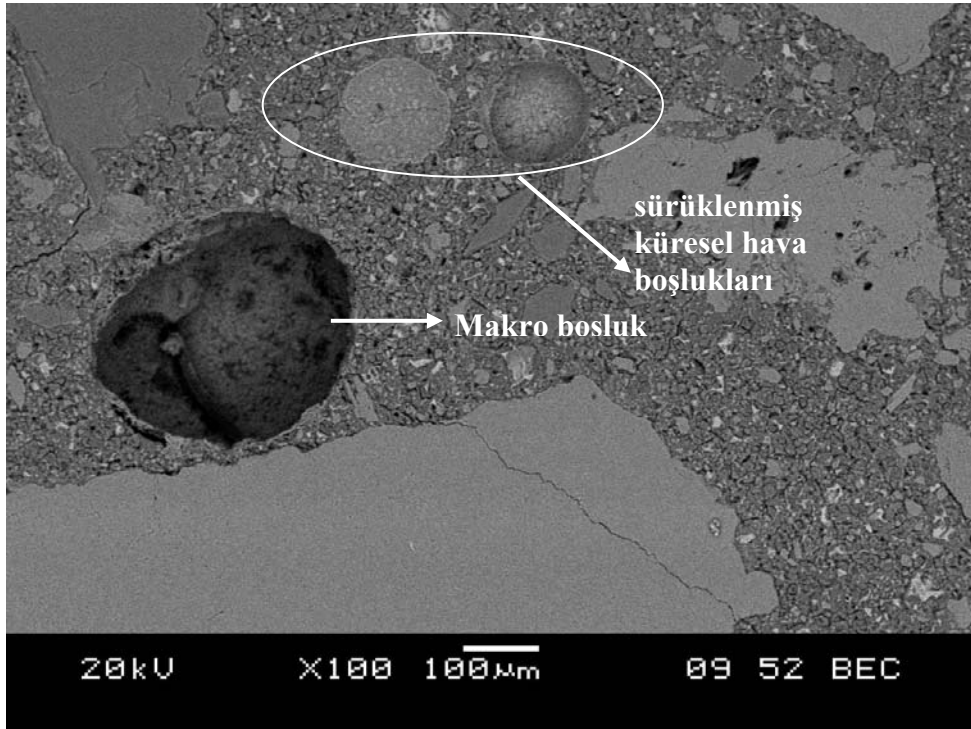
Mehta ve Monteiro (2006) hava sürükleyiciler ile sürüklenen hava çapının 50 – 200  $\mu\text{m}$  arasında, beton içinde hapsolan hava boşluklarının 1 – 3 mm arasında çap değerlerine sahip olduklarını söylemektedir. Hava sürüklenmiş çimentolu seride don hasarına karşı etkin olan sürüklenmiş hava boşlukları görülmektedir (Şekil 10.5). Sürüklenen hava boşluklarının genellikle 50 $\mu\text{m}$ 'den büyük ve birbirleri arasındaki mesafenin ortalama 300 ila 1000 $\mu\text{m}$  civarında olduğu görülmüştür. Ancak yorum yapabilmek için daha çok örnek üzerinde grafiksel işleme programları ile analiz yapmak gerekmektedir.



Şekil 10.5 Makro boşluk etrafında kümelenen sürüklenmiş hava Boşlukları (C10).

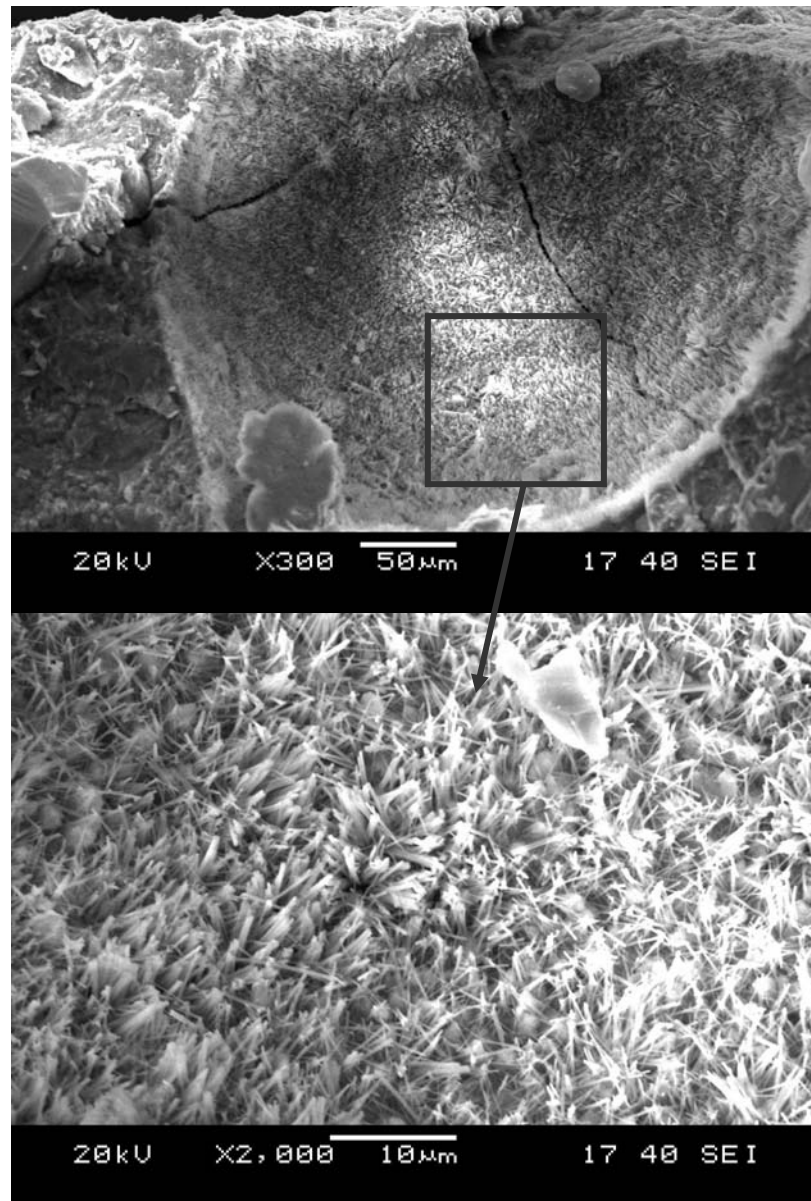
Pigeon (1986) tarafından 500  $\mu\text{m}$  ortalama kabarcık aralığına kadar betonların durabil olduğu saptanmıştır .

Çalışmalarda sürüklenen hava çaplarının nispeten büyük olduğu ve 50 $\mu\text{m}$ 'den küçük olanlarının çok az olduğu görülmüştür. Ayrıca hava sürüklenen serilerde makro boşluklar da artmış gözükmemektedir (Şekil 10.6). Boşluk çapı küçüldüğünde içerisindeki suyun donma derecesi düşmektedir. Ayrıca kritik boşluk mesafesi, minimum sıcaklık ve maruz kalınan çevrim sayısına göre değişebilmektedir. Numunelerin 300 çevrimde belirgin bir hasar görmemiş olması geçirimsizlikle ve dolayısıyla boşlukların suya doygunluğuyla birebir alakalıdır. Dökümü yapılan KYB'ler ortalama üstü performans sınıfındadır (C45 – 55). Bu nedenle 300 çevrimde hava sürüklenmiş matris ile sürüklenmemiş arasında belirgin D-Ç performansı farkı yoktur.



Şekil 10.6 Hava sürüklenme sonucu daha sık görülen makro ve sürüklenen hava boşlukları (C10).

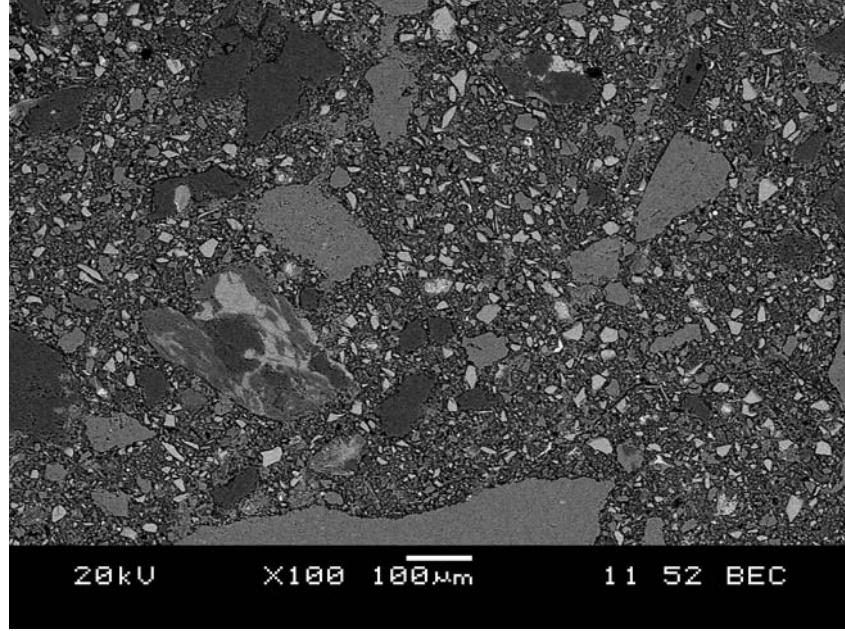
Hava sürüklenmiş matriste (C13) kırık yüzey fotoğrafında 200 µm çaplı küresel bir boşluk içerisinde iğneli bir yapı görülmektedir (Şekil 10.7). EDS analizinden Ca %41, S %6,4, Si %3,3 ve Al %5,4 bulunmuştur. S/Al oranının saf bir etrenjitte 1/3 dolaylarında olduğu (Tosun, 2007) göz önüne alınırsa bu yapının Alüminaca yüksek genç bir etrenjit yapısı olduğu söylenebilir. Anca oluşan iğneler çepere baskı yapacak bir boyuta ulaşamadıkları için gecikmiş etrenjit hasarı yaratmaları söz konusu olmamıştır. Zaten bu yapıya numunenin her noktasında rastlanamamıştır.



Şekil 10.7 Hava boşluğu içerisinde oluşmuş iğnemsî etrenjit yapısı (C13).

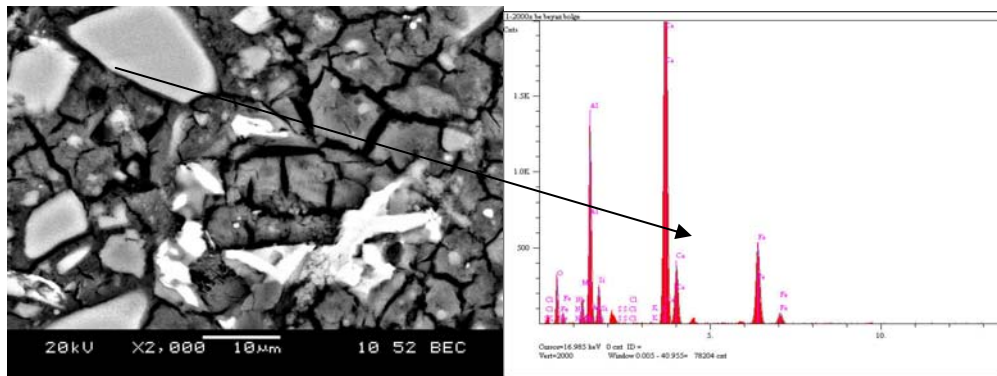


Şekil 10.8’te cüruf içeren matris (S00) gösterilmektedir. Görüldüğü üzere cüruf tanecikleri matrisin her yerine düzenli biçimde yayılmışlardır. Açık renkleri ve köşeli yapılarıyla çimento tanelerinden ayırt etmek mümkündür.



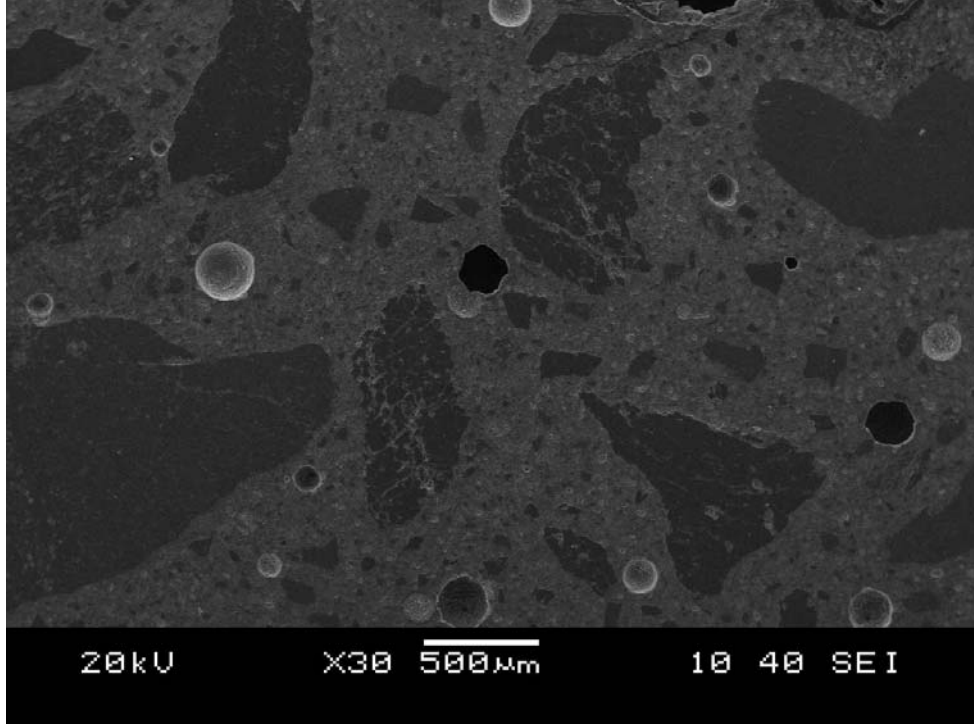
Şekil 10.8 Cürufun matrise homojen yayılmış durumu (S00).

Şekil 10.9’da bir cüruf tanesinin EDS analizi vardır. Analizde ağırlıkça %20 demir olduğu dikkati çekmektedir. Cüruf tanesinin etrafında gri halka biçiminde hidrate olmuş kısım bulunmaktadır.



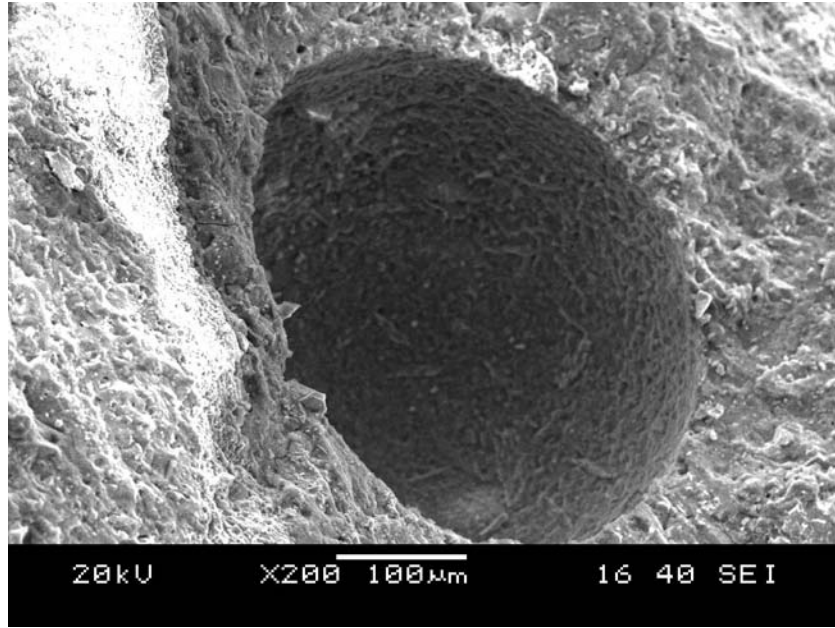
Şekil 10.9 Cüruf tanesi ve EDS pikleri (S00).

Şekil 10.10’da parlak kesitten SEI modunda alınmış bir fotoğraftan hava sürüklenmiş cürüflu matriste sürüklenen hava boşlukları görülmektedir. Boşlukların çaplarının 30 ila 200 $\mu\text{m}$  arasındadır. Birbirleri arasındaki mesafelerin 500 $\mu\text{m}$  civarı oldukları görülmektedir.



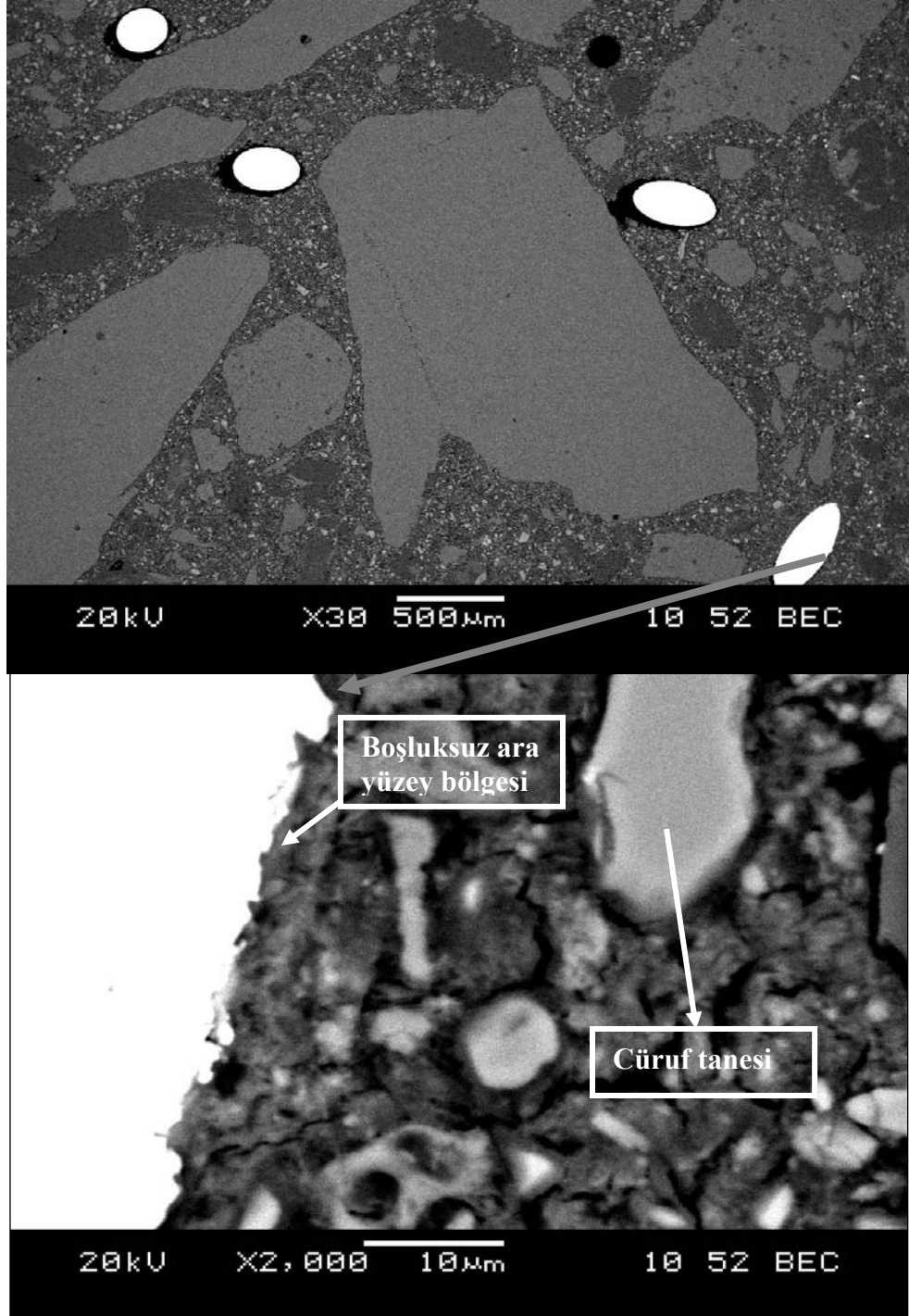
Şekil 10.10 Cürüflu matriste sürüklenen hava boşlukları (S10).

Cüruflu serilerde boşlukların içerisinde kireç birikiminin çimentolu serilerde olduğu gibi yapılar oluşmadığı, oluşsa bile çok yüzeysel kaldığı görülmektedir. Bu durum cürufun puzolanik reaksiyonlara kireci bağlaması ile açıklanabilir. Böylelikle D-Ç sırasında mobil haldeki çözeltiler kireç bakımından seyrelmiştir (Şekil 10.11). Fotoğraf kırık yüzey incelemelerinden elde edilmiştir.



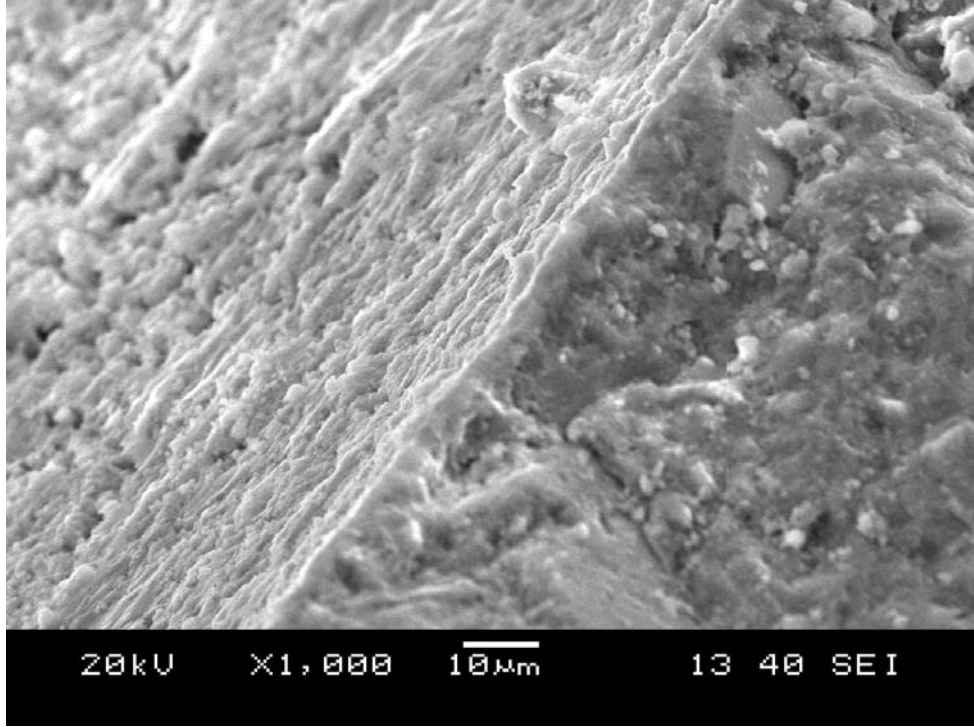
Şekil 10.11 Cüruflu matriste içi boş küresel boşluk.

Parlak kesit incelemelerinde hem cürüflu seride hem çimentolu seride liflerin matris tarafından sıkıca sarıldığı ve boşluksuz bir yapının olduğu görülmüştür. Gerek hamur bakımından zengin bir dizayn kullanılması gerekse KYB'nin üstün doldurma performansı liflerle beraber iyi sonuçlar vermektedir (Şekil 10.12).



Şekil 10.12 Cürüflu matriste liflerin genel dağılımı ve boşluksuz lif – matris ara yüzeyi (S03).

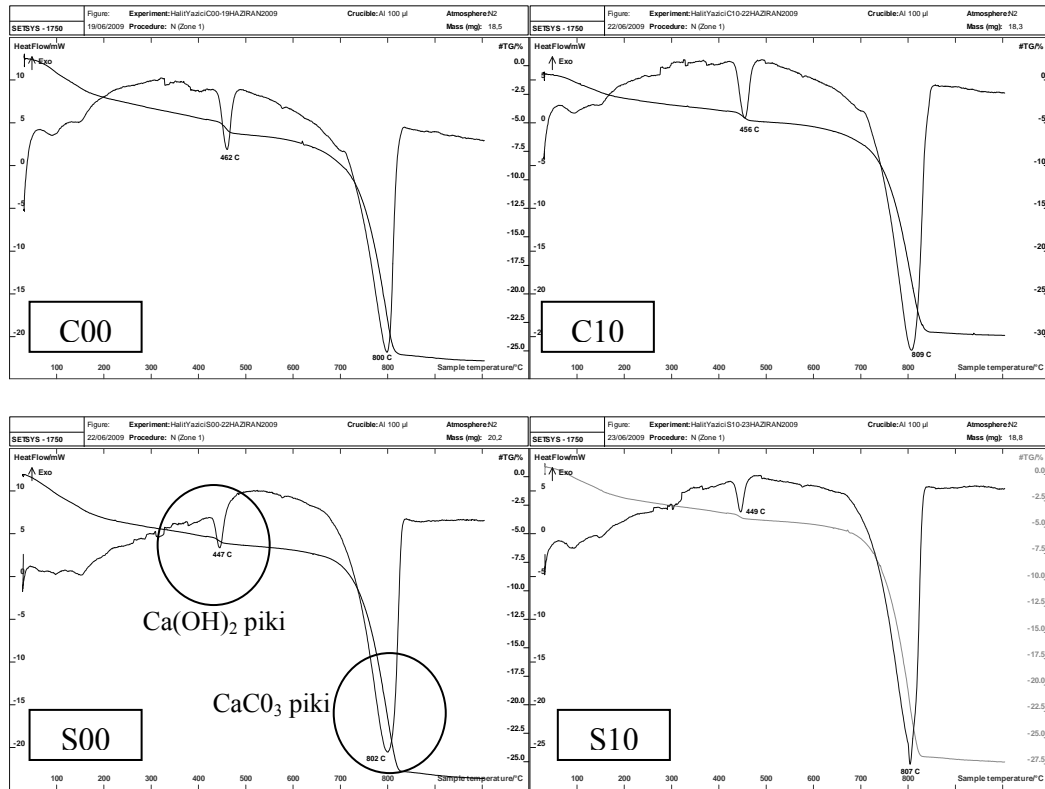
Şekil 10.13'te çimentolu matriste sıyrılmış lifin bıraktığı boşluk ile matris arasındaki bölge görülmektedir. Lifin sıyrıldığı bölgede CH tabakası görülmektedir. EDS sonuçları lif sıyrığı bölgesinde ve dış bölge arasında pek bir farkın olmadığı ancak Ca miktarının lif yüzeyi bölgesinde arttığını göstermektedir.



Şekil 10.13 Çimentolu matriste lif – matris ara yüzeyinin sıyrılmış bir lifin bıraktığı izde görünümü (C03).

## 10.2 DTA/TGA Analiz Sonuçları

Şekil 10.14'te dört ana matrisin DTA/TGA termal analizlerinin sonuç termografikleri verilmektedir. C00 çimentolu, C10 çimentolu hava sürüklenmiş, S00 cürüflü, S10 cürüflü hava sürüklenmiş matrislerin sonuçlarıdır.



Şekil 10.14 DTA/TGA eşzamanlı analiz sonuçları.

“C” serisi betonlarda  $\text{Ca(OH)}_2$  piki 460°C civarlarında gerçekleşmektedir. Hava sürüklemenin bu değeri etkilemediği görülmektedir. Bu bölgede kalsiyum hidroksit su kaybederek kalsiyum oksite dönüşmüştür. Cürüflü serilerde bu ilk pik değeri 450°C civarındadır. Pikin büyüklüğünün düşüşü kalsiyum hidroksitin cürufun puzolanik reaksiyonları sonucu bir miktar bağlandığını göstermektedir. 120 °C civarlarındaki sıcaklıklar serbest suların, 120-200 °C sıcaklıkları adsorbe suların, 200 - 600 °C sıcaklıklarında ise hidrate çimento pastasında kimyasal olarak bağlı suların serbest kaldığı noktalarlardır.  $\text{CaCO}_3$  bozulması 800 °C sıcaklıklarında görülmektedir. Bu ikinci pikte sadece çimento pastasının değil kireçtaşı agregasındaki  $\text{CO}_2$ 'nin ayrılmasının etkisi büyüktür. Görüleceği üzere hava sürüklemenin DTA/TGA

analizlerinde bir etki oluşturmadığı ancak cürufun serbest kireci bir miktar bağladığı görülmektedir.

### 10.3 Genel Değerlendirme

- Cürufli matrislerde hava boşluklarının içerisinde kireç bulunmazken, çimentolu matriste hegzagonal  $\text{Ca(OH)}_2$  kristalleri gözlenmiştir. Bu durumun sebebi serbest kirecin cüruf tarafından bağlanması ile açıklanabilir. Bulgu TGA/DTA analizlerinde cüruf kullanımı ile kireç pikinin düşmesiyle de örtüşmektedir.
- Gerek cüruf gerek çimento tanelerinin hidrate olmayan kısımları mevcuttur. Bu durum cürufli matriste daha belirgindir. Cürufun deney sonuçlarına göre mekanik performansı arttırdığı düşünülürse daha ince öğütülmesi durumunda çok büyük performansları sergileyebileceği düşünülebilir. Böylelikle KYB içerisinde %70'e varan değerlerde kullanım mümkün olabilir. Cürufun inceliğinin artırılması ile çimentodan çok daha iyi performans elde edilmesi mümkündür.
- Tüm serilerde lif – matris aderansının boşluksuz olduğu görülmektedir. Kendiliğinden yerleşen hamur fazının lifleri sıkı biçimde sarması özellikle eğilme yükleri altındaki performansı arttırmaktadır. Bu durum cürufli matriste daha güçlüdür.
- Donma – çözülme hasarları net biçimde saptanamamıştır. 300 çevrim sonucunda mekanik özelliklerde büyük düşüşler görülmediği dikkate alınırsa iç yapıda net hasarların beklenmesi doğru olmayacaktır. Ancak bir çok mikro çatlak resimlerde görülebilmektedir. Lif kullanılan serilerde ise bu çatlaklar azalmaktadır. Daha yüksek çevrim sayılarına ulaşıldığında yapılacak iç yapı incelemelerinin daha faydalı olması beklenmektedir.

## **BÖLÜM ONBİR**

### **SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) 20. yüzyılın sonlarında işçilik kalitesindeki değişkenliklerin giderilmesi, daha yoğun donatılı projelendirmelerin yapılabilmesi, mimari tasarımların sınırlarının kaldırılabilmesi amacıyla kullanıma başlamıştır. Daha sonraları yüksek işçilik maliyetlerinin giderilirken yapım sürelerinin kısaldığı gözlemlenmiştir. Ardından boşluksuz yapısı ve geleneksel betona kıyasla daha çok bağlayıcı içermesi gibi etmenler sayesinde yüksek performanslı beton olarak adlandırılmıştır. Yüksek performanstan kasıt dayanım, dayanıklılık özelliklerinin mükemmel olarak aynı betonda bulunmasıdır. Ayrıca yüksek toz içeriği gerektirmesi sebebiyle bu beton türü atık malzemelerin değerlendirilmesi için bir fırsat olarak görülebilir.

Deneysel çalışmalarda bu noktalardan hareketle yüksek oranda atık bir malzeme olan yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Ayrıca yarı gevrek beton malzemesine bir miktar süneklik katabilen çelik lif takviyesi uygulanmıştır. Dayanım parametreleri artık beton kalitesini sınıflandırmada yeterli olmadığından en sık rastlanan durabilite sorunlarından D-Ç etkisi araştırılmıştır. Dayanıklılık parametresine bir ek olarak betonun kırılma enerjisi incelenmiştir çünkü literatür çalışmalarında durabilite zorlamalarının kırılma parametrelerine etkisi hemen hemen hiç araştırılmamıştır.

Deneme amaçlı yapılan taze hal araştırmalarında  $80 \text{ kg/m}^3$  çelik lif dozajı ile kendiliğinden yerleşebilirliğin sağlanamadığı görülmüştür.  $60 \text{ kg/m}^3$  lif dozajında tasarımın hassas dengelere sahip olduğu görülmüştür. Taze hal açısından  $40 \text{ kg/m}^3$  çelik lif dozajı sahada kullanım düşünüldüğünde uygun bir dozajdır. Mikro lifli matrislerin neredeyse lifsiz matris kadar akıcı olduğu görülmüştür. Makro boyuttaki lifler akıcılığı ve yerleşebilirliği kötü etkilemektedir. Karma lif kullanımı ise matrise göre farklı sonuçlar doğurabilmektedir. Cüruf kullanımı sonucu akışkanlaştırıcı katkı azaltılabilmektedir. Cürufllu matrisler gerekli taze hal yetilerine daha az akışkanlaştırıcı tasarrufu yaparak erişmişlerdir. KYB'nin maliyetinin en büyük



kısımının akışkanlaştırıcı katkıları olduğu düşünülürse bu sonuç çok önem arz etmektedir. Ayrıca hava sürükleyiciler süperakışkanlaştırıcı gibi işlenebilirliği arttırmaktadır. Ancak KYB içerisinde süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyicilerin bir arada kullanımı taze halde kritik bir dizayn gerektirmektedir. Viskozite oldukça düşmektedir.

Sertleşmiş beton sonuçlarında çelik liflerin eğilme dayanımını ve özellikle ilerleyen yaşlarda basınç dayanımlarını arttırdığı görülmektedir. Nihai basınç dayanımları düşünüldüğünde mikro liflerin daha iyi performans sergilediği söylenebilir. Ayrıca karma kullanım da bazen sinerjik etki yaratarak ayrı ayrı kullanımdan daha olumlu etki gösterebilmiştir. Lifler narinlikleriyle doğru orantılı olacak şekilde eğilme performansını arttırmıştır. Hacmen %0,5 lif içeriğinde makro liflerin dayanıma ve sünekliğe, mikro ve karma kullanımın daha ziyade sünekliğe katkı sağladığı görülmüştür. Cüruf kullanımı özellikle ilerleyen yaşlarda performansı arttırmıştır.

Durabilite performanslarına bakıldığında 300 D-Ç çevrimi sonucu tüm numunelerin hatırı sayılır bir hasara uğramadıkları görülmüştür. Bu açıdan hava sürükleyiciler bu çevrim sayılarında etkinliklerini gösterememişlerdir. Ayrıca cürufllu matrislerde bir miktar basınç, eğilme dayanımı kaybı olduğu görülmektedir. Ancak bu hasarlar çok düşük seviyededir. Cürufllu matrislerin tatminkar bir D-Ç dayanıklılığına sahip olduğunu söylemek mümkündür.

KYÇLB'lerin KYB'lere göre 300 çevrim sonunda kırılma enerjisi noktasında daha çok zarar gördüğü görülmektedir. Bu durum çelik lif ve matris fazı arasındaki termik genleşme – büzülme farkından kaynaklanabilecek ara yüzey hasarından dolayı olabilir. Araştırılması gereken bir sonuçtur. Mikro lif içeren serilerin eğilme dayanımı kaybına uğramadığı ve büyük oranda kırılma enerjisi kayıplarının makro life göre daha az olduğu görülmektedir.

D-Ç hasarının kırılma enerjilerine etkileri dayanım kayıplarından daha fazla ve farklı olmuştur. Örneğin gevrek bir matrisin agrega – matris arayüzeyinin mikro

boyutta hasar görmesi eğilme altında daha sünek davranışa sebep olmuştur. Ancak net davranışın belirlenmesi için daha çok çalışma yapmak gerekmektedir. D-Ç çevrimlerinden kırılma davranışı açısından cürüflü matrislerin daha çok etkilendiği görülmektedir.

İçyapı incelemelerinde 300 çevrim sonrasında kesin bir hasar belirtisi bulunamamıştır. Bu bulgu mekanik deney sonuçlarıyla örtüşmektedir. Ancak genel olarak cürüflü matrisin kireç kristallerinin oluşumunu azalttığı, serbest kireci bağladığı görülmektedir. Bu durumun hasar görülmesine sebep olacak daha yüksek çevrim sayılarında etkisini göstereceği tahmin edilmektedir. Ayrıca lifli matrislerde karakteristiği tam ayırt edilemeyen mikro çatlaklara daha az rastlanmaktadır. Çevrimler sürdürülecek ve net etkiler belirlenmeye çalışılacaktır.

İçyapı incelemelerinde büyük miktarda cüruf taneciklerinin hidrate olmadığı görülmektedir. Ancak buna rağmen dayanımlar çimentolu serilere göre oldukça başarılıdır. Cüruf taneciklerinin daha ince öğütülmesiyle bu başarının katlanacağını söylemek mümkündür.

%50 gibi yüksek bir oranda cüruf kullanımının KYB'lerde yaygınlaşması çevresel ve ekonomik açıdan çok yerinde bir karar olacaktır. Ancak özellikle atık tozların inceliğinin KYB taze haline yapacağı etkiler ile mekanik davranışa etkileri ileride çalışılması önerilen bir konudur.

Çalışmadan elde edilen veriler ışığında ileride yapılacak KYB'lerin geleneksel betondan oluşturdukları farklı içyapının D-Ç kalıcılığına etkisinin içyapısal çalışmalarla kıyaslanması önerilebilir. Ayrıca çeşitli atık tozların öğütülerek daha aktif filler haline getirilmesi ve KYB içinde değerlendirilme potansiyelinin araştırılması tavsiye edilebilir. Çeşitli durabilite hasarlarının kırılma parametrelerine etkisi halen bilinmeyen bir konudur. İçyapı hasarları – mekanik özellikler ilişkisinin daha ayrıntılı araştırılması önerilebilir.

## KAYNAKÇA

- ACI 544.1R-96. (1997). *State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, ACI.
- ACI 544.4R-88. (1999). *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*, ACI Committee Report, American Concrete Institute, ACI.
- Afrani, I. & Rogers, C. (1994). The effects of different cementing materials and curing on concrete scaling. *Cement and Concrete Aggregates*, 16(2): 132-9.
- Aggoun, S., Kheirbek, A., Kadri, E.H., ve Duval, R. (2002). Study of the Flow of Self Compacting Concretes. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*.
- 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*, pp.83-92.
- Al-Manaseer, A.A. & Albert, A.J. (1995). Measuring the Consistency and Workability of Superplasticized Concrete. *ACI Materials Journal May-June*, pp. 286-290.
- Alkan G. (2004). *Polipropilen Lifli Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arslan, A. (1993). Çelik Lifli Betonların Özellikleri ve Kullanım Potansiyeli, *Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 369*, s.29-33.
- ASTM C666. (1997). *Standart Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. American Society for Testing and Materials Standart Practice C666, Philadelphia, PA.

- Atis, C. D., Karahan, O. (2007). Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete. *Construction and Building Materials* article in press, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.002.
- Backstrom, J.E., Burrows, R.W., Mielenz, R.C. & Wolkodoff, V.E. (1958). *Journal of the American Concrete Institute*, 55: 261–272.
- Bassuoni, M. T. & Nehdi, M. L. (2008). Durability of self-consolidating concrete to combined effects of sulphate attack and frost action. *Materials and Structures Volume 41, Number 10 / December*, page 1657-1679.
- Bathnia, N. & Sheng, J. (1990). *Proceedings, MRS*, 211: 25–32.
- Banthia, N. (1992). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19: 26–38.
- Banthia, N. & Trottier, J.F. (1995). Concrete reinforced with deformed steel fibres. Part II: Toughness characterization, *ACI Materials Journal*, 92 (2), 146-154
- Baradan, B. (2000). *Yapı Malzemesi II*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:207, İzmir.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No 298, İzmir.
- Barragan, B.E, Gettu, R., Martin, M.A., & Zerbino, R.L. (2003). Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete - a parametric study, *Cement and Concrete Composites*, 25, 767-777.
- Baoju, L., Youjun, X., Shiqiong, Z. & Qianlian, Y. (2000). Influence of ultrafine fly ash composite on the fluidity and compressive strength of concrete. *Cem. Concr. Res.*, Vol: 30, pp. 1489-1493.

- Barros, J.A.O. & Cruz, J.S. (2001). Fracture energy of steel fiber-reinforced concrete, *Mechanics of Composite Materials and Structures, Vol. 8, No.1*, 29–45.
- Bartos, P. & Duris, M.(1994). Effects of the inclinations of steel fibres 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, pp. 320–331.
- Bayramov, F. (2004). *Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Optimum Tasarımı*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 221 sayfa.
- Beddar, M. (2004). Fibre-reinforced concrete – Past, present and future, *Concrete, April 2004 (38) 4, ABI/INFORM Trade & Industry*, pp. 47-49.
- Bentur, A., & Diamond, S. (1985). Crack Patterns in Steel Fiber Reinforced Cement Paste, *Materials and Structures, Vol. 18, No. 103*, 49-56.
- Bentur, A., Mindess, S., & Diamond, S. (1985). Pull out processes in steel fiber reinforced cement, *International Journal of Cement Composites & Lightweight Concrete, Vol. 7, No. 1*, 29-38.
- Bentur, A. & Mindess, S. (1990). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science, London and Newyork.
- Bentur, A., Wu, S.T, Banthia, N., Baggott, R., Hansen, W., Katz, A., Leung, C.K.Y., Li, V.C., Mobasher, B., Naaman, A.E., Robertson, R., Soroushian, P., Stang, H., & Taerwe, L.R. (1995). *Fibre-matrix interfaces*. High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites, eds. Naaman and Reinhardt. Chapman and Hall, London, 149-191.

- Berke, N.S., Cornman, C.R., Jeknavorian, A.A., Knight, G.F., Wallevik, O., (2002). The Effective Use of Superplasticizers and Viscosity-Modifying Agents in Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 173-178.
- Betterman, L.R., Ouyang, C., Shah, S.P. (1995). Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar, *Advanced Cement Based Materials, Vol. 2*, 53-61.
- Bijen, J. (2003). *Durability of Engineering Structures: Design, Repair and Maintenance*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Bishara, A.G. (1979). *Federal Highway Administration Report*, FHWA/OH/79/004.
- Bordeleau, D., Pigeon, M. & Bonthia, N. (1993). *ACI Materials Journal*, 89: 547–553.
- Bouzoubaa, N., Lachemi, M. (2001). Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash – Preliminary results, *Cement and Concrete Research*, 31, 413 – 420.
- Boyd, A. J. (1995). *Salt scaling resistance of concrete containing slag and fly ash*. M.A.Sc. Thesis, Toronto, Ontario, University of Toronto.
- Budiansky, B. & Cui, Y.L. (1995). *Mechanics of Materials*, 21: 139–146.
- Bury M.A., Christensen B.J., (2002). The Role of Innovative Chemical Admixtures in Producing Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 141-146.
- Chalmers, B. (1964). *Principles of Solidification*, New York: John Wiley.

- Chang, P. K., Peng, Y. N. & Hwang, C. L. (2001). A Design consideration for durability of high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23: 375-80.
- Chang, P. K. (2004). An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34: 623-9.
- Chen, B. & Liu, J. (2004). Effect of Aggregate On the Fracture Behavior of High Strength Concrete, *Construction and Building Materials*, 18, 585 – 590.
- Chidiac, S. E. & Panesar, D. K. (2008). Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days. *Cement and Concrete composites*, 30(2): 63-71.
- Colleparidi, M. (2001). *A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC)*. unpublished data, 10p.
- Copuroglu, O., Fraaij, A. L. A, Bijen, J. M. 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 Pres, 233–41.
- Copuroglu, O. (2006). *The characterisation, improvement and modelling aspects of Frost Salt Scaling of Cement-Based Materials with a High Slag Content*. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, pp.182.
- Corinaldesi, V. & Moriconi, G. (2004). Durable fiber reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*; 34: 249-254.
- Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R. & Torresan, I. (2002). Zero Energy System: An Innovative Approach for Rationalized Precast Concrete Production. *BIBM 17<sup>th</sup> International Congress of the Precast Concrete Industry*, İstanbul (Turkey), 8p.

- Craig, R.J. et.al.(1986). Fiber Reinforced Beams in Torsion, *ACI Structural Journal*, Title No 83-81, pp. 934-942, November-December.
- Cwirzen, A., Pentalla, V. (2005). Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 671-679.
- Darwin, D., Barham, S., Kozul, R., & Luan, S. (2001). Fracture Energy of High Strength Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.98, No. 5, 1-8.
- De Larrard, F., Ferraris, C.F. & Sedran, T. (1998). Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material, *Materials and Structures*, Vol. 31, 8/9, 494-498.
- D.S.İ. (1994). *Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton*. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Yayın No: MLZ-878.
- EFNARC (2002). *Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK,
- EFNARC (2005). *The European Guidelines for Self Compacting Concrete – Specification, production and use*. The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC), pp. 68.
- El-Dieb, A. S. (2009). Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers. *Materials and Design*, 30, 4286-4292.
- El-Niema, E.I. (1993). Fiber Reinforced Beams under Torsion, *ACI Structural Journal*, Title No 90-S50, September-October, pp.489-495.



- EM-1110-2 (2000). *Engineering and Design - Standard Practice for Concrete for Civil Works Structures*, Engineer Manuals, US Army Corps of Engineers, <http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em.htm>
- Erbaş, M. (1999). Lif Donatılı Betonlar. *Hazır Beton Dergisi, Ocak-Şubat*, s. 68-71.
- Erdoğan, T.Y. (1997). *Admixtures for Concrete*. METU Press, Ankara.
- Erdoğan, T. (2002). *Beton*. ODTÜ yayınları.
- Eren, Ö. ve Çelik, T. (1997). Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials, Volume 11, Issues 7-8*, Pages 373-382.
- Fagerlund, G. (1977). *Materiaux et Constructions (Paris)*, 10: 217–230; bicl. 231–251.
- Fagerlund, G. (1992). *Nordic Concrete Research, 1*: 20–36.
- Fang, W., Jianxiong, C., Changhui Y. (1999). Studies on selfcompacting high performance concrete with high volume mineral additives. *Proceedings of the First International RILEM Symposium*.
- Felekoğlu, B. (2003). *Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Felekoğlu, B., Yardımcı, M.Y. & Baradan, B. (2003-a). A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete. *Proceedings of the 3rd International Symposium of SCC, Reykjavik, Edited by Wallevik and Nielsson, RILEM publications PRO 33*, pp. 446-456.
- Ferraris, C.F. (1999). Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. *Journal of the National Institute of Standards and Technology, Volume 104*, pp. 461-478.

- Fukudome, K., Miyano, K., Taniguchi, H. & Kita, T. (1992). *American Concrete Institute*, SP-132: 1565–1582.
- Gagne, R., Pigeon, M. & Aïtcin, P.C. (1990). *Materiaux et Constructions (Paris)*, 23: 103–109.
- Gettu, R., Gardner, D.R., Saldivar, H., Barragan, B.E. (2005). Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens, *Materials and Structures*, 38, pp.31–37.
- Gopalaratnam, V.S. & Gettu, R. (1984). *On the Characterization of Flexural Toughness in FRC*, Workshop on Fibre Reinforced Cement and Concrete, Shefeld, UK, 28–30 July.
- Gjorv, O.E., Okkenhaug, K., Bathen, E. & Husevag, R. (1978). *Nordic Concrete Research*, 8: 89–104.
- Groth, P. (2000-b). *Steel Fibre Reinforced SCC*, Final report of task 6, Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, Doc. No.: RT6-v1.doc.
- Grünewald, S., & Walraven, J.C. (2001). Parameter – study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self – compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 1793 – 1798.
- Grünewald, S., Walraven, J.C. (2002c). High strength self-compacting fibre reinforced concrete: Behavior in the fresh and hardened state. *6th International Symposium on High Strength / High Performance Concrete*, 16-20 June 2002, Leipzig, Germany, pp. 977 – 989.

- Gutiérrez, R. M., Díaz, L. N. & Delvasto, S. (2005). Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars. *Cement and Concrete Composites*; 27: 593-598.
- Haist, M., Mechtcherine, V., Müller, H.S. (2002). High Performance Self Compacting Ligh-Weight Aggregate Concrete With and Without Fibre-Reinforcement. *6th International Symposium on High Strength / High Performance Concrete*, 16-20 June 2002, pp. 1005 – 1016, Leipzig, Germany.
- Hasholt, M.T. (2002). *Salt frost scaling — interaction of transport mechanisms and ice formation in concrete*. PhD Thesis, Aalborg University.
- Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P.E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, 773-782.
- Hughes, D.G., Knight, G.F. & Mansky, E.F. (2002). Self-Consolidating Concrete – Case Studies Show Benefits to Precast Concrete Producers. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 405-412.
- Ho, D.W.S., Sheinn, A.M.M., Ng, C.C. & Tam, C.T. (2002). The Use of Quarry Dust for SCC Applications. *Cem. Concr. Res.*, Vol: 32, pp. 505-511.
- Irwin, G. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, Transactions ASME, *J. Appl. Mech.*, 24.
- Izumi, T. (1990). *Concrete Engineering*, 28.
- Jacobs, F. & Hunkeler, F. (1999). Design of self-compacting concrete for durable concrete structures. *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, pp. 397-410.

- Jacobsen, S. & Sellevold, E.J. (1993). *In Proceedings from RILEM International Workshop on the Resistance of Concrete to Scaling due to Freezing in the Presence of Deicing Salts*, August 30-31, Université Laval, Québec, p. 231–246.
- Jansen, D.C., Shah, S.P. & Rossow, E. (1995). Stres – 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 Report, *Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, Vol. 1, No. 3*, November, 335 – 340.
- Kadri, E.-H., Aggoun, S., Duval, R. & Petruk, M.P. (2000). Influence of C<sub>3</sub>A on physico-chemical and mechanical properties of high performance concretes. *Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s*, Volume II, İstanbul, Turkey, pp. 31-39.
- Kaneuji, M., Winslow, D.N. & Dolch, W.L. (1980). *Concrete and Concrete Research*, 10: 433–441, ASTM C 666A, p. 139.
- Kayali, O. (2004). Effect of High Volume Fly Ash on Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete, *Materials and Structures*, 37: 318–327.
- Khayat, K.H. (1995). Frost durability of concrete containing viscosity-modifying admixtures. *ACI Materials Journal*, 92(6), November – December, 625 – 633.
- Khayat, K.H. (1995-a). Effects of Antiwashout Admixtures on Fresh Concrete Properties. *ACI Materials Journal*, March-April, pp. 164-171.
- Khayat, K.H., & Roussel, Y. (1999). Testing and performance of fiber-reinforced self-consolidating concrete. *Proceedings of 1st International Symposium on SCC*, A. Skarendahl and Ö. Petersson eds., RILEM publications PRO 7, 509-521.

- Khayat, K.H., & Roussel, Y. (2000). Testing and performance of fiber reinforced, self consolidating concrete, *Materials and Structures*, Vol. 33, 391 – 397.
- Khayat, K.H., Daczko, J.A. (2002). The Holsitic Approach to Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete*, pp. 3-8.
- Khurana, R. ve Topçu O. (2000). Role of Superplasticizers in the development of self compacting concrete. *Second International symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s*, İstanbul.
- Kim, J. K., Han, S. H., Park, Y. D., Noh, J. H., Park, C. L., Kwon, Y. H. et al. (1996). Experimental research on the material properties of super flowing concrete. In: Bartos PJM, Marrs DL, Cleland DJ, editors. *Production Methods and Workability of Concrete*. E&FN Spon; 284-371.
- Kobayashi, M., Nakakuro, K., Kodama, S. & Negami, S. (1981). *American Ceramics Institute Special Publication SP-68*. American Concrete Institute, Detroit, p. 269-282.
- Lappa, E. S. (2007). *High Strength Fibre Reinforced Concrete Static and fatigue behaviour in bending*. Ph.D thesis, Technische Universiteit Darmstadt geboren te Darmstadt (Duitsland), 220 page.
- Larrard, F. (1998). *Concrete mixture-proportioning. A Scientific Approach*, Modern Concrete Technology Series, E & FN SPON, London.
- Lawler, J.S., Wilhelm, T., Zampini, D., & Shah, S.P. (2003). Fracture processes of hybrid fiber reinforced mortar. *Materials and Structures*, Vol. 36, 197-208.
- Lawrence, P., Cyr, M. & Ringot, E. (2005). Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. *Cement and Concrete Research*; 35: 1092-1105.

- Li, V.C. & Maalej, M. (1996b). Toughening in Cement Based Composites. Part II: Fiber Reinforced Cementitious *Composites, Cement & Concrete Composites* 18, 239-249.
- Litvan, G.G. (1972). *Journal of Colloid and Interface Science*, 38 (1): 75–83.
- Litvan, G.G. (1983). *Journal of the American Ceramics Institute.*, 80 (33): 326–331.
- Litvan, G.G. (1992). *Concrete and Concrete Research*, 22: 1141–1147.
- Low, N.M.P. & Beaudoin, J.J. (1992). *Concrete and Concrete Research*, 22: 981–989.
- Low, N.M.P. & Beaudoin, J.J. (1993). *Concrete and Concrete Research*, 23: 905–916.
- Low, N.M.P., Gagnon, I. & Beaudoin, J.J. (1994). *Advances in Cement and Concrete, Proceedings of an Engineering Foundation Conference*, July 24-29, University of New Hampshire, Durham, 200–216.
- Löfgren, I., (2005). *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction – A Fracture Mechanics Approach to Material Testing and Structural Analysis*, PhD thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- MacInnis, C. & Beaudoin, J.J. (1968). *Journal of the American Concrete Institute*, 68 (3): 203–207.
- MacInnis, C. & Lau, E.C. (1971). *Journal of the American Concrete Institute*, 68: 144–149.
- Mather, B. (1978). *In Proc. of the First International Symposium on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, p. 325–345.

- Marchand, J., Pleau, R. & Gagné R. (1995). *In Materials Science of Concrete: IV, edited by J. Skalny and S. Mindess*. American Ceramics Society, Westerville, Ohio, 283–354.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete, Microstructure, Properties, and Materials*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Mielenz, R.C. (1968). In Use of Surface Active Agents in Concrete, *Fifth International Conference on Chemistry of Cement*, Tokyo, IV-1, p. 1–35.
- Mindess, S. (1994). *Advances in Cement and Concrete, Proceedings of an Engineering Foundation Conf.*, July 24-29, University of New Hampshire, Durham, 217–222.
- Mindess, S., Young, J. F. & Darwin, D. (2002). *Concrete*. 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, pp. 583-598.
- Mihashi, H., Nomura, N., & Niiseki, S. (1991). Influence of Aggregate Size On Fracture Process Zone of Concrete Detected With Three Dimensional Acoustic Emission Technique. *Cement and Concrete Research*, 21, (5), 737 – 744.
- Mu, R., Miao, C., Luo, X. & Sun, W. (2002). Interaction between loading, freeze–thaw cycles, and chloride salt attack of concrete with and without steel fiber reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 32: 1061-1066.
- Naaman, A. E. and Surendra, P. S. (1976). Pull-Out Mechanism in Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of the Structural Division*, Vol. 102, No. 8, pp. 1537-1548.
- Naaman, A.E. (1985). Fiber Reinforcement for Concrete. *Concrete International*, March, 21-25.

- Naaman, A. E. & Reinhardt, H. W. (2005) Proposed classification of HPCRCC composites based on their tensile response. IN BANTHIA, N., UOMOTO, T., BENTUR, A. & SHAH, S. P. (Eds.) *3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications (ConMat '05) and Mindess Symposium*, Vancouver, Canada, The University of British Columbia, Canada.
- Nagataki, S. (2000). Advanced technology for high fluidity concrete. *Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s*. İstanbul, Turkey, pp. 87-102.
- 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*, Addison Wesley Longman Limited, England.
- Nischer, P. (1976). *Zement and Betond*, heft 2.
- Okada, E., Hisaka, M., Kazama, Y. & Hatori K. (1981). *ACI-SP 68*, 215-231.
- Okamura, H. (1997). Self compacting high performance concrete, *Concrete International*, 19(7), 50-54.
- Okamura, H., and Ouchi, M., (1999). Self compacting concrete. Development, present use and future. *Proceedings 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stocholm, Sweden, pp. 3-14.
- Ouchi, M., Hibino, M., Okamura, H. (1997). Effect of Superplasticizer on Self-Compactibility of Fresh Concrete, *Trans.Res. Rec.*, pp 37-40.
- Ouyang, C.D. & Shah, S.P. (1992). *Cement and Concrete Research*, 22: 1201–1215.



- Özkul, M.H. & Dogan, Ü.A. (2006). Rheological properties and segregation resistance of self-compacting concretes. *International Congress on Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, Alexandrapolis Greece, pp. 463 – 468.
- Öztürk, A. U. (2009). Çimento Harçlarının Mikroyapı-Basınç Dayanımı İlişkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Parant, E., Rossi, P. & Boulay, C. (2007). Fatigue behavior of a multi-scale cement composite, *Cement and Concrete Research*, Volume 37, Issue 2, February, Pages 264-269.
- Parrott, L.J. (1989). In *Materials Science of Concrete: I (Jan P. Skalny, Ed.)*. The American Ceramic Society, Inc., Westerville, Ohio, p. 181–195.
- PCI, TR-6-03. (2003). *Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants*. Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois.
- Peng, G.-F. et al. (2006). Explosive spalling and residual mechanical properties of fibre toughened high-performance concrete subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 36: 723-727.
- Petersson, P.E. (1980). Fracture energy of concrete: Practical performance and experimental results. *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, 91-101.
- Petersson, Ö. & Billberg, P. (1999). Investigation on blocking of self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead 233 of filler. *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, pp. 333-344.

- Petersson, Ö. (2002). Limestone Powder as Filler in Self-Compacting Concrete – Frost Resistance, Compressive Strength and Chloride Diffusivity. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 391-396.
- Pigeon, M., Pleau, R. & Simard J.M. (1985). *Journal of the American Concrete Institute*, 82 (5): 684–692.
- Pigeon, M. (1989). *Materiaux et Constructions (Paris)*, 22 (127): 3–14.
- Pigeon, M. & Langlois, M. (1991). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(4): 581–589.
- Pigeon, M., Gagné, R., Aïtcin, P.C. & Banthia, N. (1992). *Concrete and Concrete Research*, 21: 844–852.
- Pigeon, M. & Pleau, R. (1995). Durability of concrete in cold climates. *Modern Concrete Technology, Vol. 4*, London (UK): E & FN SPON, An Imprint of Chapman & Hall.
- Pigeon, M., Pleau, R. & Simard J.M. (1985). *Journal of the American Concrete Institute*, 82 (5): 684–692.
- Pigeon, M., Pleau, R. & Aïtcin, P.C. (1986). *Concrete, Concrete and Aggregates*, 8(2): 76–85.
- Pigeon, M. & Pleau R. (1995). *Durability of Concrete in Cold Climates*. London: Chapman and Hall.
- Pistilli, M.F. (1983). *ACI Journal, Proceedings*, 80(3): 217–222.
- Powers, T.C. & Brownyard, T.L. (1947). *Journal of the American Concrete Institute*, 43: 101, 993.

- 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, 3 sayfa.
- Punkki, J., Golaszewski, J. & Gjørsv, O.E. (1996). Workability Loss of High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, September-October, pp. 427-431.
- Ramezaniapour, A. A. & 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.
- RILEM Technical Committee 50-FMC (1985). Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of threepoint bend test on notched beams, *Materials and Structures*, 18, (106), 287-291
- RILEM Technical Committee 50-FMC (1985). Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of threepoint bend test on notched beams, *Materials and Structures*, 18, (106), 287-291.
- Rols, S., Ambrosie, J. & Pera, J. (1999). Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete. *Cem. Concr. Res.*, Vol: 29, pp. 261-266.
- Robins, P., Austin, S., Chandler, J., Jones, P. (2001). Flexural strain and crack width measurement of steel-fibre-reinforced concrete by optical grid and electrical gauge methods, *Cement and Concrete Research*, 31, 719 – 729.

- Romualdi, J. P., & Batson, G. B. (1963). Mechanics of Crack Arrest in Concrete. *J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 89, No. EM3*, June 1963, 147-168.
- Saak, A.W., Jennings, H.M., Shah, S.P. (1999). Characterization of the rheological properties of cement paste for use in self-compacting concrete. *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, pp. 83-94.
- Sağlam, A.R. (2000). Süperakışkanlaştırıcı ve viskozite arttırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi. *Sika Teknik Bülten, 2000/4*, s. 9-16.
- Sahmaran, M., Yurtseven, A., Yaman, I.Ö. (2005). Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, *Building and Environment, 40*, 1672 – 1677.
- Sakai, K., Kumagai, M., Abe, K. & Endoh, H. (2001). Effect of pore structure on scaling deterioration of concrete. In: Banthia N, Sakai K, Ojorv O, editors. *Proceedings 3rd international conference on concrete under severe conditions*, 396–403.
- Sari, M., Prat, E. & Labastire, J.-F. (1999). High strength self-compacting concrete – Original solutions associating organic and inorganic admixtures. *Cem. Concr. Res., Vol: 29*, pp. 813-818.
- Schulson, E. M. (1998). *Ice damage to concrete*. CRREL special report 98-6.
- Sedran, T., Pigeon, M. & Hazroti, K. (1993). *In Durability of Building Materials and Components*, S. Nagataki, T. Nireki and F. Torosawa, Ed., E.&F.N. Spon, London, p. 487–496.
- Sellevold, E.J. (1988). *SINTEF Report*, ST 65-A88090 Tech. Univ. of Trondheim.

- Sellevoid, E.M., Justnes, H., Smeplass, S. & Hansen, E.A. (1994). In Advances in Cement and Concrete, *Proceedings of an Engineering Foundation Conference*, July 24-29, University of New Hampshire, Durham, p. 562–609.
- Sengül, C., Akaya, Y., & Tasdemir, M.A. (2006). *Fracture behavior of high performance fiber reinforced self compacting concrete*, Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties An International Symposium dedicated to Professor Surendra P. Shah, Northwestern University, U.S.A., 171 – 177.
- Setzer, M.J. (2002). *Development of the micro-ice-lens model. Frost Resistance of Concrete*, Essen, Germany, RILEM. P.231-246.
- Shadle, R. & Somerville, S. (2002). The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 235-244.
- Shah, S.P. (1991). Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement-Based Matrixes?. *ACI Material Journal*, V. 88, No. 6, Nov-Dec, 595-602.
- Shah, S.P., Swartz, S.E., Ouyang, C. (1995). *Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials*, John Wiley & Sons, Inc, 552 sayfa.
- Shi, C., Wu, Y., Sha, Y. & Riefler, M. (2002). Comparison of Two Design Approaches for Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 349-354.
- Skarp, U., Engstrand, J. & Jansson, I. (2002). A Concept for Enhancing Early Strength Development in Self-Consolidating and Normal Concrete by Means of Increased Stability and Homogeneity. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 363-370.

- Song, P.S. & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high strength steel fiberreinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 18, 669 – 673.
- Stark, D. (1989). *Portland Cement Association Research and Development Bulletin*, RD096, p.191.
- Su, N., Hsu, K.-C. & Chai, H.-W. (2001). A simple mix design of self-compacting Concrete. *Cem. Concr. Res.*, Vol: 31, pp. 1799-1807.
- Sengül, C., Akaya, Y., and Tasdemir, M.A., (2006), Fracture behavior of high performance fiber reinforced self compacting concrete. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties An International Symposium dedicated to Professor Surendra P. Shah*, Northwestern University, U.S.A., pp. 171 – 177.
- Tandırılı, E., Akalın, Ö. & Arca, E. (2000). The effect of melamine based superplasticizers on the properties of concrete. *Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume I*, Istanbul, Turkey, pp. 453-462.
- Tangtermsirikul, S. & Khayat, K. (2000). Fresh concrete properties, in: A. Skarendahl, O. Petersson (Eds.). *Self-Compacting Concrete. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee, 174-SCC, RILEM Report 23*, RILEM, Cachan Cedex, 17-22.
- Tasdemir, M.A., Tasdemir, C., Akyüz, S., Jefersson, A.D., Lydon, F.D., & Barr, B.I.G.. (1998). Evaluation of strains at peak stresses in concrete: A three-phase composite model approach, *Cement and Concrete Composites*, 20, 302 – 318.
- Tasdemir, M.A., & Karihaloo, B.L. (2001). Effect of Aggregate Volume Fraction On the Fracture Parameters of Concrete: A Meso – Mechanical Approach, *Magazine of Concrete Research*, 53, No. 6, December, 405 – 415.

- Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı. *İTÜ Dergisi/d cilt 1, sayı 2*, Aralık, 125-144.
- Taşdemir, M.A., ve Bayramov, F. (2002). Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İTÜ Dergisi/d Mühendislik, Cilt 1, Sayı 2*, 125-144.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., İlki, A. ve Yerlikaya, M. (2002). Prefabrik Elemanlar İçin Çelik Tel Donatılı Betonlar. *Beton Prefabrikasyon, Temmuz, Sayı 63*, 5-12.
- Termkhajornkit, P., Nawa, T. & Ohnuma, H. (2002). Role of Fly Ash and Naphthlene Sulfonate Superplasticizers on Fluidity of Paste. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 39-46.
- Tjiptobroto, P. & Hansen, W. (1993). *ACI Materials Journal*, 90: 16–25.
- Torrijos, M.C., Barragan, B.E., & Zerbino, R.L. (2007). Physical–Mechanical Properties, and Mesostructure of Plain and Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, (in press).
- Toutanji, H., & Bayasi, Z. (1998). Effects of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Research, Vol. 28, No.1*, 115-124.
- Toutanji, H., Delatte, N., Aggoun, S., Duval, R. & Danson, A. (2004). Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete. *Cement and Concrete Research*, 34: 311-319.
- Türkel, S. & Felekoğlu B. (2003). Silika Dumanı ve Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Betonda Kendiliğinden Yerleşebilirlik ve Basınç Dayanımı Üzerine Etkileri. *Kocaeli 2003 Deprem Sempozyumu, Kocaeli Üniversitesi Yer ve Uzay Bilimleri Araştırma Merkezi*.

- Tviksta, L.-G. (2000). Brite Euram Project: Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete, *Final Report: Task 8.4 Quality control*, NCC AB, 28p.
- Tyler, I.Z., Verbeik, G.J. & Powers, T.C. (1951). *Report of the Portland Cement Association*.
- Ünal, O. (1994). *Isıl İşlem Uygulamasinin Lifli Beton Özelliklerine Etkisi*. Dr. Tezi, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi.
- Walraven, J. (2002). Self-Compacting Concrete in the Netherlands. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*.
- Westerholm, M., Skoglund, P. & Tragardh, J. (2002). Chloride Transport and Related Microstructure of for Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 355-362.
- Wittmann, F.H., (2002), Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete, *Sadhana, Vol. 27, Part 4*, 413- 423.
- Wyner, J.S. (1995). U.S. Patent No. 5,413,808, May 9.
- 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.
- Verbeck, G.J. & Landgren, R. (1960). *Proceedings, ASTM, 60*: 1063–1079.
- Yahia, A., Tanimura, M. & Shimoyama, Y. (2002). Evaluation of Deformability of Different Types of Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 303-310.



- Yardımcı, M. Y. (2007). *Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yazıcı, S., İnan, G., & Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21, 1250 – 1253.
- Yazıcı, S., İnan, G., & Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the the mechanical properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21, 1250 – 1253.
- Yazıcı, H. (2008). The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22: 456-462.
- Yıldırım, S.T. (2002). *Lif Takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması*. F.Ü. Fen. Bil. Enst. Doktora Tezi, Elazığ.
- Yiğiter, H. (2002). Yüksek Performanslı Betonların Süneklik Özelliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yoshioka, K., Tazawa, E.-I., Kawai, K. & Enohata, T. (2002). Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals. *Cem. Concr. Res.*, Vol: 32, pp. 1507-1513.
- Zhou, Y., Cohen, M.C. & Dolch, W.L. (1994). *ACI Materials Journal*, 91: 595–601.
- Zhou, F.R., Barr, B.I.G., & Lydon, F.D. (1995). Fracture properties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 3, 543 – 552.