

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN TASARIMI İÇİN
GRAFİK TABANLI BİR YAKLAŞIM**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Merve AÇIKGENÇ

(092115201)

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı

Danışman: Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 20 Ocak 2015

ŞUBAT-2015

**ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN TASARIMI İÇİN
GRAFİK TABANLI BİR YAKLAŞIM**

Yük. Müh. Merve AÇIKGENÇ

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN**

ŞUBAT-2015

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN TASARIMI İÇİN
GRAFİK TABANLI BİR YAKLAŞIM

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Merve AÇIKGENÇ

(092115201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Ocak 2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Şubat 2015

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ragıp İNCE (F.Ü.)

Doç. Dr. Servet YILDIZ (F.Ü.)

Doç. Dr. Kazım TÜRK (İ.Ü.)

Yrd. Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ (F.Ü.)

ŞUBAT-2015

ÖNSÖZ

Çelik Lif Donatılı Beton olarak bildiğimiz kompozit malzemenin özelliklerini ve tasarımını araştıran bu doktora tez çalışmasında, bilgeliği ve becerisi ile bana yol gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN'a olağanüstü önsezileri ve samimiyeti için sonsuz minnettarım. Kendisi ile birlikte çalışma şansını bana verdiği için binlerce kez teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını MF.13.02 nolu doktora projesi ve çalışma sürecini MF.13.29 nolu altyapı projesi ile destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Koordinasyon Birimi'ne Sn. Çetin ALBAYRAK şahsında teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım süresince bilgisinden, becerisinden ve tecrübesinden çokça yararlandığım, yardımlarının karşılığını ödeyemeyeceğim Teknisyen Seyfettin ÇİÇEK'e, laboratuvarımızdaki makine ve cihazlar alanındaki kıymetli yardımlarından dolayı Doç. Dr. Oğuz YAKUT'a, İNTEK Yazılım ve Otomasyon Ltd. Şti. ve Elekt. Elektron. Müh. M. Selçuk AYDIN'a, tecrübesi ile kurtarıcımız olan Akkaya Makine çalışanlarına ve Sn. Saadettin AKKAYA'ya çok teşekkür ederim.

Kemerli Metal Çelik Mobilya Malzemeleri Makine San. Ve Tic. Ltd. Şti.'ne bu tez çalışmasında kullanılan çelik liflerinin temin edilmesindeki yardımlarından dolayı, Politon H1 PA-61 isimli kimyasal beton katkısını sağlayan Polisan Yapı Kimyasalları A.Ş.'ne ve Kim. Müh. İsmail KILINÇ şahsında, çimento temini ile çalışmamıza destek veren Osman Yıldırım Yapı İnş. San. Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkür ederim.

Fırat Mühendislik Yönetim Kurulu Başkanı Ramazan GÜRGÖZE'ye ve Birlik Beton A.Ş.'ne Sn. Cengiz AKYILDIZ'ın şahsında teşekkür ederim.

Bu tez çalışması kapsamında 5300 dm³ beton döküldü ve beton deneyleri yapıldı. Bu zorlu süreç boyunca istisnai kabiliyetleri ile yardımcı olan, moralimi yükselten ve bana destek olan çok kıymetli öğrencilerim, Zülfü Can DÜZGÜN, Mustafa Mete ARI, Halil ÇİFTÇİ, Turhan KILINÇ, Mesut LALE, Abdullah DEMİRDAĞ, Muhammed BAYGULTALP, Berat ÜNALAN, Kaan ÇANAKÇI, Elif Gökçe SAVAŞ, Lütfiye GÜRKAN, Sinan DALĞALI, Nuri DOĞAN, Barış GÜL, Abdulkadir ARSLAN, M. Talha GÜLER, Şükrü BAYRAK, Geylani AŞKIN, Gülşen GÜLER, Ferhat SAÇI, Akan LAÇO, Ferhat MUSUL, Ezgi Can SAYIN ve Engin DURUR ve de Cihan YAVUZ'a milyonlarca kez teşekkür ederim. Sizinle çalışmak çok güzeldi, bu ekibi çok özleyeceğim. Bu noktada unutulmaması gereken bir kişi daha var ki; ağır beton kütlelerini laboratuvarlar arasında taşıyarak deneylere bileğinin kuvveti ile destek veren Sn. Fethi YETİK'e de teşekkür ederim.

Bunalımsız doktora çalışması olamaz, bunalımlarım ve çalışmalarım boyunca tam manevi destekleri ile sürekli yanımda olan arkadaşlarım Yük. İnş. Müh. Hümeysra ŞAHİN, Yük. İnş. Müh. Mesut GÖR, Dr. Müh. Zehra URAL BAYRAK'a ve yalnızca bu dönemde değil, genelde de canını sıkmakta hiç tereddüt etmediğim, canımdan çok sevdiğim kardeşim Betül AÇIKGENÇ'e sonsuz teşekkürler.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan, saygıdeğer kişiliği, zekâsı ve bilgeliğini, becerilerim ölçüsünde örnek alabildiğim çok kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ ve eşi Sn. Damla ALYAMAÇ'a desteklerinden dolayı sonsuz minnettarım. Bu süreçte hocamın kıymetli görüşleri ve abiliği olmasaydı kesinlikle bir sayfa dahi ortaya çıkamazdı, çok teşekkürler hocam.

Son olarak, hayatım boyunca bana destek olan, beni seven, yetiştiren, bir şey olsam da bir hiç olsam da yanımda olacaklarını bildiğim, canımdan çok sevdiğim aileme, annem Nilüfer, babam Mustafa AÇIKGENÇ'e ve kardeşlerim Betöl, Ahmed ve Enes'e sonsuz teşekkür ederim. Hepinizi çok seviyorum, iyi ki ailemsiniz.

Merve AÇIKGENÇ
Elazığ - 2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLOLAR LİSTESİ.....	XIV
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XV
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİK LİF DONATILI BETONLAR VE ÖZELLİKLERİ.....	4
2.1. Lifli Betonun Tarihçesi	5
2.2. Betonda Kullanılan Lif Tipleri ve Çelik Lifler	6
2.3. Çelik Lif Donatılı Betonun Kullanım Alanları.....	8
2.4. Çelik Lif Donatılı Betonun Özellikleri	15
2.4.1. İşlenebilirlik Özellikleri	15
2.4.2. Mekanik Özellikler.....	21
2.4.2.1. Basınç Dayanımı	21
2.4.2.2. Çekme Dayanımı	23
2.4.2.3. Eğilme Dayanımı	27
2.4.2.4. Darbe Direnci ve Dinamik Yükler Altındaki Dayanımı	32
2.4.2.5. Yorulma Dayanımı.....	33
2.4.2.6. Aşınma Dayanımı	33
2.4.2.7. Elastisite Modülü ve Poission Oranı.....	34
2.4.2.8. Büzülme (Rötre)	34
2.4.2.9. Tokluk	34
2.4.3. Durabilite	37
3. ÇELİK LİF DONATILI BETON TASARIMI.....	39
3.1. Çelik Lif Donatılı Betonların Performansına Etki Eden Faktörler	39
3.1.1. Matris	39
3.1.2. Çelik Lifler.....	41
3.2. ÇLDB’de Çatlak Gelişimi ve Yayılması.....	43
3.2.1. Matris	44
3.2.2. Çelik Lifler.....	45
3.3. ÇLDB’de Çatlak Köprülenmesi Olayı	48
3.4. ÇLDB’nin Tasarımı	52
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	60
4.1. Malzemeler.....	60
4.1.1. Çimento	60
4.1.2. Agrega	61
4.1.3. Karışım Suyu	61
4.1.4. Kimyasal Katkı.....	61
4.1.5. Çelik Lifler	62

4.2.	Deneysel Program	63
4.2.1.	Taze Beton Deneyleri	64
4.2.2.	Sertleşmiş Beton Deneyleri	65
4.3.	Karışım Oranları	66
4.3.1.	Agrega Granülometrisinin Etkisini Değerlendirmek İçin Üretilen Karışımlar	66
4.3.2.	ÇLDB'nin Grafik Tabanlı Yaklaşımı İçin Üretilen Karışımlar	70
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	78
5.1.	Agrega Granülometrisinin ÇLDB'nin Mühendislik Özelliklerine Etkisi	78
5.1.1.	Taze Beton Özellikleri	79
5.1.1.1.	Slump Deneyi	80
5.1.1.2.	Ve-Be Deneyi	82
5.1.2.	Sertleşmiş Beton Deneyleri	86
5.1.2.1.	Basınç Deneyi	87
5.1.2.2.	Yarma Deneyi	90
5.1.2.3.	Eğilme Deneyi	91
5.1.2.4.	Basınç ve Yarma Dayanımları Arasındaki İlişki	94
5.1.2.5.	Basınç ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki	95
5.1.2.6.	Yarma ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki	96
5.1.2.7.	Tokluk	97
5.2.	ÇLDB'nin Tasarımı İçin Grafik Tabanlı Bir Yaklaşım	100
5.2.1.	Taze Beton Özellikleri	103
5.2.2.	Basınç Dayanımı	104
5.2.2.1.	Yarım Kiriş Parçaları Kullanılarak Basınç Dayanımının Belirlenmesi	107
5.2.3.	Yarma Dayanımı	113
5.2.4.	Eğilme Dayanımı	116
5.2.4.1.	Küçük Kiriş Numuneleri Kullanılarak Eğilme Dayanımının Belirlenmesi	121
5.2.5.	Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler	123
5.2.6.	Ultrases Geçiş Hızı	126
5.2.7.	Çoklu Grafikler Kullanılarak ÇLDB Karışımlarının Ön Tasarımı	129
5.2.8.	Tokluk	134
5.2.8.1.	Küçük Kiriş Numuneleri Kullanılarak Tokluğun Belirlenmesi	142
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	146
	KAYNAKLAR	150
	ÖZGEÇMİŞ	168

ÖZET

Çelik Lif Donatılı Beton (ÇLDB) geleneksel betonun gevreklik probleminin giderildiği özel bir beton türüdür. Bu özel beton türünün kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Özel beton türleri içerisinde kullanım miktarının artması ile ÇLDB için bazı ihtiyaçlar ortaya çıkmıştır. Gerek akademik çalışmalarda gerek uygulamada bu ihtiyaçların başında, pratik bir karışım hesabı gelmektedir. Bu tez çalışmasında, bu ihtiyacın giderilebilmesi için grafik tabanlı bir ÇLDB tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, farklı granülometrilere, farklı çimento dozajı ve su/çimento oranlarına, farklı lif miktarlarına ve lif tiplerine sahip ÇLDB karışımları üretilmiştir. Çökme ve Ve-Be testleri yardımıyla üretilen karışımların taze beton özellikleri belirlenmiştir. 150 mm ayrıtlı küp numuneler yardımıyla ÇLDB'lerin basınç ve yarma dayanımları, 150/150/500 ve 80/80/300 mm boyutlu kırış numuneler yardımıyla da eğilme dayanımları ve tokluk değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen tüm deney sonuçları karşılaştırılarak, ÇLDB'ler için bileşim oranları, işlenebilirlik ve dayanımlar arasındaki ilişkiler grafikler ile ortaya konulmuş ve uygun grafikler bir araya getirilerek bir monogram oluşturulmuştur. Bu monogram yardımıyla, ÇLDB'lerin tasarımına yeni bir bakış açısı getirilmeye çalışılmıştır. Bunun yanında, sertleşmiş betonlar üzerinde Ultrases Geçiş Hızı ölçümleri yapılmış ve deneyler sonucunda ÇLDB'lerin dayanım özelliklerinin tahribatsız metotlarla belirlenmesine de önemli katkılarda bulunulmuştur.

ÇLDB'leri normal betonlardan üstün kılan en önemli özelliklerinden biri de tokluktur. Bu çalışmada, farklı basınç dayanımlarına sahip ÇLDB'lerin tokluk özellikleri de ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Sonuçta, farklı tasarım girdilerine sahip ÇLDB'lerin hızlı ve gerçekçi bir şekilde dayanım ve tokluk özelliklerinin öngörülmesine yardımcı olacak grafikler ortaya koyulmuştur. Bu grafikler sayesinde, araştırma ve uygulamada, deneme çalışmaları sırasında malzeme ve zaman kaybının en aza ineceği düşünülmektedir. Böylece, çalışmalar, daha ekonomik ve daha hızlı şekilde hedeflenen sonuçlara ulaşabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Çelik Lif Donatılı Beton, Tasarım, Granülometri, İşlenebilirlik, Dayanım, Tokluk, Ultrases Geçiş Hızı.

SUMMARY

A Graphic Based Approach for the Mix Design of Steel Fiber Reinforced Concrete

Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) is a special type of concrete of which brittleness problem is eliminated. Day by day, the use of this concrete type is growing up. With the wide using of SFRC, some requirements have emerged. One of these requirements is a practical mixture design of SFRC for both academic researches and applications. In this study, it is aimed to eliminate this need with a graphical design approach for SFRC. with this aim, SFRC mixtures which had different aggregate gradations, different cement dosages and water/cement ratios, different fiber fractions and types were produced. Fresh concrete properties were determined using Slump and Ve-Be tests. And then, compressive strength and splitting tensile strength tests were performed with 150 mm sized cube specimens. Flexural strength and the toughness values of SFRC specimens were determined using 150/150/500 mm and 80/80/300 mm sized beam specimens. Compared to all experimental results, the relations between concrete mix composition, workability and strength were revealed with the graphics and convenient graphics were brought together to create a monogram. Using this monogram, it was tried to bring a new perspective to SFRC design. In addition, Ultrasonic Pulse Velocity measurements of hardened concrete specimens were performed, and an important contribute were made for determining the strength properties of SFRC by using a non-destructive method at the end of the tests.

It is another important parameter that toughness is a superior property of SFRC compared to the normal concrete. Toughness properties of SFRC specimens which had different compressive strengths were also investigated in this study.

As conclusion, graphics which can help to anticipate accurately and practically strength and toughness properties of SFRC mixtures with different design inputs were revealed. Through these graphics, in research and application fields, it can be possible to minimize loss of material and time during trial studies. Thus, the goals of the studies can be achieved more economically and practically.

Key Words: Steel Fiber Reinforced Concrete, Mix Design, Gradation, Workability, Strength, Toughness, Ultrasonic Pulse Velocity.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Betonda kullanılan bazı lif çeşitleri (Yardımcı, 2007).	7
Şekil 2.2. Betonda kullanılan çelik liflerin geometrik şekilleri: (a) liflerin yüzey şekilleri, (b) liflerin kesit geometrileri (yuvarlak ve düz) (Naaman, 2003; Yalçın, 2009).	8
Şekil 2.3. ÇLDB ile kaplanan T kesitli kirişlerin şeması (Maidl, 1995).	10
Şekil 2.4. ÇLDB ile üretilen temel (1- Örs, 2- Darbe emici yatak, 3- ÇLDB, 4- Yalın Beton, 5- Eski beton blok) (Jamrozy, 1983).	11
Şekil 2.5. ÇLDB uygulamaları: (a) endüstriyel zemin, (b) pist, (c) püskürtme beton uygulaması, (d) ince kabuk elemanlar (URL-1, 2013).....	12
Şekil 2.6. Prefabrik üretimde ÇLDB, (a) Öngerilmeli köprü kirişi, (b) tünel segmentleri	13
Şekil 2.7. Kore’de bulunan, açıklığı 120 m ve kemer yüksekliği 130 m olan Köprü (Mehta ve Monteiro, 2006).....	13
Şekil 2.8. (a) Basınç deneyine tabi tutulmuş, yüksek oranda çelik lif içeren SIFCON numuneleri (Mehta ve Monteiro, 2006) (b) eğilmeye tabi tutulan yalın beton, ÇLDB ve SIFCON’un gerilme-şekil değiştirme davranışı (Naaman, 1992; Yalçın, 2009).	14
Şekil 2.9. Çelik lif katkısı ile ÇLDB’nin işlenebilirlik değişimi (a) Lif miktarı ve narinlik ile işlenebilirliğin değişimi, (b) Lif miktarı ve D_{max} ile işlenebilirliğin değişimi (Edington vd., 1974).	17
Şekil 2.10. Değişen agrega büyüklüğünün lif dağılımına etkisi (Johnston, 1996; Grünwald, 2004).	19
Şekil 2.11. İri agrega miktarı ile maksimum çelik lif hacmi arasındaki ilişki (Swamy ve Mangat, 1974).	20
Şekil 2.12. Fazla miktarda, uzun çelik lif içerdiğinden bünyesinde ciddi yerleşme boşlukları meydana gelmiş standart bir küp numunesi (Açıkgenç vd., 2013).	21
Şekil 2.13. Geleneksel betonun ve ÇLDB’lerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Shah vd., 1978).	22
Şekil 2.14. Basınç deneyi sonucunda ÇLDB numunesinde meydana gelen çatlaklar (Ding ve Kusterle, 2000).....	23
Şekil 2.15. Direk çekme deneyinde ÇLDB’un tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Toutanji ve Bayasi, 1998; Yalçın, 2009).	24

Şekil 2.16. Farklı tip çelik lif içeren harçların çekmede gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Shah vd., 1978).	25
Şekil 2.17. Eğilme etkisinde kiriş kesitinde oluşan gerilme ve şekil değiştirme diyagramları, (a) normal beton için, (b) ÇLDB için (Yalçın, 2009).	27
Şekil 2.18. (a) Eğilme deneyi sırasında oluşan tipik yük-deplasman eğrileri, (b) eğilme deneyine tabi tutulan kiriş numuneleri (Mehta ve Monteiro, 2006).	28
Şekil 2.19. Eğilme etkisi altındaki düşük ve yüksek miktarlarda çelik lif içeren kirişlerin ilk çatlak dayanımı ve en büyük eğilme dayanımı (Mehta ve Monteiro, 2006).	29
Şekil 2.20. Çelik lif miktarının yük-deplasman eğrisi üzerindeki etkisi (Bentur ve Mindess, 1990; Yalçın, 2009).	30
Şekil 2.21. Farklı çelik lif tiplerinin yük-deplasman eğrileri üzerindeki etkisi (Balaguru ve Shah, 1992; Yalçın, 2009).	30
Şekil 2.22. Enine donatı bulunduran çelik lifli betonarme kirişler (Furlan ve Bento de Hanai, 1997).	31
Şekil 2.23. Enine donatı bulundurmayan çelik lifli betonarme kirişler (Furlan ve Bento de Hanai, 1997).	32
Şekil 2.24. Tokluk yük-deplasman eğrisinin altında kalan alandır ve ÇLDB'nin en önemli özelliğidir	35
Şekil 2.25. ÇLDB'nin mekanik özellikleri arasında normal betona göre en çok artış gösteren özelliği eğilme tokluğudur (Mehta ve Monteiro, 2006).	36
Şekil 3.1. Düz ve kancalı tip lifler için sıyrılma performansı (Alwan vd., 1999; Grünwald, 2004).	42
Şekil 3.2. Betondan düzleşerek sıyrılan kancalı uçlu lifler.....	43
Şekil 3.3. Betonda agregaların arasına dağılmış Çelik lifler (Stroeven ve Shah, 1978).	44
Şekil 3.4. ÇLDB'nin çatlak oluşumuna göre gerilme-şekil değiştirme diyagramları (Park vd., 2012).	45
Şekil 3.5. Lif-Matris ara yüzeyinin ve çatlakların yapısı (a) Kancalı uçlu lifin SEM fotoğrafı, (b) Sem fotoğrafına göre şematik gösterim (Bentur vd., 1985a; Bentur vd., 1985b; Bentur ve Mindess, 1990; Yardımcı, 2007).	46
Şekil 3.6. Cook ve Gordon (1964) tarafından ortaya atılan lif-matris zayıf ara yüzeyinin çatlak durdurma mekanizması (a) çatlak ucunda gerilme dağılımı (b) çatlak ilerleyişinin şematik gösterimi (Bentur ve Mindess, 1990).	47
Şekil 3.7. Yük-Deplasman eğrisinde lif sıyrılmasının oluşturduğu etki (Yalçın, 2009).	48

Şekil 3.8. ÇLDB’lerde liflerin çatlak kontrol ve köprüleme etkisinin sematik gösterimi. (Yalçın, 2009).	49
Şekil 3.9. Liflerin çatlağı köprülemesi sırasında kopması ve sıyrılması (Anderson, 1991; Zollo, 1996).....	50
Şekil 3.10. Normal betonda çatlak ilerlemesi ve agregalar tarafından çatlağın köprülenmesi (İnce, 1998; Alyamaç, 2008).....	50
Şekil 3.11. Tek eksenli çekme altında ÇLDB’nin çatlaması (Löfgren, 2005; Yardımcı, 2007)	51
Şekil 3.12. Mikro ve makro boyutlu liflerin çatlak köprüleme özellikleri (Mehta ve Monteiro, 2006).....	52
Şekil 3.13. ÇLDB’nin kompozisyonu	53
Şekil 3.14. Alyamaç ve İnce (2009) tarafından geliştirilen monogram.....	57
Şekil 3.15. Hu vd. (2013) tarafından geliştirilen monogramlar	58
Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik lifler.....	62
Şekil 4.2. Deney programı	63
Şekil 4.3. ÇLDB’lerin üretimi	64
Şekil 4.4. Taze beton deneyleri (a) Slump deneyi aparatları, (b) Ve-Be deneyi cihazı	64
Şekil 4.5. Sertleşmiş deneyler (a) Basınç deneyi (b) Ultrases geçiş hızı deneyi	66
Şekil 4.6. $D_{max}=16$ mm için tasarlanan granülometri eğrileri	67
Şekil 4.7. $D_{max}=31,5$ (32) mm için tasarlanan granülometri eğrileri.....	67
Şekil 4.8. TS 802 (2009)’da uygun granülometri için tavsiye edilen bölgeler	68
Şekil 4.9. Agregalar arası boşluk oranının bulunması	70
Şekil 4.10. Beton karışım hesabı için Monteiro vd. (1993) tarafından sunulan monogram ...	71
Şekil 4.11. Çimento dozajı-s/ç oranı grafiğinde tanımlanmış beton serileri.....	73
Şekil 4.12. İlk denemelerde elde edilen 7 günlük numunelerin basınç dayanımlarının s/ç oranları ile değişimi.....	74
Şekil 4.13. (a) Çalışmanın ikinci kısmında üretilen karışımların Çimento dozajı- agrega/çimento oranı grafiği, (b) Tez çalışmasının baz aldığı 11 beton karışımı ve işlenebilirlik sınıfları	75
Şekil 4.14. İkincil seriler.....	76
Şekil 5.1. Referans karışımları için çökme değerleri.....	81
Şekil 5.2. $D_{max}=16$ mm ÇLDB’ler için çökme değerleri.....	81
Şekil 5.3. $D_{max}=31,5$ mm ÇLDB’ler için çökme değerleri.....	81
Şekil 5.4. Sıfır çökme değerine sahip taze beton karışımları.....	82

Şekil 5.5. Referans karışımları için Ve-Be süreleri	82
Şekil 5.6. $D_{max}=16$ mm ÇLDB'ler için Ve-Be süreleri	83
Şekil 5.7. $D_{max}=31,5$ mm ÇLDB'ler için Ve-Be süreleri	83
Şekil 5.8. Kesikli granülometriye benzeyen B'' gradasyonları	84
Şekil 5.9. B'' granülometrisine sahip agrega içeren taze betonlar.....	84
Şekil 5.10. A32 granülometrisine sahip beton numunelerin yüzey durumları	85
Şekil 5.11. A, AB, B ve C granülometrilere sahip numunelerin basınç dayanımları	87
Şekil 5.12. B'' , B ve B' granülometrilere sahip numunelerin basınç dayanımları.....	88
Şekil 5.13. Basınç dayanımı ve işlenebilirlik arasındaki ilişki	89
Şekil 5.14. A, AB, B ve C granülometrilere sahip numunelerin yarma dayanımları.....	90
Şekil 5.15. B'' , B ve B' granülometrilere sahip numunelerin yarma dayanımları.....	91
Şekil 5.16. A, AB, B ve C granülometrilere sahip numunelerin eğilme dayanımları.....	92
Şekil 5.17. B'' , B ve B' granülometrilere sahip numunelerin eğilme dayanımları	92
Şekil 5.18. Eğilme dayanımı ve işlenebilirlik arasındaki ilişki	93
Şekil 5.19. A, AB, B ve C granülometrilere için basınç ve yarma dayanımları arasındaki ilişki	94
Şekil 5.20. B'' , B ve B' granülometrilere için basınç ve yarma dayanımları arasındaki ilişki	94
Şekil 5.21. A, AB, B ve C granülometrilere için basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki	95
Şekil 5.22. B'' , B ve B' granülometrilere için basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki	95
Şekil 5.23. A, AB, B ve C granülometrilere için yarma ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki	96
Şekil 5.24. B'' , B ve B' granülometrilere için yarma ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki	96
Şekil 5.25. Örnek yük-deplasman eğrileri	97
Şekil 5.26. $D_{max}=16$ mm olan A, AB, B ve C granülometrilere ile üretilen ÇLDB'lerin (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi	98
Şekil 5.27. $D_{max}=16$ mm olan B'' , B ve B' granülometrilere ile üretilen ÇLDB'lerin (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi	98
Şekil 5.28. $D_{max}=31,5$ mm olan A, AB, B ve C granülometrilere ile üretilen ÇLDB'lerin (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi.....	99
Şekil 5.29. $D_{max}=31,5$ mm olan B'' , B ve B' granülometrilere ile üretilen ÇLDB'lerin (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi.....	99

Şekil 5.30. A, AB, B ve C granülometrilerine sahip ÇLDB'lerin $\delta=5$ mm için tokluk değerleri	100
Şekil 5.31. B'', B ve B' granülometrilerine sahip ÇLDB'lerin $\delta=5$ mm için tokluk değerleri	100
Şekil 5.32. Bu bölümde üretilen beton serileri	101
Şekil 5.33. Çökme değerinin V_f ile değişimi.....	104
Şekil 5.34. Lif boyunun ÇLDB'nin çökmesi üzerindeki etkisi	104
Şekil 5.35. Birincil ÇLDB serilerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının değişimi	105
Şekil 5.36. P serisi için basınç dayanımlarının değişimi	106
Şekil 5.37. A ve K serileri için basınç dayanımlarının değişimi	106
Şekil 5.38. V_f değişiminin basınç dayanımları üzerindeki etkisi	107
Şekil 5.39. Lif boyu değişiminin basınç dayanımları üzerindeki etkisi.....	107
Şekil 5.40. (a) Kiriş parçası kullanılarak yapılan basınç deneyi (15x15) (b) deney sonu (c) deney sonucunda ortaya çıkan kırılma şekli.....	108
Şekil 5.41. Birincil ÇLDB'lerin kiriş parçası ve küp basınç dayanımları	109
Şekil 5.42. (a) P serisinin, (b) A serisinin ve (c) K serisinin kiriş basınç dayanımları	109
Şekil 5.43. (a) Kiriş basınç dayanımının V_f ile değişimi, (b) lif boyunun kiriş basıncı üzerindeki etkisi	110
Şekil 5.44. Birincil ÇLDB ve referansları için basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	110
Şekil 5.45. (a) Değişen V_f oranına göre ve (b) değişen lif tipine göre kiriş ile küp basınç dayanımları arasındaki ilişkiler	111
Şekil 5.46. (a) Küçük kiriş parçası kullanılarak yapılan basınç deneyi (8x8) (b) deney sonucunda ortaya çıkan kırılma şekli	111
Şekil 5.47. P serisinin küçük kiriş basınç dayanımları	112
Şekil 5.48. ÇLDB ve referansları için küçük kiriş ve küp basınç dayanımlarının karşılaştırılması	113
Şekil 5.49. Yarma deneyi sonucunda kırılan numune	114
Şekil 5.50. Birincil ÇLDB serilerinin 7 ve 28 günlük yarma dayanımlarının değişimi	114
Şekil 5.51. P serisi için yarma dayanımlarının değişimi	115
Şekil 5.52. A ve K serileri için yarma dayanımlarının değişimi	115
Şekil 5.53. V_f değişiminin yarma dayanımları üzerindeki etkisi.....	116
Şekil 5.54. Lif boyu değişiminin yarma dayanımları üzerindeki etkisi.....	116
Şekil 5.55. Eğilme deneyi şeması (a) Deplasman kontrollü deney düzeneği, (b) dört noktalı eğilme deneyi alt ve üst mesnet noktaları	117

Şekil 5.56. Eğilmede çekme deneyi.....	117
Şekil 5.57. Birincil ÇLDB serilerinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarının değişimi.....	118
Şekil 5.58. P serisi için eğilme dayanımlarının değişimi	119
Şekil 5.59. A ve K serileri için eğilme dayanımlarının değişimi	119
Şekil 5.60. Eğilme deneyi sırasında betondan sıyrılarak çıkan çelik lifler	119
Şekil 5.61. V_f değişiminin eğilme dayanımları üzerindeki etkisi.....	120
Şekil 5.62. Lif boyu değişiminin eğilme dayanımları üzerindeki etkisi	120
Şekil 5.63. Küçük kiriş numunesinin eğilme deneyi	122
Şekil 5.64. Küçük kirişler için eğilme dayanımlarının değişimi	122
Şekil 5.65. Küçük kirişler ile büyük kirişlerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması	122
Şekil 5.66. 7 günlük (a) basınç - yarma ile (b) basınç - eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler	123
Şekil 5.67. 28 günlük (a) basınç - yarma ile (b) basınç - eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler.....	124
Şekil 5.68. (a) 7 ve (b) 28 günlük eğilme - yarma dayanımları arasındaki ilişkiler	124
Şekil 5.69. Değişen V_f oranına sahip serilerde (a) basınç - yarma, (b) basınç - eğilme ve (c) eğilme - yarma dayanımları arasındaki ilişkiler	125
Şekil 5.70. Lif tipi değiştiğinde (a) basınç - yarma, (b) basınç - eğilme ve (c) eğilme - yarma dayanımları arasındaki ilişkiler	126
Şekil 5.71. Birincil ÇLDB serilerinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı değişimi	127
Şekil 5.72. (a) 7 ve (b) 28 günlük betonların ultrases geçiş hızı – basınç dayanımı arasındaki ilişkiler.....	128
Şekil 5.73. V_f değişiminin ultrases geçiş hızları üzerindeki etkisi	128
Şekil 5.74. Lif boyu değişiminin ultrases geçiş hızları üzerindeki etkisi	129
Şekil 5.75. Birincil seriler ile hazırlanmış ÇLDB ön tasarım monogramı.....	130
Şekil 5.76. Değişen V_f oranları için ikincil serilerle hazırlanmış ÇLDB ön tasarım monogramı	131
Şekil 5.77. Uzun lifler için ikincil serilerle hazırlanmış ÇLDB ön tasarım monogramı	132
Şekil 5.78. Ön tasarım monogramının kullanımı.....	133
Şekil 5.79. P serileri için, (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi	135
Şekil 5.80. A serileri için, (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi	135

Şekil 5.81. <i>K</i> serileri için, (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi	136
Şekil 5.82. Birincil ÇLDB serilerinin tokluklarının değişimi.....	137
Şekil 5.83. V_f değişiminin tokluk üzerindeki etkisi	137
Şekil 5.84. Lif boyu değişiminin tokluk üzerindeki etkisi.....	137
Şekil 5.85. Yük-deplasman grafiği ile tokluğun artması	138
Şekil 5.86. Eğilme dayanımı ve tokluk arasındaki ilişki	139
Şekil 5.87. (a) değişen V_f oranlarına göre, (b) değişen lif tipine göre eğilme dayanımı-tokluk ilişkisi	139
Şekil 5.88. 28 günlük birincil ÇLDB'ler için tokluk dahil ön tasarım monogramı	140
Şekil 5.89. Farklı bir düzende 28 günlük birincil ÇLDB'ler için tokluk dahil ön tasarım monogramı	141
Şekil 5.90. Küçük kırışlerin tokluklarının değişimi.....	143
Şekil 5.91. Küçük kırışlerin eğilme dayanımları ile toklukları arasındaki ilişki	143
Şekil 5.92. Büyük kırışler ile Küçük kırışlerin toklukları arasındaki ilişki	144
Şekil 5.93. Büyük kırışler ile küçük kırışlerin birim tokluklarının değişimi	144
Şekil 5.94. Büyük kırışler ile küçük kırışlerin birim toklukları arasındaki ilişki	145

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. ACI 544.1R (2002)'de ÇLDB için tavsiye edilen agrega granülometriteri.....	19
Tablo 3.1. Normal ağırlıklı ÇLDB'ler için karışım oranları (ACI 544.3R, 1998).	53
Tablo 3.2. Betona ilave edilen maksimum lif miktarları (kg/m ³) (TS 10514, 1992).....	53
Tablo 4.1. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri	60
Tablo 4.2. Agreganın fiziksel özellikleri	61
Tablo 4.3. Kimyasal katkının özellikleri	61
Tablo 4.4. Çelik liflerin özellikleri	62
Tablo 4.5. Birinci kısım çalışmalar için karışım oranları	68
Tablo 4.6. Grafik tabanlı yaklaşım için temel referans serileri ve birincil ÇLDB serileri.....	75
Tablo 4.7. İkincil ÇLDB serileri.....	77
Tablo 4.8. Çalışmanın ikinci bölümünde üretilen tüm ÇLDB serileri ve referansları.....	77
Tablo 5.1. Agrega granülometriterinin birbirlerine göre değişen özellikleri.....	78
Tablo 5.2. Taze beton deneylerinin sonuçları.....	80
Tablo 5.3. Mekanik özellikler.....	86
Tablo 5.4. ÇLDB'lerin absorbe ettikleri enerji miktarları	97
Tablo 5.5. Tez çalışmasının ikinci kısmında üretilen numuneler ve yapılan deneyler	102
Tablo 5.6. Referans ve ÇLDB'lerin çökme değerleri	103
Tablo 5.7. Referans ve ÇLDB'lerin basınç dayanımları.....	105
Tablo 5.8. Yarım kiriş parçalarının basınç dayanımları	108
Tablo 5.9. Küçük kiriş parçalarının basınç dayanımları	112
Tablo 5.10. Referans ve ÇLDB'lerin yarma dayanımları.....	113
Tablo 5.11. Referans ve ÇLDB'lerin eğilme dayanımları.....	118
Tablo 5.12. Küçük kirişlerin eğilme dayanımları	121
Tablo 5.13. Referans ve ÇLDB'lerin ultrases geçiş hızı değerleri	127
Tablo 5.14. ÇLDB'lerin toklukları	136
Tablo 5.15. Küçük kirişlerin eğilme toklukları.....	142

SEMBOLLER LİSTESİ

α	: ince/toplam agrega oranı
C	: Çimento dozajı
$D_{\max}$	: En büyük agrega boyutu
d	: Çelik lif çapı
d_o	: Ortalama agrega çapı
f_c	: Basınç dayanımı
f_{st}	: Yarma Dayanımı
f_{flex}	: Eğilme dayanımı
k	: İncelik Modülü
$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$	: Ampirik sabitler
L, l	: Çelik lif boyu
$m, a/\phi$	: Agrega/çimento oranı
P	: Yük
s/ϕ	: Su/çimento oranı
s/d	: Kirişin açıklık/kesit boyu oranı
T	: Tokluk
V_{bh}	: Agregalar arası boşluk hacmi
V_f	: Hacimce çelik lif miktarı
W	: agrega gevşek birim hacim ağırlığı
ρ_c	: iri agreganın kuru özgül ağırlığı
ρ_f	: ince agreganın kuru özgül ağırlığı
δ	: Deplasman
$\lambda, L/d, l/d$	: Çelik lif narinliği
ϵ_{cu}	: Normal betonun birim kısalması
ϵ_{fcu}	: Çelik lif donatılı betonun birim kısalması

1. GİRİŞ

Yapı malzemelerinin alçı ve kireç ile başlayan serüveni, insanoğlunun öncelikle barınmaya olan ihtiyacı ile zaman içinde gelişmiş ve bugün modern dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi olan betonu ortaya çıkarmıştır. İnsanoğlunun sürekli artan nüfustan dolayı kaynaklara ve kalkınmaya olan ihtiyacı da artmıştır. Günümüzde ise İnşaat Mühendisliğinin sınırlarını zorlayan projeleri birbiri ile yarıştırmaya hale getirmiştir. Büyüyen ve kentlere hücum eden nüfusu beslemek için gerekli enerji ve suyu sağlayacak barajlar, kanallar, isale hatlarından, yeraltında ve üstünde ulaşımı sağlayan yollar, tüneller, köprüler ve içlerinde barınılan binalara kadar neredeyse medeniyetimizin tamamı betondan oluşmaktadır. Üstelik bu yapıların kısa sürede tamamlanıp hizmete geçmesi, uzun ömürlü ve ekonomik olması talep edilmektedir. Maliyet-dayanım ilişkisi bakımından en ekonomik yapı malzemesi olan betonun, böylesine hızlı ve yoğun bir tüketime de sahip olması ile birlikte değişen taleplere ve teknolojiye cevap vermemesi düşünülemez. Beton çimento, su ve agregadan oluşan kompozit bir yapı malzemesidir (Neville, 1991). Betondan beklenen performans her geçen gün artmaktadır. Yapıların daha hızlı inşa edilmek istenmesi, narin taşıyıcı elemanlarla daha büyük açıklıkların geçilmek istenmesi ve daha birçok nedenle oluşan ihtiyaçlara normal veya geleneksel olarak bilinen lifsiz betonun cevap vermesi mümkün değildir. Bu tür ihtiyaçları karşılayan yeni beton türleri özel betonlar olarak isimlendirilmektedir. Bu özel beton türlerinden biri de Çelik Lif Donatılı Beton (ÇLDB)'dur.

ÇLDB, geleneksel betonun gevreklik sorununun ortadan kaldırıldığı özel bir beton türüdür. Basınç dayanımı çekme dayanımından çok büyük olan beton, bünyesinde bulundurduğu mikro çatlaklar sayesinde, yük altında basınç dayanımına ulaşmadan önce gevrek bir şekilde geçer. Bu mikro çatlakların yayılmasını ve gevrek kırılmayı, kısa kesilmiş ayrık çelik teller engelleyebilir. Çelik lifler normal dayanımlı betonlardan yüksek dayanımlı betonlara, hafif betonlardan ağır betonlara ve kendiliğinden yerleşen betonlara kadar birçok beton türünde kullanılabilir (Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991; ACI 544.1R, 2002).

19. yüzyılın başlarında beton içerisine konulan sürekli çelik çubuklar ile geleneksel betonun donatılandırılmasının başlangıcından itibaren, çelik çubuk ile betonun, kesit zorları etkisinde birlikte çalışmasından (betonarme) faydalanılarak birçok yapı inşa

edilmiştir. Çok az çekme dayanımına sahip yalın betonun gevrek bir malzeme olması betonarme hesaplarında, çekme gerilmelerinin yalnızca boyuna sürekli çelik çubuklar ile karşılanmasına sebep olmaktadır. Lif teknolojisinin gelişmesi ve yeni nesil çelik tellerin ortaya çıkmasıyla geleneksel betona göre eğilme ve kesme dayanımı arttırılmış ÇLDB, özellikle eğilme kesme etkisindeki yapı elemanları daha küçük kesit alanları ile üretilebilir hale gelmiştir (Bentur ve Mindess, 1990; Mehta ve Monteiro, 2006).

ÇLDB için literatürde birçok çalışma yapılmış ve normal beton gibi bu kompozit malzemenin de geliştirilmesi ve performansının arttırılması amaçlanmıştır. Geliştirilmiş standart ve esaslar ile ÇLDB'nin performansının gerekli düzeyde sağlanması amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında öncelikle ÇLDB malzemesinin tarihsel gelişimi ve geleneksel betona göre üstün olan özellikleri anlatılmış ardından da bu malzemenin performansı ve tasarımı irdelenmiştir. Daha sonra tez çalışmasının esasını teşkil eden deneysel çalışmalara yer verilerek, çalışmalar sonucunda elde edilen deneysel veriler değerlendirilmiş ve sonuçlar ifade edilmiştir.

Tezin deneysel çalışmalarında ise ÇLDB, hem işlenebilirlik hem de birçok mekanik özellik bakımından deneysel olarak incelenmiş ve literatürde ihtiyaç duyulduğu düşünülen bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada ÇLDB, agrega, çimento hamuru ve çelik lifler olarak üç bölümde ele alınmış ve bu üç parametre değişkenliğinin ÇLDB özellikleri üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

Öncelikle literatürde önemli bir ihtiyaç olarak görülen agrega granülometrisi değişiminin ÇLDB özellikleri üzerindeki etkisi incelenerek, agrega fazının beton özellikleri açısından önemi vurgulanmıştır. Literatürde agrega ile ilgili çalışmalardan farklı olarak agrega tipi veya oranları değişiminin yerine, farklı granülometri eğrilerine ve farklı en büyük tane boyutlarına sahip agregaların beton özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Granülometri değişiminin etkileri ve önemi ortaya çıkarıldıktan sonra, ÇLDB için grafik tabanlı bir ön tasarım metodu oluşturulmuştur. Tez çalışmasının esas amacı olan bu grafik yaklaşımının, ÇLDB gibi özel beton türleri için gerekli olduğu düşünülmektedir. Ortaya çıkarılan çalışma ile pratik bir ön tasarım metodu sunulmuş ve birçok beton özelliği bir arada incelenerek literatürde ihtiyaç duyulan bir tasarım çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bilindiği gibi ÇLDB tasarımı için mevcut olan standart ve raporlar sadece deneme yanılma karışımları için tavsiyeler vermektedir. Üstelik bu deneme yanılma işlemleri ile istenilen özelliklere sahip karışımı ortaya çıkarmak uzun zaman alan ve maliyetli bir işlem

haline gelmektedir. Gerek uygulamada yürütülen çalışmalarda gerekse akademik çalışmalarda bir fikir verebilecek ve ÇLDB'yi birçok özelliği ile ele alan bir tasarım yaklaşımı bulunmamaktadır. Genellikle çalışmalarda belirli yönleri ile (sadece taze veya sadece birkaç sertleşmiş özellik gibi) ele alan çalışmalar üstün ÇLDB malzemesini tüm yönleri ile gözlemleyememektedirler. Üstelik bu çalışmalardan matematiksel formüllere veya modellere bağlı olanları ise maalesef pratik olamamakta ve genel olarak uygulanabilmesi için bazı bilinen parametrelere ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu sebeple bu çalışmada ÇLDB üretimi için bir ön tasarım grafiği sunulması ve tek bir metot ile hem işlenebilirlik hem de birçok mekanik özelliğin aynı anda tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır. Seçilen ön tasarım yaklaşımının grafik tabanlı olması da pratik bir metot olması bakımından tercih edilmiş ve genelde görsel yaklaşımla tahmin yaparak formüllere ve bağıntılara olan ihtiyacı en aza indirmişti. Sonuç olarak, bu grafik metotla, ÇLDB üretiminde deneme yanılma karışımı sayısını en aza indirerek istenilen özelliklere sahip karışımı bulma sürecini azaltmak ve harcanan malzeme maliyetini düşürmenin mümkün olacağı düşünülmektedir.

2. ÇELİK LİF DONATILI BETONLAR VE ÖZELLİKLERİ

Bugüne kadar inşaat mühendisliği projelerinin önemli bir bölümünde, tasarımcılar açısından beton malzemesinin gevrekliği bir problem olmuştur. Beton teknolojisindeki ilerlemeler ile gevreklik problemi, betona katılan kısa ve ayırık çelik lifler (fiberler) ile giderilebilmiştir.

Lifli beton, çimento, su, agrega ve kısa-ayırık lifler içeren özel bir beton türüdür. Ayrıca lifli beton ihtiyaca göre puzolan veya kimyasal katkı da içerebilmektedir. Kullanılan lif (fiber) tiplerine göre de değişiklik gösterebilen lifli betonlar, çelik lif içerdiklerinde Çelik Lifli Beton (ÇLB), Çelik Lif Katkılı Beton (ÇLKB) veya Çelik Lif Donatılı Beton (ÇLDB) isimleri ile anılmaktadırlar (ACI 544.1R, 2002; Bentur ve Mindess, 1990; Brandt, 2008; Mehta ve Monteiro, 2006).

Betona çelik lif takviyesindeki asıl amaç, bünyesinde sayısız mikro çatlak bulunduran gevrek betonun sünekliğini arttırmaktır. Çelik lifler, gerilmeler altında betonda çatlak oluşumunu geciktirerek veya çatlak yayılımını önleyerek malzemenin süneklik ve çekme dayanımının artmasına sebep olurlar (Mehta ve Monteiro, 2006). Böylece çekme dayanımı geleneksel betona göre artan ÇLDB'nin deformasyon yapabilme kapasitesi ve dolayısıyla tokluğu da artar (Banthia ve Sappakittipakorn, 2007; Gopalaratnam ve Gettu, 1995; Nataraja vd., 1999). Çelik liflerin, beton dayanımına etkisi bulunmamaktadır. Çatlamaya kadar geçen süre içerisinde beton yük taşıırken, çatlamadan sonra beton fazı devreden çıkar ve yük lifler sayesinde aktarılır. Dolayısıyla lifler betonun çekme dayanımını artırır demek yerine, ÇLDB'nin nihai çekme dayanımının normal betona göre daha fazla olduğunu söylemek doğru bir ifade olacaktır (Taşdemir vd., 2006). ÇLDB'deki bu çatlama mekanizmaları ve mekanik özellikleri tezin ilerleyen bölümlerinde açıklanmıştır.

Çelik lifler, betonun mekanik özelliklerini etkiledikleri gibi, işlenebilirlik özelliklerini de etkilerler. Ayrıca temel bileşenler Portland çimentosu, su ve agrega olduğundan, çelik liflerin yanı sıra, geleneksel betonu etkileyen bileşim parametreleri ve oranları, ÇLDB özellikleri üzerinde de etkilidirler (ACI 544.3R, 1998; ACI 544.4R, 1999; Brandt, 2008; Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991). ÇLDB'nin mühendislik özelliklerini incelemeden önce bu kompozit malzemenin tarihsel gelişimini ve kullanım alanlarını incelemekte yarar vardır.

2.1. Lifli Betonun Tarihçesi

Yapı malzemelerinde lif takviyesi yeni bir kavram değildir. Tarih boyunca kullanılan kerpiç gibi yapı malzemelerinde at kılı, saman veya bazı bitki lifleri kullanılmıştır (ACI 544.1R, 2002; Brandt, 2008). Ülkemizde ise büyük usta ve mühendislik dehası Mimar Sinan'ın yapmış olduğu eserlerinde, Horasan Harcı içerisinde saman ve hayvan kılı kullanıldığı bilinmektedir (Yardımcı, 2007). Esas itibari ile bu lif takviyesi işleminin amacı taze haldeki harcın güneş altında kururken bünyesinde meydana gelen çatlakları azaltmak ve böylece geçirimsiz bir malzeme elde etmeye çalışarak yapı elemanlarının ömrünü uzatmaktır. Ayrıca bu sayede gevrek olan malzemeye süneklik de kazandırılmış oluyordu.

Bugün bilinen lifli beton, 1970'li yıllarda kullanılmaya başlanmışsa da beton karışımının içerisine çivi veya benzeri ince metal parçalarının ilavesi ile beton özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmaları çok daha eskiye dayanmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). 1874 yılında ABD'li A. Bernard'ın atık demir parçalarının beton içerisine katılması işlemine dair patent alması ile başladığı kabul edilen lifli beton araştırmaları, 1918 yılında Fransa'da H. Alfsen tarafından alınan patent ile devam etmiştir. Alfsen betonun çekme dayanımını arttırmak üzere demir, ahşap gibi liflerin kullanımını öngörmüştür. Bazı kaynaklara göre, Alfsen'den önce 1898 yılında asbest liflerinin çimento hamurunu güçlendirmek üzere kullanılması (Hatschek Yöntemi) da lifli betonun gelişimi açısından bir aşamadır (Bentur ve Mindess, 1990). 1920 yılında Alman A. Kleinlogel de betonda demir parçalarının kullanılmasına dair patent almıştır. 1927'de ABD'li G. Martin ve W. Meischke-Smith ve 1933'de H. Etheridge, farklı geometrik formlar verilmiş ince tellerin betonda kullanımına dair patent almışlardır. Günümüzde kullanılan liflere benzer liflerin kullanımına dair patent ise ilk olarak, 1939'da İngiliz Zitkeviç, 1943'de İngiliz G. Constantinesco tarafından alınmış ve 1950'li yıllardan itibaren betonda cam lifi kullanılması ile ilgili deneysel çalışmalar başlamıştır. 1960'lı yıllarda ise bazı araştırmacılar tarafından lifli betonun özellikleri deneysel olarak araştırılmaya başlanmış ve bazı yapı elemanlarında lifli beton kullanılmıştır (ACI 544.1R, 2002; Erdoğan ve Erdoğan, 2007; Naaman, 1985). Aynı yıllarda Romualdi ve Batson (1963) tarafından ÇLDB ile ilgili ilk büyük araştırma gerçekleştirilmiştir (ACI 544.1R, 2002). ÇLDB'de çelik liflerin aralığı (sıklığı) konusundaki incelemeler, Romualdi (1969) ve Longini vd. (1970)'nin yürüttüğü çalışmalar sonucunda ortaya çıkan patentlere dayanılarak yapılmıştır. Ek olarak Ball vd. (1972) ise liflerin sıyrılması ve narinlikleri üzerinde çalışmış ve bu

konuda patent almışlardır. Aynı yıllarda lifli betonları incelemek için kompozit malzeme esaslarından yararlanılan çalışmalar da yürütülmüş ve bu çalışmaların sonucunda betondaki lif katkısının, betonun ilk çatlama dayanımının ötesinde tokluğu önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir (Romualdi ve Batson, 1963; Romualdi ve Mandel, 1964; Shah ve Rangan, 1970; Shah ve Rangan, 1971; Naaman, 1985).

1960'lı yılların sonlarından itibaren üretilmeye başlanan ÇLDB'nin kullanımı ise işlenebilirlik üzerinde etkili kimyasal katkıların da gelişmesi ile artmıştır. Silis dumanı gibi puzolanlar ile birlikte kullanımı püskürtme beton uygulamalarına olanak verirken, ÇLDB'nin geçirgenliğini de azaltmıştır (ACI 544.1R, 2002).

Günümüzde ise betona ek olarak çeşitli mühendislik malzemelerinin, kompozit özelliklerinden faydalanabilmek için lifler ile güçlendirildiği bilinmektedir. Betonun ise liflerle iyileştirilen özellikleri şu şekilde sıralanabilir: çekme dayanımı, basınç dayanımı, elastisite modülü, çatlamaya karşı direnç, çatlak kontrolü, durabilite, yorulma dayanımı, darbe ve aşınmaya karşı dayanım, büzülme (rötre) ve genleşme, termal karakteristikler ile yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılık. Araştırmalar sonucunda ortaya konulan sonuçlara göre, lifli betonun geleneksel betona göre daha yüksek çekme dayanımına ve deformasyon yapabilme kapasitesine sahip olduğu da görülmüştür. Bu durumda, özellikle eğilmenin etkili olduğu yerlerde, lifli beton betonarme donatıları ile birlikte kullanıldığında yapı elemanlarının kesitlerin ekonomik olarak boyutlandırılabilceğini söylemek mümkündür (ACI 544.1R, 2002; Bentur ve Mindess, 1990; Mehta ve Monteiro, 2006).

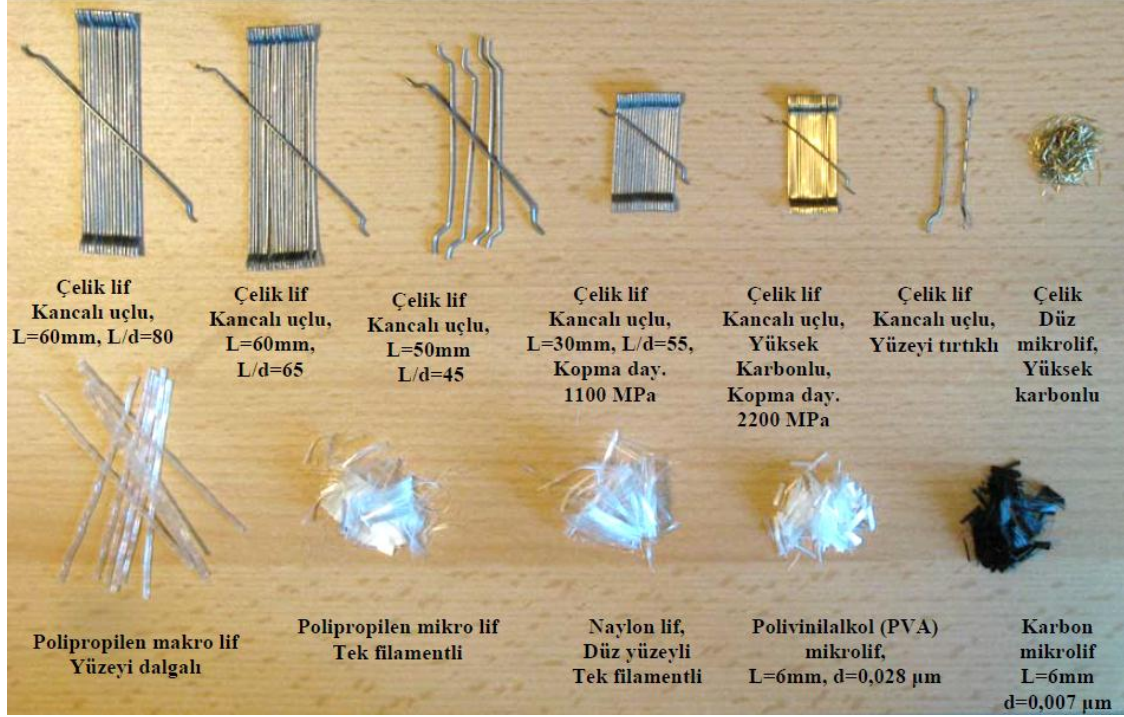
2.2. Betonda Kullanılan Lif Tipleri ve Çelik Lifler

Betonda kullanılan lifler, uygulamaya göre değişen ihtiyaç ve taleplere karşılık verecek şekillerde değişik özelliklerde üretilebilirler. Bu sebeple lifleri üç farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür (Naaman, 2003). Bunlar:

1. Üretildiği malzemeye göre lifler: organik, mineral, yapay,
2. Fiziksel veya kimyasal özelliklerine göre lifler: yoğunluk, yüzey şekli vs.,
3. Mekanik özelliklerine göre lifler: çekme dayanımı, elastisite modülü vs.'dir. (Naaman, 2003).

Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute-ACI) ise betonda kullanılan lifleri çelik başta olmak üzere, cam lifi, sentetik (plastik vb.) ve doğal lifler olarak vermiştir. Bunlar içerisinde en çok kullanılan lif tipi betona kazandırdığı üstün mekanik

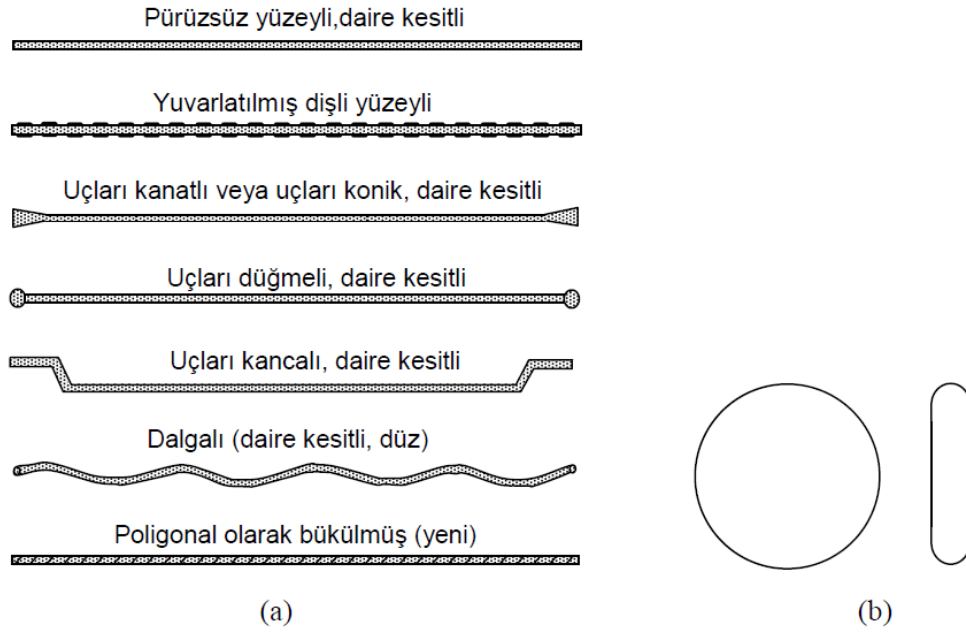
özellikler sayesinde çelik liflerdir (Şekil 2.1) (ACI 544.1R, 2002; Mehta ve Monteiro, 2006).



Şekil 2.1. Betonda kullanılan bazı lif çeşitleri (Yardımcı, 2007).

Ayrıca bu lif tiplerini, geometrik özelliklerine göre sınıflandırmak da mümkündür. Şekil 2.2’de uygulama ve araştırmalarda kullanılan liflerin şekilleri verilmiştir (Naaman, 2003). Buna göre liflerin kesitleri yuvarlak veya düz (plak gibi) olabildiği gibi, yüzey şekilleri ve geometrik formları bakımından da farklı çelik lif tiplerine rastlamak mümkündür.

Şekil 2.2’deki geometrik farklılığın yanı sıra, çelik liflerin farklı boy (L) ve çaplarda (d) da üretilebildiği ve bu farklılıkların ÇLDB özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu unutulmamalıdır. Ayrıca çelik lifler için bir diğer önemli özellik de narinliktir (λ) ve lif boyunun çapına oranı (L/d) ile hesaplanan boyutsuz bir parametredir. Çelik lifler içerdikleri karbon oranına göre normal (düşük karbonlu) veya yüksek (yüksek karbonlu) dayanım özelliklerine de sahip olabilmektedirler.



Şekil 2.2. Betonda kullanılan çelik liflerin geometrik şekilleri: (a) liflerin yüzey şekilleri, (b) liflerin kesit geometrileri (yuvarlak ve düz) (Naaman, 2003; Yalçın, 2009).

Bunlara ek olarak, çelik lifler üretim biçimlerine göre de farklılık göstermektedir. ASTM A 820 (2004) standardı üretim tekniklerine göre çelik lifleri beş farklı sınıfa ayırmaktadır.

Çelik lifler betonda tek tip olarak kullanılabildikleri gibi birçok çelik lif tipini bir arada kullanmak da mümkündür. Ayrıca çelik liflerin diğer lif çeşitleri ile de birlikte kullanıldığı uygulamalar mevcuttur. Örneğin çelik ve polipropilen liflerin birlikte kullanımı literatürde oldukça yaygındır. Yalçın (2009), Park vd. (2012), Aslani ve Nejadi (2013)'nin yaptığı araştırmalar bu şekilde yürütülen çalışmalara örnektir.

2.3. Çelik Lif Donatılı Betonun Kullanım Alanları

Esas itibarı ile çelik liflerin betona kazandırdığı üstün özelliklerin sebebi betondaki çatlak oluşumunun gecikmesi ve/veya çatlak yayılımının önlenmesi olduğundan, dinamik yüklere maruz ya da çekme, kesme veya eğilme etkisindeki yapı elemanlarında ÇLDB tercih edilir. Yapısal uygulamalarda çelik lifler genelde betonarme donatısı ile birlikte kullanılırlar. Yapının amacına ve maruz kalacağı kesit zoruna ya da çevresel etkiye göre çeşitli boyut ve tiplerde çelik lifler kullanılabilir. Örneğin çatlak genişliğinin sınırlandırılarak beton tokluğunun artırılması gereken yerlerde makro boyutlu lifler

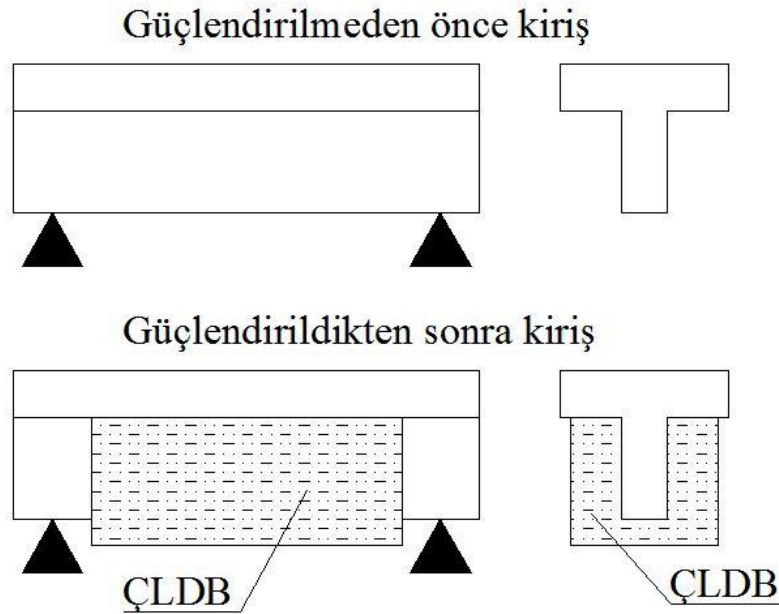
kullanılırken, yüksek sıcaklık etkisinde genleşme veya rötre çatlaklarının azaltılması gereken yerlerde çelik yünü gibi mikro boyutlu lifler tercih edilebilir. Çünkü lif boyu arttıkça sınırlanabilecek çatlak boyu da artar (ACI 544.3R, 1998; Bentur ve Mindess, 1990; Mehta ve Monteiro, 2006).

Genel olarak, normal betonun gevreklik probleminden dolayı kullanılamayacağı ya da kullanımının fazladan maliyet getireceği yapılarda ÇLDB'nin tercih edildiği söylenebilir. Lifli beton kullanılan yapılarda ayırık süreksiz liflerin sürekli çelik çubuk donatıya veya hasır donatıya göre daha avantajlı olmasının sebebi, liflerin beton içinde üç boyutta dağılmış olması, sürekli donatıya göre daha az korozyon riski taşıması ve boyuna donatının betonlamadan önce yerine yerleştirilmesi işlemini ortadan kaldırmasıdır. Genelde çelik lifin tercih edilme sebebi ise diğer lif tiplerine göre betona daha çok mekanik özellik kazandırmasıdır (Aslani ve Nejadi, 2013; Bentur ve Mindess, 1990; Kamal vd., 2014; Kim vd., 2008; Mehta ve Monteiro, 2006). Çelik liflerin betona katılması ile ortaya çıkan üstün özellikler daha sonra ifade edilecektir.

ÇLDB'nin uygulamadaki ilk örneği 1971 yılında Londra'da inşa edilen Heathrow Havaalanının uçak pisti kaplamasıdır. 65 mm kalınlığındaki plaklardan oluşan ÇLDB kaplamada 0,25 mm çaplı ve 25 mm uzunluğunda ayırık çelik lifler kullanılmıştır. 5 yıllık süre boyunca pist betonunda hiç çatlama gözlemlenmemiştir (Mehta ve Monteiro, 2006). Aynı yılda ABD'de Birleşik Devletler Ordusu İnşaat Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory) tarafından gerçekleştirilen deneylerde hacimce %2 çelik lif içeren plaklar ile yalın beton plaklar karşılaştırılmıştır. Uçak pistlerinde kullanılacak ÇLDB'lerin test edildiği deneylerde, aynı tekerlek ağırlığı için normal beton plakların 950 yüklemenin sonunda tamamen göçtüğü gözlemlenirken, ÇLDB plakların 8735 yükleme sonucunda çatladığı fakat dağılmadığı görülmüştür. Ayrıca ÇLDB kullanıldığında plak kalınlığının yarıya indirilebileceği belirtilmiştir (ACI 544.1R, 2002; Mehta ve Monteiro, 2006). Bu tarihten itibaren 1983 yılına kadar ABD'de 22 havaalanı pisti ÇLDB kullanılarak inşa edilmiştir. Bu uygulamalardan biri Las Vegas, Nevada'daki McCarran Uluslararası Havaalanının 1976'da kaplanan uçak park alanıdır. 150 mm kalınlığındaki ilk ÇLDB uygulamanın performansından etkilenilerek, 1979 yılında başka bir uçak park alanı 175 mm kalınlığında ÇLDB ile kaplanmıştır. Burada 50 mm uzunluğunda ve 0,5 mm kalınlığında uçları deforme edilmiş çelik lifler kullanılmıştır ve burada kullanılan ÇLDB'nin 28 günlük eğilme dayanımı 7 MPa olarak tespit edilmiştir (ACI 544.1R, 2002; Mehta ve Monteiro, 2006). Bu yıllarda ÇLDB tüketimi hakkında

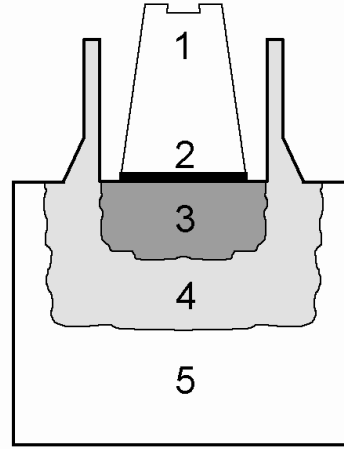
araştırmacıların yaptığı tahminlere göre, 1984 yılında 20.000 ton çelik lif üretilmiş ve bu rakam 1988 yılında 60.000 tona çıkmıştır. Betonda m³ başına 50 kg çelik lif kullanıldığı kabul edildiğinde, yıllık 1,2 milyon m³ ÇLDB tüketildiği de hesaplanmıştır (Bentur ve Mindess, 1990). Darbe yüklerine çokça maruz kalan ve dış etkilere açık yüzeyleri geniş olan uçak pistlerinde ÇLDB kullanımının neden tercih edildiğini anlamak zor değildir. Benzer sebeplerden dolayı endüstriyel zeminlerde de kullanımı yaygın olan ÇLDB'nin, sadece Avrupa'da 1990'lı yıllara kadar 1,9 milyar m²'lik endüstriyel alan uygulaması yapıldığı bilinmektedir (ACI 544.1R, 2002).

Daha nitelikli ÇLDB uygulamalarından da bahsetmek gerekirse dünya çapındaki birkaç ÇLDB uygulaması da örnek verilebilir. Bunlardan biri Polonya'daki Siersza Elektrik Fabrikasının kirişlerinin güçlendirilmesidir. T kesitli kirişlerin ÇLDB püskürtülerek kaplanması sonucu güçlendirilen kirişler Şekil 2.3'de görülmektedir (Katzner, 2006).



Şekil 2.3. ÇLDB ile kaplanan T kesitli kirişlerin şeması (Maidl, 1995).

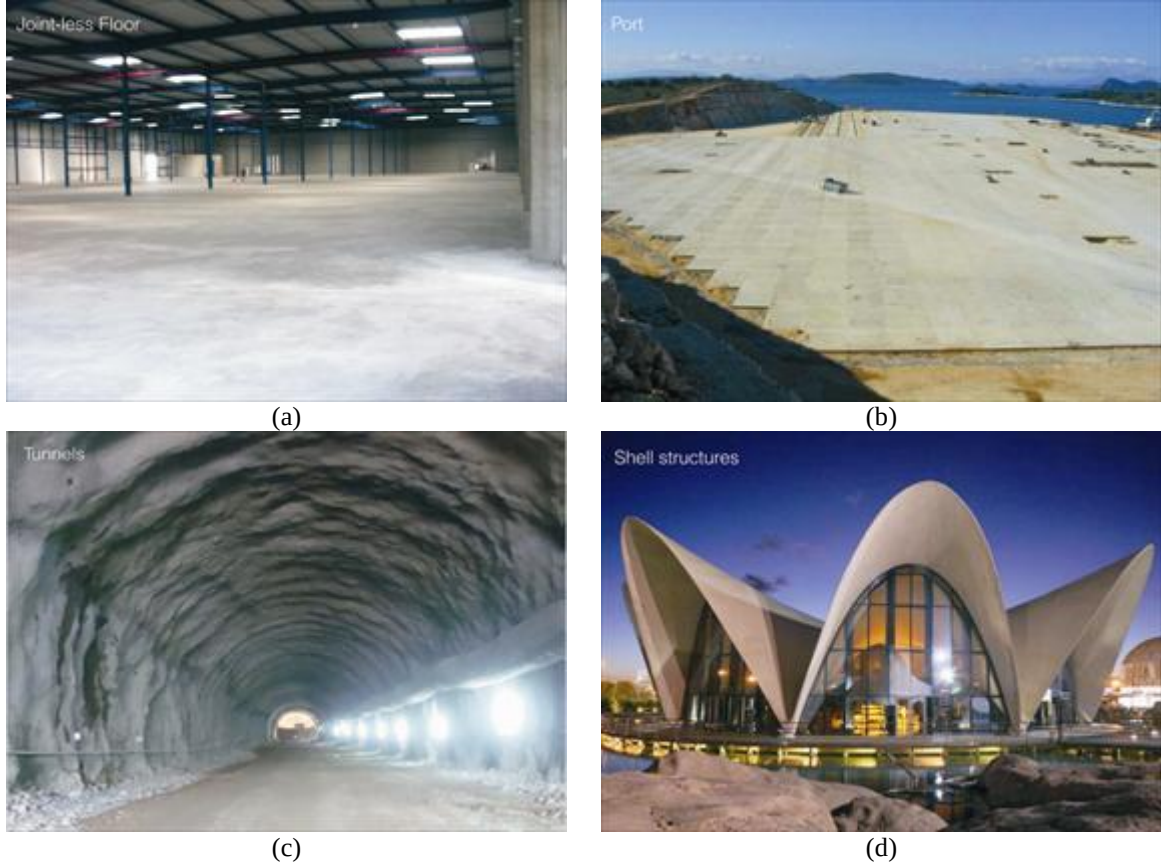
200 kN'luk yük altındaki ve çekiçleme etkisine maruz temelin ÇLDB kullanılarak yeniden inşa edilmesi de nadir bulunan bir örnektir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. ÇLDB ile üretilen temel (1- Örs, 2- Darbe emici yatak, 3- ÇLDB, 4- Yalın Beton, 5- Eski beton blok) (Jamrozy, 1983).

Çekiçleme etkisi ile birkaç yılda bir çatlayan beton temel neredeyse 4 m derinliğinde kaldırılmış ve yerine yenisi inşa edilmiştir. Söz konusu temelin boyutları 12x14 m'dir. Öncelikle normal beton ile kaplanan temel, daha sonra 65 kg/m^3 çelik lif içeren ÇLDB ile 1 m derinliğinde doldurulmuştur. Burada kullanılan çelik liflerin boyları 25 mm ve çapları 0,25 mm'dir. ÇLDB temelin üstüne ise doğrudan 200 kN ağırlığındaki örs oturtulmuştur. Titreşim başladığında temelde +0,2 MPa ile -0,7 MPa aralığında gerilmeler meydana geldiği tahmin edilmiştir ve iki yılın sonunda temelde herhangi bir hasar oluşmadığı rapor edilmiştir. Bunların dışında Rusya ve Ukrayna'da endüstriyel bacaların yapımında da ÇLDB kullanılmıştır. Dış sıcaklığı -30°C 'ı ve iç sıcaklığı $+250^\circ\text{C}$ 'ı bulan bu bacaların çelik lif katkısı ile eğilme dayanımları %250 arttırıldığı tespit edilmiş ve iç-dış sıcaklık farkından dolayı oluşacak çatlamların önüne geçilmiştir (Katzner, 2006).

Sonuç olarak Dünyanın birçok yerinde ÇLDB'nin kullanım alanları, hidrolik yapılar (barajlar, savaklar vs.), plak kalınlıklarının düşülmesinin istendiği havaalanı ve otoyol kaplama ve üstyapıları, darbe dayanımı gerektiren ve termal etkilere maruz endüstriyel zeminler, ısıya dayanıklı beton uygulamaları, köprüler, püskürtme beton uygulamaları (tüneller, madenler, şev stabilizasyonu vs.), ince kabuk şeklindeki yapılar, patlamaya karşı dayanıklı olması gereken yapılar (genellikle sürekli çelik donatılarla birlikte) ve sismik yüklere maruz deprem dayanımı gerektiren yapılar olarak sıralanabilir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. ÇLDB uygulamaları: (a) endüstriyel zemin, (b) pist, (c) püskürtme beton uygulaması, (d) ince kabuk elemanlar (URL-1, 2013).

Ayrıca ÇLDB’ler prefabrike elemanlarda da başarı ile uygulanmaktadırlar. Öngerilmeli köprü kirişleri (öngerme donatısı ile birlikte), yağmur suyu kollektörleri, kanalizasyon boruları, tünel segmentleri, kazık temel elemanları gibi prefabrik yapılar, ÇLDB ile üretilen başarılı uygulamalardan birkaçıdır. Tabi ki bu uygulamaların bazıları ÇLDB yanında geleneksel sürekli betonarme donatısı da gerektirir (Şekil 2.6) (Abbas vd., 2014; ACI 544.1R, 2002; ACI 544.3R, 1998; Katzer, 2006; Shah ve Skarendahl, 1985; Taşdemir vd., 2002; Zollo, 1997). Prefabrike elemanlarda ÇLDB’nin özellikle tercih edilmesinin sebebi ise prefabrik elemanların fabrikadan şantiyeye nakliyesi, yerleştirme ve montaj işlemleri sırasında elemanlarda çatlak oluşumu riskini oldukça düşürmesidir (Shah ve Skarendahl, 1985). Karıştırma, taşıma ve yerleştirme işlemlerinin maliyetlerinin lif katkısı ile değişmediği düşünülürse, lifli beton ile geleneksel betonun maliyet farklarının ihmal edilebilir olacağı Mehta ve Monteiro (2006) tarafından ortaya konulmuştur. Ayrıca araştırmacılar, aynı yüklere maruz yapılarda kesit kalınlığı düşürüleceğinden ve servis ömrü uzun olacağından ÇLDB’un uygun maliyetli olduğunu da savunmuşlardır.



(a)



(b)

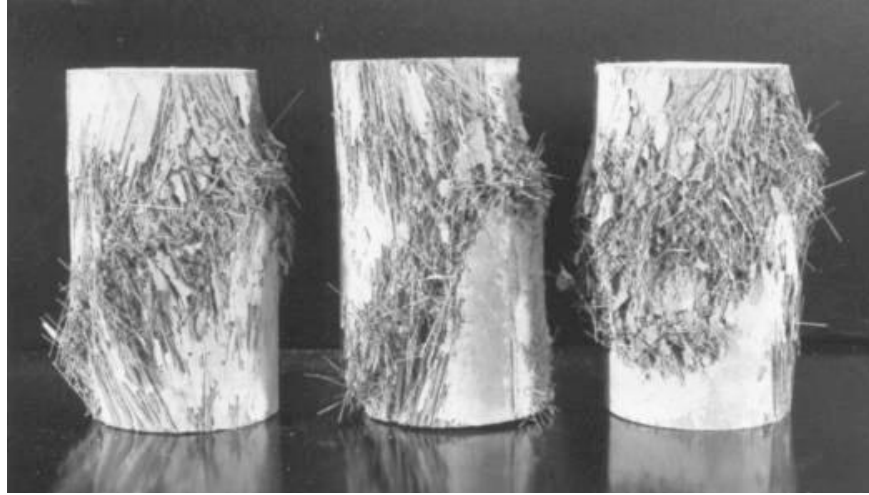
Şekil 2.6. Prefabrik üretimde ÇLDB, (a) Öngerilmeli köprü kirişi, (b) tünel segmentleri



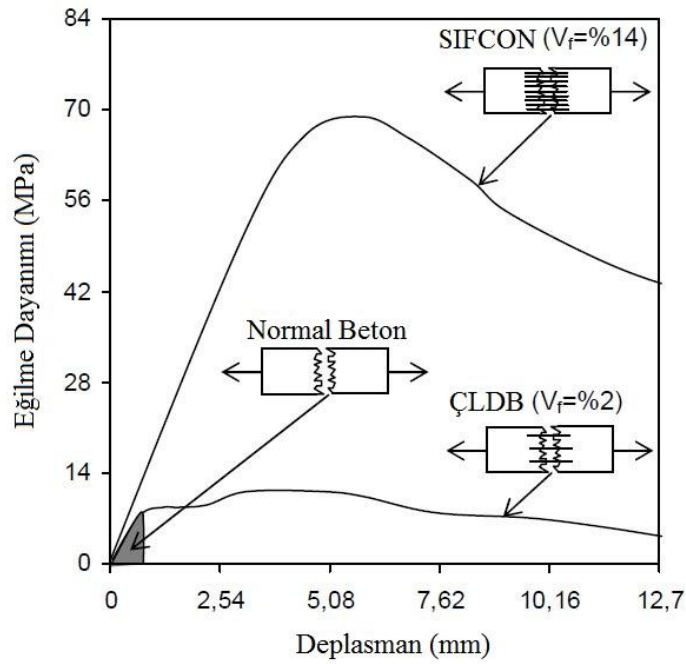
Şekil 2.7. Kore’de bulunan, açıklığı 120 m ve kemer yüksekliği 130 m olan Köprü (Mehta ve Monteiro, 2006).

Son yıllarda ise Yüksek Performanslı Beton araştırmaları ÇLDB’yi de etkilemiştir. Daha yüksek basınç dayanımı ($f_c > 60$ MPa) ile birlikte sünekliğin de artırılması amacıyla ayrık çelik lifler ile takviye edilen bu betonlar da uygulamada yerlerini almışlardır. Bu yüksek performanslı beton uygulamalarına örnek olarak Pudra Reaktif Betonu (PRB) gösterilebilir. Esas itibarıyla beton harcı içerisindeki iri agreganın elimine edilerek ince malzemenin artırılması, yüksek oranda silis dumanı kullanımı, su/çimento oranının düşürülmesi ve genelde mikro boyutlu çelik liflerin takviyesi (genelde hacimce %2,5) işlemi ile elde edilen çok yüksek performanslı bir beton türüdür. Ayrıca özel kür koşulları

sağlandığında basınç dayanımı 800 MPa'ya kadar ulaşmaktadır. Şekil 2.7'de PRB kullanılarak inşa edilmiş bir köprü uygulaması görülmektedir (Cheyrezy vd., 1995; Mehta ve Monteiro, 2006).



(a)



(b)

Şekil 2.8. (a) Basınç deneyine tabi tutulmuş, yüksek oranda çelik lif içeren SIFCON numuneleri (Mehta ve Monteiro, 2006) (b) eğilmeye tabi tutulan yalın beton, ÇLDB ve SIFCON'un gerilme-şekil değiştirme davranışı (Naaman, 1992; Yalçın, 2009).

Betonda yüksek performans araştırmaları sonucunda ortaya çıkan bir diğer ÇLDB türü de SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete)'dur (Şekil 2.8a). Hem basınç hem de eğilme dayanımı oldukça yüksek olan bu lifli beton türünde %5~20 oranlarda çelik lif

kullanılır. Çelik liflerin kalıp içerisine önceden yerleştirildiği ve sonrasında lifler arasında su/çimento oranı yüksek çimento şerbeti enjekte edilerek üretildiği düşünüldüğünde üretimi zor bir beton türü olduğu anlaşılır. SIFCON'un basınç dayanımı 120 MPa, eğilme dayanımı 40 MPa ve kesme dayanımı 28 MPa'a kadar çıkabilmektedir. Bu açıdan SIFCON, geleneksel beton bir yana sıradan ÇLDB'den bile üstün performans sergiler. Üstelik direk çekme deneylerinde de oldukça yüksek süneklik özelliği göstermektedir (Şekil 2.8b) (Mehta ve Monteiro, 2006; Bentur ve Mindess, 1990).

2.4. Çelik Lif Donatılı Betonun Özellikleri

Bu bölümde, geleneksel betona göre üstün mekanik özellikler sergileyen ÇLDB'nin taze ve sertleşmiş özellikleri anlatılmıştır. Çelik lif katkısı, betonun özellikle darbe dayanımı ve tokluk gibi özelliklerini artırır. Lifler sayesinde deformasyon yapabilme kapasitesi de artan betonun, çekme ve eğilme dayanımının yanı sıra durabilitesi de artar. Bu artış genel olarak liflerin çatlak oluşumunu veya gelişimini sınırlamasından kaynaklanır (ACI 544.3R, 1998; Bentur ve Mindes, 1990). Çelik lif katkısı ile değişen ve gelişen özellikler çelik lif tiplerine, özelliklerine ve miktarına bağlı olarak da değişir. Bu konuda yapılan çalışmalar ile değişen ÇLDB özellikleri bu bölümde açıklanmıştır.

2.4.1. İşlenebilirlik Özellikleri

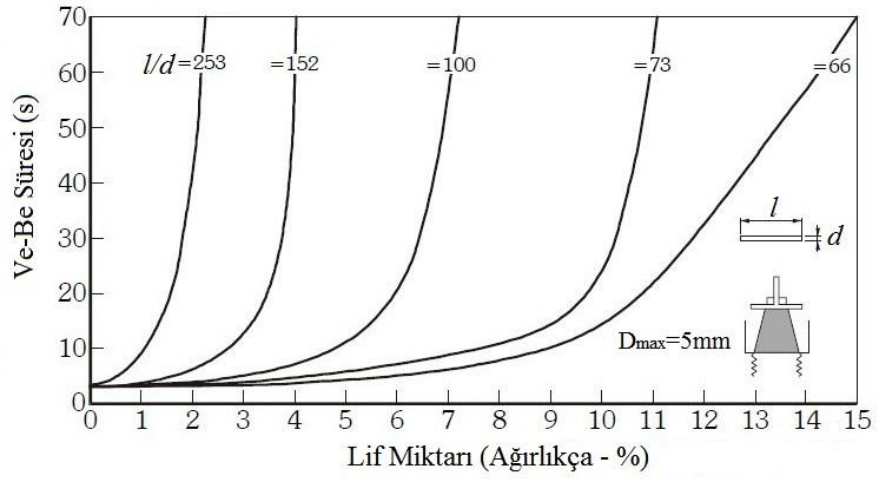
ÇLDB'nin geleneksel betona göre birçok üstün mekanik özelliğinin bulunduğu bilinmektedir. Bunun yanında ÇLDB'nin geleneksel betona kıyasla işlenebilirlik açısından bazı zorlukları vardır. Çelik lif katkısı ile azalan işlenebilirlik özellikleri için standartlar ve çalışmalar tarafından verilen tavsiyeler, ÇLDB'nin taze özelliklerini istenilen düzeye arttırmayı amaçlar.

Bilindiği gibi betonun kalitesini tanımlayan parametrelerden biri olan işlenebilirlik, betonun karıştırılması, taşınması ve yerine yerleştirilmesi işlemlerinin hepsini etkileyen önemli bir özelliktir (Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991). ÇLDB'nin işlenebilirliği, çelik liflerin değişen boyut ve özelliklerinin yanında, geleneksel betonun işlenebilirliğini etkileyen parametrelerden de etkilenir (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.3R, 1998). Özellikle artan lif boyu ve narinliğinin işlenebilirliği olumsuz etkilediği bilinmektedir. Üstelik beton içindeki lif miktarının artışı da işlenebilirliği önemli ölçüde azaltır (Abaza ve Hussein,

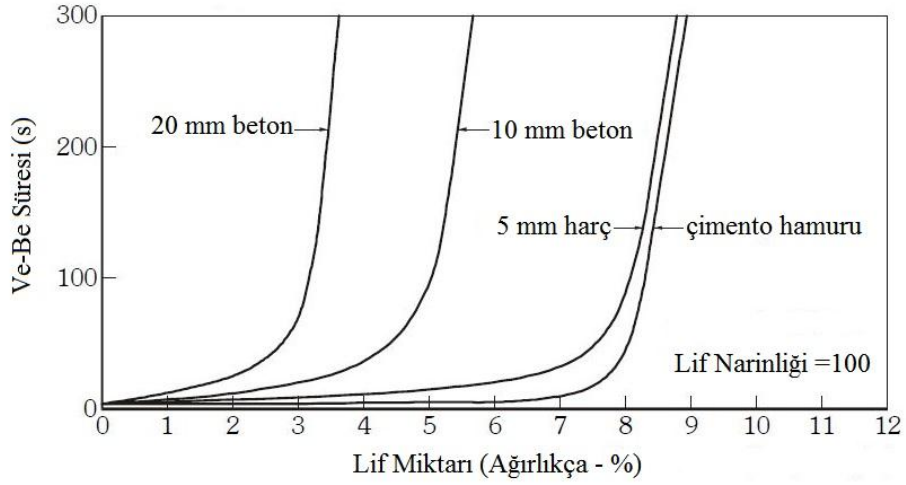
2014; ACI 544.1R, 2002; Açıkgenç vd., 2013; Bentur ve Mindess, 1990; Köksal vd., 2008). Uygunoğlu (2011) ÇLDB'nin işlenebilirliği üzerine yaptığı çalışmada hem çelik lif tipinin hem de çelik lif miktarının etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda özellikle uzun çelik liflerin yüksek miktarda kullanımının ÇLDB'nin işlenebilirliğini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Uygunoğlu, 2011). Köksal vd. (2013) de çalışmalarında lif miktarı artışının işlenebilirliği düşürdüğünü ispatlamışlardır. Genel olarak ifade etmek gerekirse, %0,25~1,5 oranında çelik lif içeren ÇLDB'nin slump (çökme) değeri, yaklaşık 25~102 mm kadar azalmaktadır. Bu sebeple, taze ÇLDB'nin kullanımı ve kalitesi çoğu zaman akışkanlaştırıcı kimyasal beton katkılarının varlığına bağlıdır. Bunun yanında, uygun kıvamı sağlamak ve geçirimsizliği arttırmak için silis dumanı gibi toz malzemelerin kullanımı da tavsiye edilir (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.3R, 1998; Topçu ve Canbaz, 2007).

Şekil 2.9'da araştırmalar sonucunda ortaya konulmuş işlenebilirliğin çelik lif miktarı ve narinliği ile değişimi görülmektedir. İleri bölümlerde bahsedileceği gibi tokluk ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklere ihtiyaç duyulan yerlerde çelik lif narinliğinin ve çelik lif miktarının artırılması istenir (Bentur ve Mindess, 1990; Mehta ve Monteiro, 2006). Fakat Şekil 2.9'da görüldüğü gibi bu iki değişkenin işlenebilirliği olumsuz etkilediği açıktır. Şekil 2.9a'da $D_{max}=5$ mm agrega ile üretilmiş çelik lifli betonlarda lif miktarının ve lif narinliğinin artışı ile Ve-Be sürelerinin değişimi görülmektedir. Buna göre, sabit bir Ve-Be süresi elde etmek için, çelik lif miktarı arttırıldığında narinliğin düşürülmesi gerekir. Şekil 2.9b'de ise narinliği 100 olan çelik lifler ile kullanılarak üretilen ÇLDB'nin işlenebilirliğinin, çelik lif miktarının yanı sıra maksimum agrega çapı ($D_{max}=20, 10, 5$ mm ve çimento harcı) ile değişimi de verilmiştir. Buna göre D_{max} artışının da ÇLDB'nin işlenebilirliğini olumsuz etkilediği açıktır. Ayrıca yüksek narinliğe sahip lifler veya büyük D_{max} kullanımının maksimum lif miktarını düşürdüğü de göze çarpmaktadır (Bentur ve Mindess, 1990; Edgington vd., 1974; Grünwald, 2004). Öyleyse işlenebilir bir ÇLDB elde edebilmek için, çelik lif miktarı ile D_{max} arasında bir denge kurulmalıdır.

Bunların yanında, harçlarda kum miktarının, betonda iri agrega miktarının, çelik lif miktarı, boyu ve narinliğinin artması ve su/çimento oranı ile çelik lif çapının düşmesi, işlenebilirliğin azalmasına yol açar (Hughes ve Fattuhi, 1976).



(a)



(b)

Şekil 2.9. Çelik lif katkısı ile ÇLDB'nin işlenebilirlik değişimi (a) Lif miktarı ve narınlık ile işlenebilirliğin değişimi, (b) Lif miktarı ve D_{max} ile işlenebilirliğin değişimi (Edgington vd., 1974).

Literatürde uygun işlenebilirliğin sağlanması için, lif miktarının artırılması gereken durumlarda lif boyunun düşürülmesi, lif boyunun artması istenen durumlarda da lif miktarının düşürülmesi tavsiye edilir. Lankard (1984), geleneksel betonda kullanılan sıradan metotlarla üretilen ve yerleştirilen ÇLDB'lerde lif miktarının bütün beton hacminin %1,5'ini geçmemesi gerektiği, daha fazla lif kullanmak gereken durumlarda ise özel üretim ve yerleştirme tekniklerinin kullanılması gerektiğini savunmuştur. Çünkü lif miktarı arttıkça lif topaklaşması da artmaktadır (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.4R, 1999; Swamy ve Mangat, 1974). Yaygın bir kanı olarak beton içindeki çelik lif oranının hacimce %2'den ve çelik lif narınlığının ise 100'den fazla olması uygun işlenebilirlik açısından istenmemektedir (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.4R, 1999; Bentur ve Mindess, 1990; Yalçın,

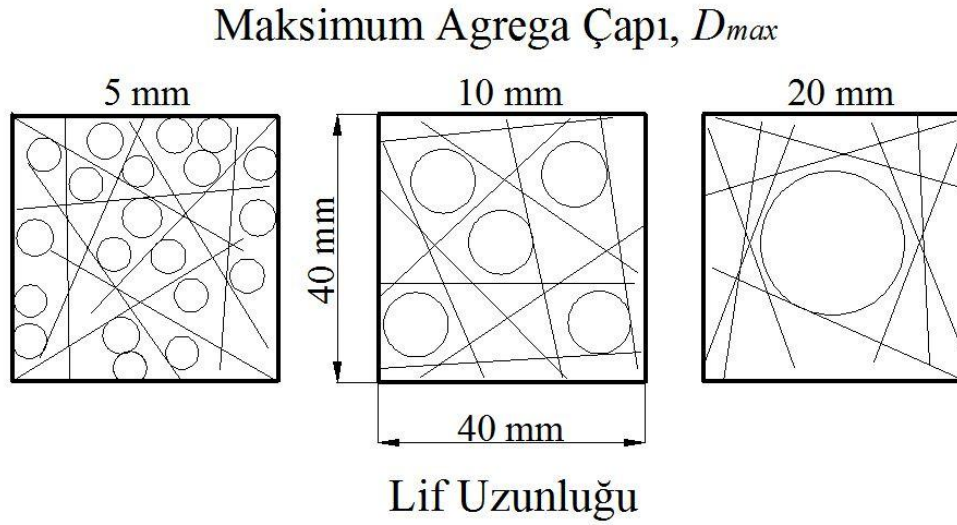
2009). Eren ve Marar (2009) elik lif miktarı ve narinliğinin artışıının işlenebilirliği azalttığını ifade etmişlerdir.

Bilindiği gibi agrega özellikleri de betonun hem işlenebilirlik hem de mekanik özelliklerini etkiler. Geleneksel betonda olduğu gibi LDB de agrega granölometrisi, agrega şekli ve D_{max} parametrelerinden etkilenir. Bu sebeple ACI 544.4R (1999)'da agrega granölometrisinin de optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. D_{max} artışının betonun mekanik özelliklerini olumlu etkilediğini de biliyoruz (Meddah vd., 2010; Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991; Swamy, 1975). Fakat D_{max} 'ın arttıkça işlenebilirliği azaltması, elik lifler de eklendiğinde daha olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Bu sebeple ACI 544.1R (2002) ve ACI 544.3R (1998) tarafından en iyi işlenebilirliği elde etmek için betonun harç fazının arttırılıp, iri agrega miktarının sınırlandırılması gerektiği ortaya konulmuştur. Böylece lif topaklanması engellenecek ve beton içinde düzgün lif dağılımı sağlanacaktır. Agrega karışımı içerisindeki iri agrega oranının en fazla %55 ile sınırlandırılması ve D_{max} 'ın 19 mm'den büyük olmaması tavsiye edilmiştir. Ayrıca yüksek mekanik özellikleri sağlamak için büyük D_{max} ve lif boyunun tercih edildiği zorunlu durumlarda ise lif miktarının düşürölmesi önemlidir (ACI 544.3R, 1998). Bazı kaynaklara göre ise D_{max} 'ın lif boyunun yarısından fazla olmaması istenir (Olivito ve Zuccarello, 2010). Çünkü en işlenebilir LDB, en az elik lif topaklaşmasına ve düzgün (üniform) lif dağılımına sahip olandır (Bentur ve Mindess, 1990). Tablo 2.1'de ACI 544.1R (2002) tarafından LDB'ler için tavsiye edilen gradasyonlar görölmemtedir. Buna göre en küçük D_{max} =10 mm tavsiye edilirken, en büyük D_{max} =38 mm'dir.

Johnston (1996) ve Vandewalle (1993)'e göre, uygun mekanik özellikler elde etmek için, D_{max} 'ın daima elik lif boyundan kısa olması gereklidir. Genellikle lif boyu D_{max} 'ın 2~4 katı seçilmesi ve geleneksel betona göre iri agrega hacminin %10 düşürölmesi tavsiye edilir. Bu durum LDB'nin pompalanabilmesi için önemlidir. Ayrıca LDB'de istenilen işlenebilirliğe ulaşmak için, karışım suyunu arttırmak yerine akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılmalıdır (Grünwald, 2004; Johnston, 2001). Şekil 2.10'da D_{max} 'ın lif dağılımını nasıl etkilediği göröllebilir.

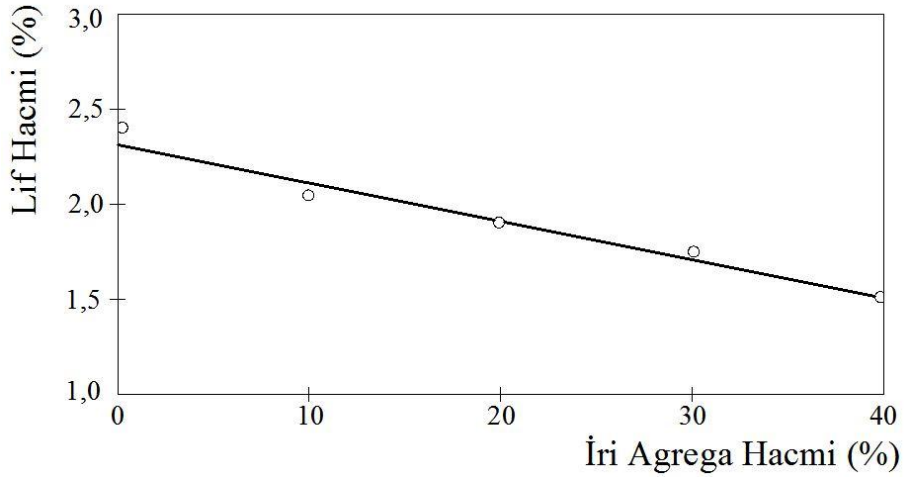
Tablo 2.1. ACI 544.1R (2002)'de ÇLDB için tavsiye edilen agrega granülometrilere

Eleğ Çapı (mm)	Geçen (%)				
	D_{max} (mm)				
	10	13	19	25	38
51	100	100	100	100	100
38	100	100	100	100	85-100
25	100	100	100	94-100	65-85
19	100	100	94-100	76-82	58-77
13	100	93-100	70-88	65-76	50-68
10	96-100	85-96	61-73	56-66	46-58
5	72-84	58-78	48-56	45-53	38-50
2,4	46-57	41-53	40-47	36-44	29-43
1,1	34-44	32-42	32-40	29-38	21-34
0,6	22-33	19-30	20-32	19-28	13-27
0,3	10-18	8-15	10-20	8-20	7-19
0,15	2-7	1-5	3-9	2-8	2-8
0,075	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2



Şekil 2.10. Değişen agrega büyüklüğünün lif dağılımına etkisi (Johnston, 1996; Grünwald, 2004).

Şekil 2.11'de ise artan iri agrega oranı ile azalan çelik lif hacmi verilmiştir. Buna göre belirli bir işlenebilirliğin sağlanabilmesi için iri agrega oranı ile maksimum çelik lif miktarı arasında ters orantı vardır (Swamy ve Mangat, 1974).



Şekil 2.11. İri agrega miktarı ile maksimum çelik lif hacmi arasındaki ilişki (Swamy ve Mangat, 1974).

Çelik lifler beton içerisinde topaklaşma ve birbirlerinden ayrılmama eğilimi gösterir. Düzgün lif dağılımının sağlanamadığı durumda, ÇLDB'den beklenen mekanik özellikler elde edilemez (ACI 544.3R, 1998; Bentur ve Mindess, 1990; Grünwald, 2004). Bu sebeple uygun işlenebilirliğin sağlanması ve beton içerisinde liflerin düzgün ve homojen dağılması için yukarıdaki tavsiyelere uyulmalıdır. Aksi taktirde, beton içinde düzgün dağılmayan çelik liflerin yanı sıra, yerine tam yerleşemeyen betonun istenilen mekanik performansı sağlamasının mümkün olmayacağı açıktır. Şekil 2.12'de hacimce %1,5 oranında, boyu 60 mm ve narinliği 80 olan çelik lif içeren betonda, işlenebilirlik kaybı sebebiyle meydana gelen yerleşme boşlukları görülmektedir (Açıkgenç vd., 2013). Bu durumda artan lif oranı ile işlenebilirlikteki düşüş, şüphesiz ki mekanik özelliklerin de düşmesine yol açacaktır. Chenkui ve Guofan (1995), çalışmalarında artan çelik lif miktarının hacimce %2'ye ulaşması ile işlenebilirlikteki düşüşün basınç dayanımını olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir.

Bu tip uygun olmayan işlenebilirlik dolayısıyla oluşan kusurları azaltmak için yukarıda anlatılan önlemlerin yanı sıra, lif tipini değiştirmek veya birkaç lif tipini bir arada kullanmak da günümüzde araştırılmaktadır. Karma lifli beton genelde uygun işlenebilirlik ile yüksek mekanik özellikler beklenen durumlarda kullanılır. Örneğin mikro ve makro boyutlu çelik liflerin beraber kullanımı, betonda hem mikro hem de makro boyutlu çatlakların yayılmasını önleyeceğinden mekanik özellikleri artırır. Aynı zamanda, uzun boylu narinliği yüksek lif miktarı da azaltılarak işlenebilirlik artırılabilir (Banthia ve Sappakittipakorn, 2007; Dawood ve Ramli, 2011; Mohammadi vd., 2008; Yalçın, 2009).



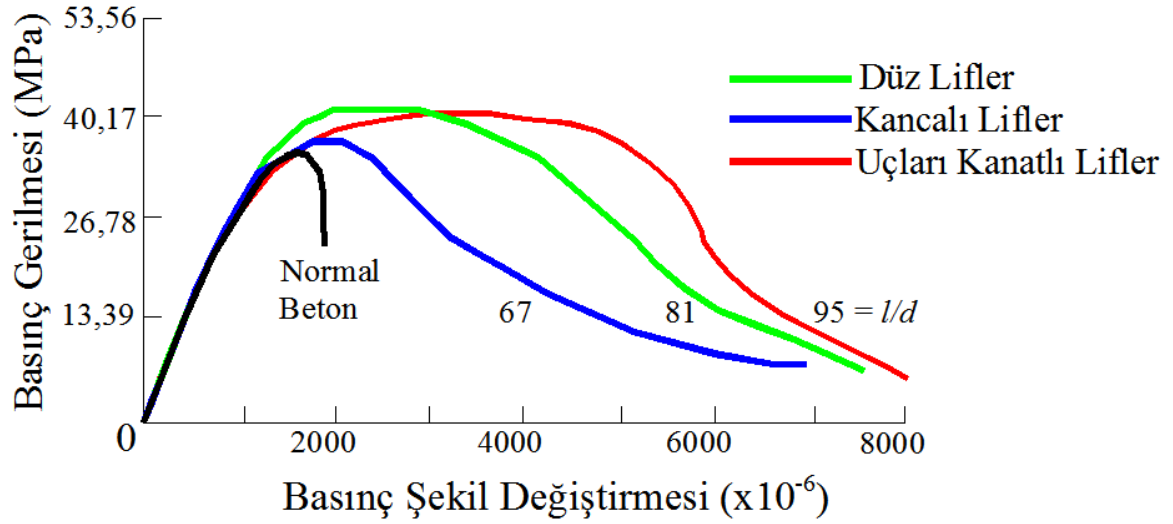
Şekil 2.12. Fazla miktarda, uzun çelik lif içerdiğinden bünyesinde ciddi yerleşme boşlukları meydana gelmiş standart bir küp numunesi (Açıkgenç vd., 2013).

2.4.2. Mekanik Özellikler

2.4.2.1. Basınç Dayanımı

Çelik lif katkısının betonun çatlamasını geciktirdiği ya da çatlağın yayılmasını önlediği bilinmektedir. Dolayısıyla çatlak oluşumuyla devreye giren çelik lifler, çekme dayanımını önemli ölçüde arttırırken, sıradan ÇLDB’lerde basınç dayanımı üzerindeki etkileri ihmal edilebilir. Williamson (1974) çalışmasında, narinliği 100 olan, hacimce %2 oranında çelik lif içeren ve $D_{max}=19$ mm olan ÇLDB numuneleri (150 / 300 mm silindir) üzerinde basınç deneyi yapmış ve basınç dayanımının en fazla %23 arttığını söylemiştir. Şekil 2.13’de Shah vd. (1978) tarafından yapılan çalışmada yer verilen, basınç deneyi sırasında elde edilmiş tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. Bu grafikte, lif içermeyen yalın beton ile çeşitli tiplerde çelik lifler içeren ÇLDB’ler karşılaştırılmıştır ve bütün karışımlarda $D_{max}=9,5$ mm’dir. Şekil 2.13’de görüldüğü gibi çelik lifler basınçta en büyük gerilmeyi az miktarda etkilemişlerdir ve çelik lif tipinin bu gerilim üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Buna karşın, pikten sonra tamamen göçen normal beton yanında ÇLDB’ler deformasyon yapmaya devam etmişlerdir. En büyük gerilmeye kadar yalın beton gibi davranan ÇLDB, en büyük gerilmeden sonra sünek davranış göstermiştir. Deformasyon sırasında absorbe edilen enerji olarak tanımlayabileceğimiz tokluk ise gerilme-şekil

değiştirme veya yük-deplasman grafiğinin altında kalan alana eşit olduğundan, çelik lifler basınç tokluğunu arttırmışlardır. Öyleyse çelik lif takviyesi, ani ve gevrek göçmeyi engellediğinden dolayı betonda kullanımları oldukça önemlidir (ACI 544.4R, 1999; Dvorkin vd., 2011; Shah ve Rangan, 1971; Yalçın, 2009).



Şekil 2.13. Geleneksel betonun ve ÇLDB'lerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Shah vd., 1978).

ÇLDB içerisindeki lifler basınç dayanımının yanında basınç tokluğunu daha çok etkilemişlerdir. Aynı şekilde lif miktarı veya lif narinliği de basınç dayanımını değil basınç tokluğunu etkiler. Lif miktarının artması ile dayanım bir miktar artarken basınç tokluğu önemli ölçüde iyileşir (Boulekbache vd., 2012; Raju vd., 1977; RILEM, 1977; Sirijaroonchai vd., 2010; Yalçın, 2009). Öte yandan yapılan çalışmalar karşılaştırıldığında basınç deneyine tabi tutulan numunelerin boyut ve narinlikleri değiştikçe çelik lif katkısının deney sonuçları üzerindeki etkilerini değiştirmektedir. Örneğin Shah ve Rangan (1971) 50x50x250 mm boyutlu numuneler kullanılarak gerçekleştirdikleri basınç deneylerinde ÇLDB'nin dayanımının normal betonunkine göre küçük oranlarda arttığını rapor ederken, Yin ve Hsu (1990) 152x152x38 mm plaklar üzerinde yaptığı basınç deneyinde basınç dayanımında en büyük artışı %35 olarak belirlemişlerdir (Yalçın, 2009). Köksal vd. (2008) çalışmalarında 150x300 mm boyutlu silindir numuneleri üzerinde basınç deneyi yapmışlar ve ÇLDB numuneler ile lifsiz, normal beton numuneler arasındaki dayanım artışının ihmal edilebilecek seviyelerde olduğunu göstermişlerdir. Bunun yanında lif narinliği ve miktarı arttıkça basınç dayanımı artmış fakat esas dayanım artışı silis

dumanı kullanılarak üretilen ÇLDB numunelerinde meydana gelmiştir. Araştırmacılar artan silis dumanı miktarı ile basınç dayanımının %12~85,5 artış göstermesini, silis dumanının numunelerin bünyesindeki boşlukları doldurmasına ve böylece artan lif sıyrılma dayanımına bağlamışlardır (Köksal vd. 2008). Ding ve Kusterle (2000) ise çelik liflerin erken dayanım söz konusu olduğunda basınç deneyinde gerek çatlamadan önce gerekse de çatlamadan sonra basınç tokluğu üzerinde etkili olduğunu, nihai dayanım içinse sadece çatlak oluşuktan sonra etkili olduğunu ortaya çıkarmışlardır (Şekil 2.14).



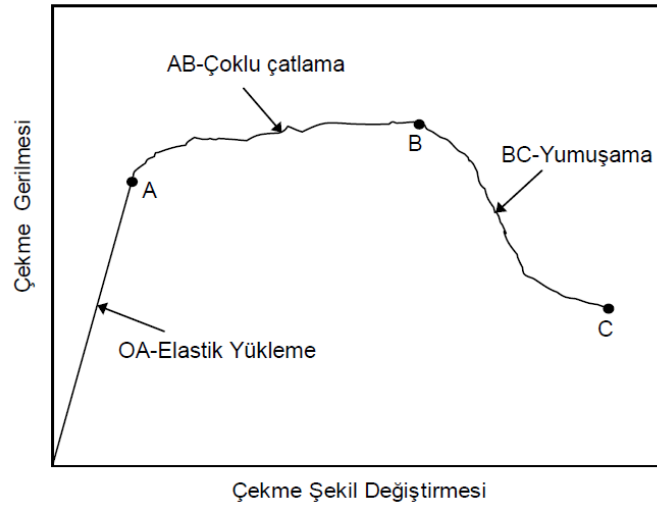
Şekil 2.14. Basınç deneyi sonucunda ÇLDB numunesinde meydana gelen çatlaklar (Ding ve Kusterle, 2000).

Hao ve Hao (2013) ise spiral şekilli çelik lifleri kullanarak basınç dayanımını arttırmayı başarmışlar ve ÇLDB numunelerin dinamik basınç davranışının normal betondan çok daha iyi olduğunu savunmuşlardır. Ayrıca çok eksenli basınç altında her zaman ÇLDB'nin dayanımı normal betonunkinden oldukça yüksek çıkmaktadır (Lu ve Hsu, 2006; Sirijaroonchai vd., 2010; Traina ve Mansour, 1991).

2.4.2.2. Çekme Dayanımı

Daha önce de bahsedildiği gibi betonda çelik lif kullanımının öncelikli sebebi, çatlak oluşumunu geciktirmesi veya çatlak yayılımını engellemesidir. Liflerin kopma ve betondan sıyrılma davranışı nedeniyle oluşan bu mekanizma sayesinde ÇLDB, direk çekme dayanımında normal betondan çok daha iyi bir performans sergiler ve malzemenin sünekliği de bu davranış sonucunda ortaya çıkar. Beton çekme dayanımına ulaştığı anda beton çatlayarak devreden çıkıp çelik lifler devreye girdiğinden, son lif betondan sıyrılan

veya çatlak genişliği lif boyunun yarısına gelene kadar malzemenin yük taşımaya devam ettiği kabul edilirse, ÇLDB'nin çekme şekil değiştirmesi ve dolayısıyla çekme tokluğu da normal betonunkine göre artmaya devam eder (Şekil 2.15) (Bentur ve Mindess, 1990; Camps vd., 2008; Lim vd., 1987; Shah ve Naaman, 1976; Yalçın, 2009).



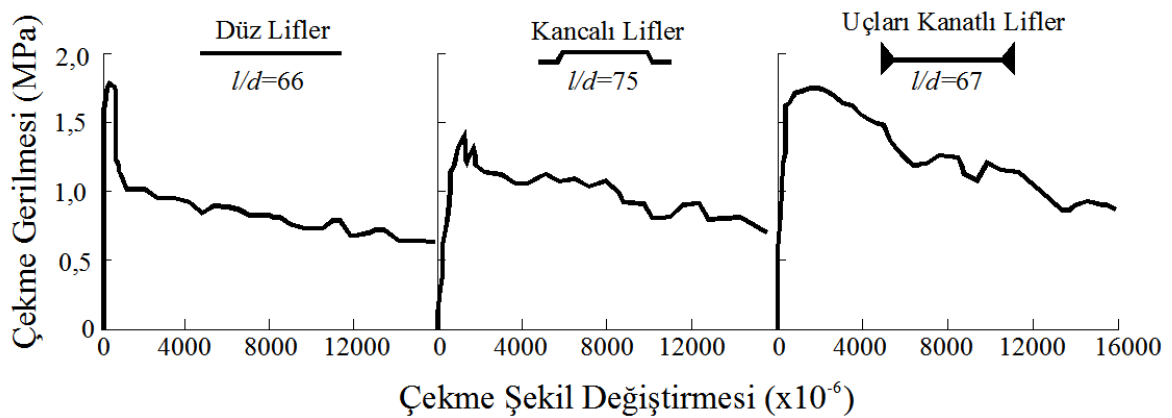
Şekil 2.15. Direk çekme deneyinde ÇLDB'nin tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Toutanji ve Bayasi, 1998; Yalçın, 2009).

Şekil 2.15'de OA arasındaki bölge ÇLDB'nin elastik davranış gösterdiği bölgedir, normal beton ile neredeyse aynı özelliktedir. A noktasından sonra beton çatlamaya başlar. Lif özelliklerine bağlı olarak eğri lineer olmayan artış gösterir. B noktasından sonra lifler sıyrılmaya ve kopmaya başlar. BC bölgesinin genişliği, lif ve çimentolu matris özelliklerine göre değişir. Görüldüğü gibi çelik lifler hem basınç hem de çekme için, sıradan ÇLDB'de çatlak öncesi değil, daha çok çatlak sonrası dayanımı iyileştirirler (Bentur ve Mindess, 1990; Camps vd., 2008; Edgington vd., 1974; Toutanji ve Bayasi, 1998; Yalçın, 2009).

Çekme dayanımı, liflerin beton içerisindeki dağılımı ve yönlenmesinden de oldukça etkilenir. Çekme gerilmeleri ile aynı yönde uzanan düz çelik lifler, %5 oranında kullanıldığında direk çekme dayanımını %133 oranında arttırabilmektedirler. Beton içerisine rastgele dağılmış çelik lifler için ise bu oran yaklaşık %60 olmaktadır (Bartos ve Duris, 1994; Bentur ve Mindess, 1990; Hughes, 1981; Shan ve Rangan, 1971). ACI 544.1R (2002)'ye göre ise %1,5 oranında beton veya harçta kullanılan çelik lifler, genel olarak direk çekme dayanımını %30~40 arttırırlar (Johnston ve Gray, 1978; Williamson,

1974). Artan lif miktarının ÇLDB'nin çekme dayanımı üzerinde olumlu etkisi vardır. Ayrıca lif narinliği ve lif şekli de ÇLDB'nin çekme dayanımını etkiler. Betondan sıyrılma sırasında, çimentolu matrise daha iyi bağlanan uzun lifler daha yüksek sıyrılma kuvvetine sahiptirler. Bundan dolayı, çekme dayanımı aynı matris özellikleri için artma eğilimi gösterir. Olivito ve Zuccarello (2010) tarafından yapılan araştırmada, çelik lif boyu veya hacimce çelik lif miktarı arttıkça süneklik ve liflerin sıyrılmaya dayanımı artmaktadır. Ek olarak, uzun liflerin genelde betondan tamamen sıyrılmadan koptuğu bilinmektedir, bu da çelik liflerin çekme dayanımlarının da ÇLDB'nin çekme dayanımı açısından önemli olduğunu gösterir (ACI 544.4R, 1999; Lee vd., 2011; Shah vd., 1978; Yalçın, 2009).

Liflerin betondan sıyrılması sırasında beton-lif ara yüzeyinde oluşan aderans çekme dayanımını etkilediğinden, betonun mekanik performansı yanında çelik lif şeklinin de önemli olduğunu vurgulamak gerekir. Bazı lifler lif-beton matris ara yüzeyindeki sıyrılma dayanımını arttırmak için eğilerek deforme edilirler. Düz lifler, kancalı veya dalgalı tip liflere göre betondan daha kolay sıyrıldığından ÇLDB'nin çekme performansını deforme edilmiş lifler kadar arttıramazlar (ACI 544.1R, 2002; Kang vd., 2012; Kim vd., 2012; Lee vd., 2011). Park vd. (2012) kullandıkları boy ve geometri açısından farklı dört tip çelik lifin çekme dayanımı üzerinde farklı etkileri olduğunu vurgulamışlardır. Kim vd. (2014) çalışmalarında aynı uzunluklara sahip kancalı uçlu çelik lifler ile bükülmüş çelik lifleri kullanmışlardır. Sonuçta tek eksenli direk çekme dayanımının bükülmüş çelik lif kullanıldığında, özellikle yüksek ince agrega oranına sahip ÇLDB'lerde daha yüksek değerlere ulaştığını vurgulamışlardır. Şekil 2.16'da hacimce %1.73 oranında üç değişik tip çelik lif içeren harçların çekme deneyi sırasında kaydedilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrileri görülmektedir (Shah vd., 1978).



Şekil 2.16. Farklı tip çelik lif içeren harçların çekmede gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Shah vd., 1978).

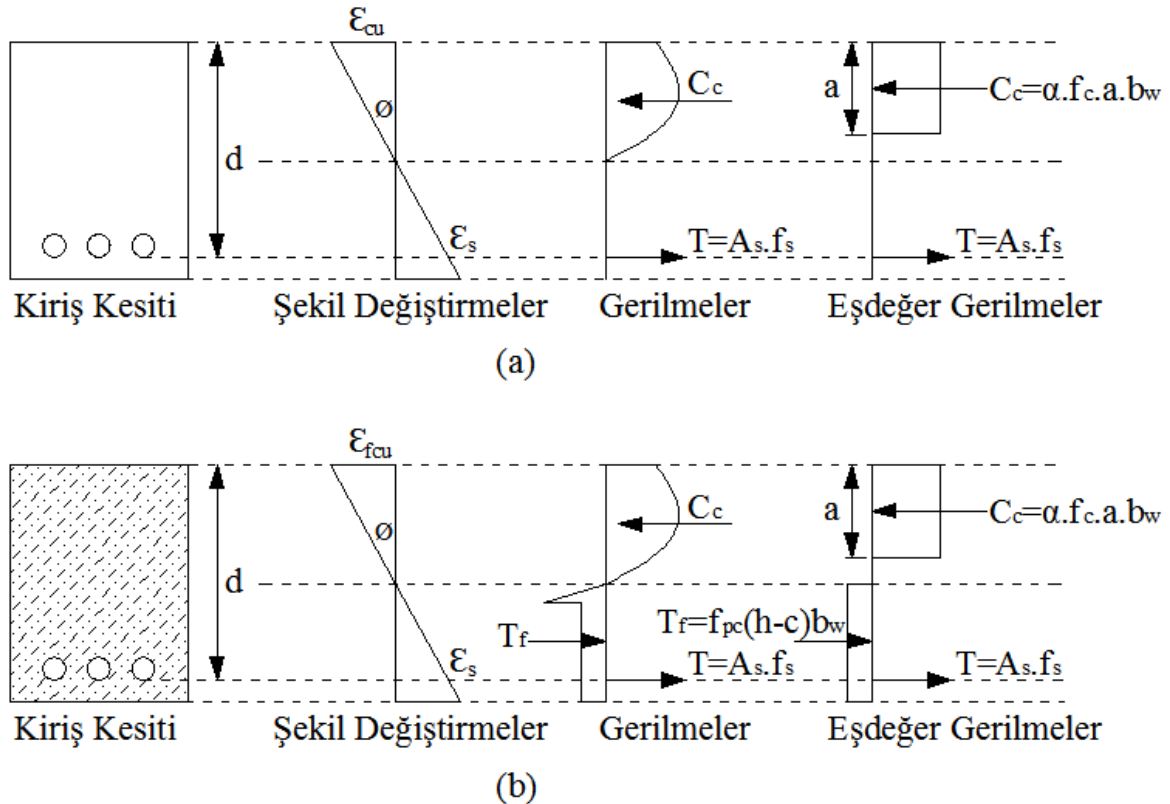
Çekme dayanımını ölçmek için literatürde farklı deney yöntemleri uygulanmaktadır. Direk çekme dayanımı deneyi hem özel cihazlar gerektirdiği hem de özel biçimli numunelere ihtiyaç duyduğundan literatürde pek fazla tercih edilmez. Çekme dayanımının belirlenmesi için literatürde en çok kullanılan deney yöntemi standart küp veya silindir numuneler ile yapılabilen yarmada çekme deneyidir. Abrishambaf vd. (2013) yaptıkları bir çalışmada tek eksenli çekme deneyi ile yarma deneyini karşılaştırmışlardır. Deneyler sonucunda elde edilen çekme dayanımlarının benzer olduğunu ve her iki deneyin çatlak sonrası davranışları ile enerji yutma kapasiteleri arasında makul bir korelasyon bulunduğunu vurgulamışlardır (Abrishambaf vd., 2013). Yarma dayanımı da tek eksenli çekme dayanımına benzer şekilde çelik lif tipi ve miktarından etkilenir. Köksal vd. (2013) çalışmalarında üç tip referans beton karışımı için üçer farklı miktarda (%0,33~1) çelik lif içeren ÇLDB numuneleri üretmişlerdir. Araştırmacılar, bu numuneler ile yapılan yarma deneyleri sonucunda, ÇLDB'lerin dayanımının yalın betonlarınkini geçtiğini görmüş ve artan çelik lif oranının bu dayanımı olumlu etkilediğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca çelik liflerin çekme dayanımının artmasının da ÇLDB'nin yarma dayanımını arttırdığı da bilinmektedir (Köksal vd., 2013; Şahin ve Köksal, 2011). Chenkui ve Guofan (1995) da artan çelik lif oranının yarma dayanımını arttırdığını ortaya koymuştur. Topçu ve Canbaz (2007) ise polipropilen lifler ile çelik liflerin mekanik özelliklere katkısını karşılaştırdığı çalışmalarında, çelik liflerin yarma dayanımını arttırmada daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur.

Çelik lifler, betonun kesme ve burulma dayanımını da genellikle arttırırlar (ACI 544.1R, 2002). Çelik lif miktarının artışından da olumlu etkilenen kesme dayanımı, liflerin narinliğinden de etkilenir. Boulekbache vd. (2012)'ye göre %0,5 çelik lif içeren beton kirişlerin direk kesme dayanımları %44 artarken, %1 çelik lif içerenlerinki %65 oranında artmıştır. Betonun basınç dayanımı gibi diğer mekanik özellikleri de iyileştiğinde, ÇLDB'nin kesme dayanımı daha yüksek değerlere ulaşır (Boulekbache vd., 2012). Kiriş numuneleri üzerinde yapılan deneylerde, enine donatı (etriye) bulundurmasa dahi ÇLDB'lerin kesme dayanımı açısından normal betondan çok daha üstün performans sergilediği belirtilmiştir (Chalioris ve Sfiri, 2011; Lim ve Oh, 1999). Betonarme kirişler ile yapılan deneylerde ise çelik lif kullanımının enine donatı oranını azaltabileceği yada sabit enine donatı oranı için kesme kapasitesini arttırabileceği de literatürde ifade etmişlerdir (Ding vd., 2011; Ding vd., 2012). ÇLDB kirişlerin burulma dayanımı üzerine gerçekleştirilen deneysel bir çalışmaya göre ise hacimce %0,6 çelik lif içeren kiriş

numunelerinin burulma dayanımı %10~60 oranında artış göstermiştir (Okay ve Engin, 2012).

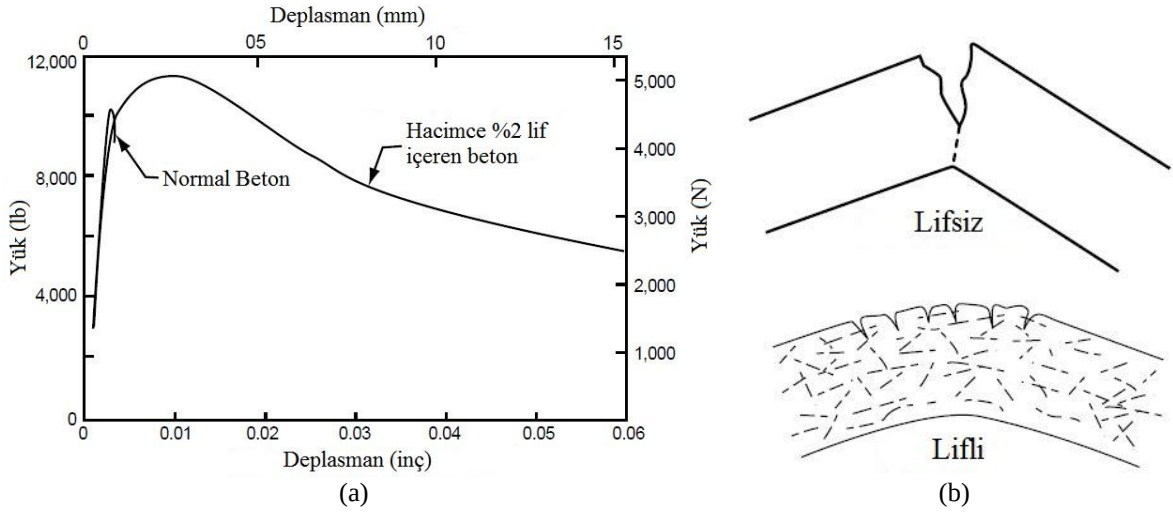
2.4.2.3. Eğilme Dayanımı

ÇLDB’de eğilme dayanımındaki artışlar, basınç ve çekme dayanımına kıyasla daha fazladır. Malzemenin çatlak kontrolü nedeniyle sünek davranması bir yana, kiriş numunesinin kesitinde oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler de ÇLDB’nin bu performansı göstermesine katkıda bulunur. Eğilme deneyi sırasında kiriş kesitinin bir tarafında çekme gerilmeleri oluşurken, diğer tarafında basınç gerilmeleri oluşur. Bundan dolayı tarafsız eksen basınç bölgesine kayma eğilimi gösterir. Sonuçta çelik lifler ile birleşen bu mekanizma ÇLDB’nin hem eğilme dayanımı hem de eğilme tokluğu açısından diğer mekanik özelliklere göre üstün performans sergilemesini sağlar (Şekil 2.17) (ACI 544.1R, 2002; Bentur ve Mindess, 1990; Hannant, 1978; Mehta ve Monteiro, 2006).



Şekil 2.17. Eğilme etkisinde kiriş kesitinde oluşan gerilme ve şekil değiştirme diyagramları, (a) normal beton için, (b) ÇLDB için (Yalçın, 2009).

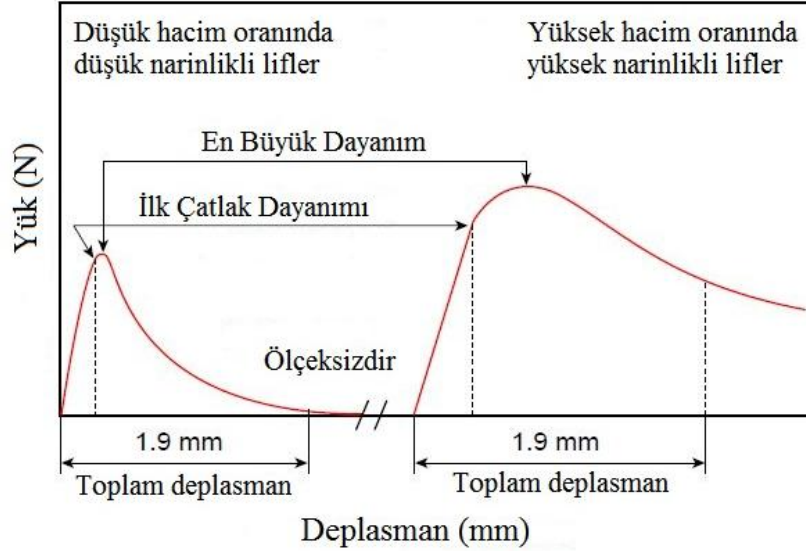
Eğilme dayanımının bu şekilde artmasının sebebi, çelik lifleri saran beton matriste ilk çatlak oluşuktan sonra çelik liflerin betona gelen yükü, lif ile beton arasındaki aderans bölgesinin çatlamasına veya lifin tamamen sıyrılmasına kadar taşıması olarak açıklanabilir.



Şekil 2.18. (a) Eğilme deneyi sırasında oluşan tipik yük-deplasman eğrileri, (b) eğilme deneyine tabi tutulan kiriş numuneleri (Mehta ve Monteiro, 2006).

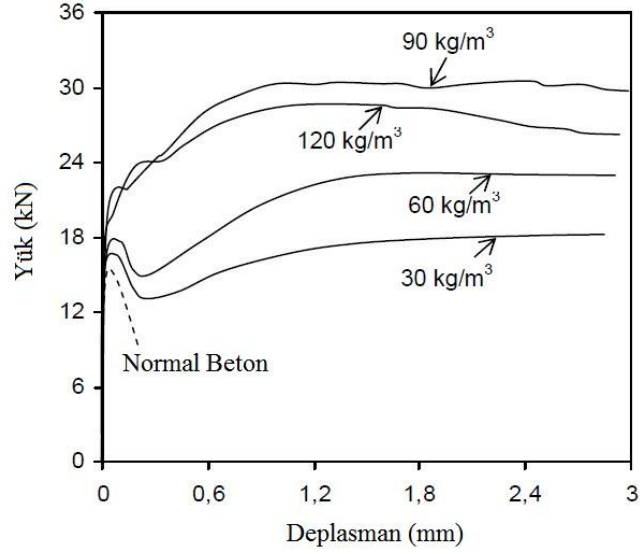
Şekil 2.18’de eğilmede meydana gelen tipik bir yük-deplasman eğrisi görülmektedir. Burada iki parametre vardır. Birincisi ilk çatlak dayanımıdır ve bu dayanım genelde eğrinin doğrusallıktan ilk ayrıldığı (betonda ilk çatlağın meydana geldiği) noktaya denk gelir. İkincisi ise maksimum yüke karşılık gelen eğilme dayanımıdır (Şekil 2.19) (ACI 544.4R, 1999; ASTM C 1018, 1997). Çelik lif katkısının genellikle ilk çatlak dayanımına katkısı az miktarda iken, maksimum yükte meydana gelen eğilme dayanımı üzerinde lif miktarına bağlı olarak olumlu etkisi vardır. Geleneksel karıştırma ve yerleştirme işlemleri ile üretilebilecek ÇLDB’nin en fazla %1,5~2 oranında çelik lif içerebileceği düşünüldüğünde, üç noktalı eğilme deneyi sonucunda ortaya çıkacak dayanım artışı normal betona kıyasla %50~70’dir (Johnston, 1974; Dixon ve Mayfield, 1971; Kar ve Pal, 1972; ACI 544.1R, 2002). Daha yüksek oranlarda ve daha uzun çelik lif kullanılması ve liflerin gerilmelere paralel uzanması durumunda bu oran %150’ye kadar arttırılabilir (Shah ve Rangan, 1971; ACI 544.1R, 2002). Narinliği düşük liflerin ($l/d < 50$) düşük miktarlarda ($V_f < \%0,5$) kullanımı ise eğilme dayanımı üzerinde etkili olmayabilir (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.4R, 1999; Soutsos vd., 2012). Khaloo ve Afshari (2005) 25 ve 35 mm boyunda çelik lifler kullanarak gerçekleştirdiği çalışmalarında da kısa liflerin eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etki yaratmadığını ancak enerji yutma kapasitesini (tokluk) arttırdığını

savunmuşlardır. Kang vd. (2001), ÇLDB'nin yerleştirilme şekillerinin lif yönelimini ve dağılımını etkilediğini ve dolayısıyla çelik liflerin beton içerisindeki dağılımlarının da eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğunu savunmuşlardır.

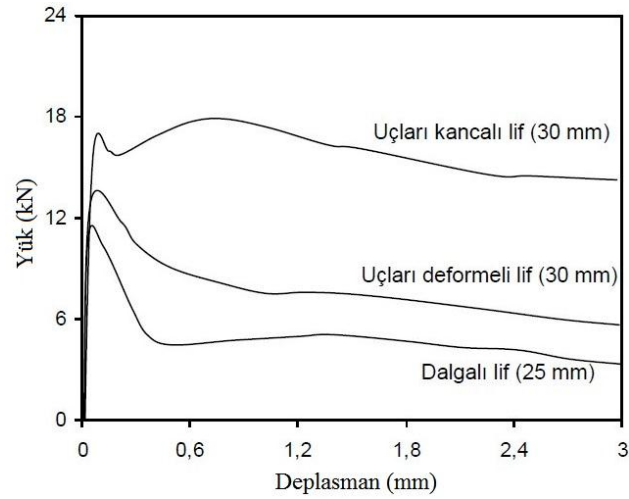


Şekil 2.19. Eğilme etkisi altındaki düşük ve yüksek miktarlarda çelik lif içeren kirişlerin ilk çatlak dayanımı ve en büyük eğilme dayanımı (Mehta ve Monteiro, 2006).

Yüksek çelik lif hacminde işlenebilirlik azalmaz ve beton yerine boşluksuz yerleşebilirse ÇLDB'nin eğilme dayanımı lif miktarı arttıkça artar (Şekil 2.19) (Kang vd., 2010; Soulioti vd., 2011). Ayrıca narinliği yüksek uzun çelik liflerin de eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkisi vardır. Kancalı uçlu ve uzun çelik lifler ise özellikle eğilme tokluğunu olumlu etkilerler. Eğilmede çekme durumu söz konusu olduğunda kancalı uçlu lifler, dalgalı ve diğer deforme edilmiş liflere göre daha üstün performans sergiler (Şekil 2.20 ve 2.21). Uçları deforme edilmiş lifler betona daha iyi tutunur (ACI 544.4R, 1999; Bentur ve Mindess, 1990; Köksal vd., 2008; Soulioti vd., 2011). Pajak ve Ponikiewski (2013) kancalı uçlu çelik liflerin düz çelik liflere göre ÇLDB'nin eğilme dayanımını daha çok arttırdığını göstermişlerdir.



Şekil 2.20. Çelik lif miktarının yük-deplasman eğrisi üzerindeki etkisi (Bentur ve Mindess, 1990; Yalçın, 2009).



Şekil 2.21. Farklı çelik lif tiplerinin yük-deplasman eğrileri üzerindeki etkisi (Balaguru ve Shah, 1992; Yalçın, 2009).

ÇLDB'nin eğilme dayanımı üzerinde etkili olan diğer parametreler ise matris özelliklerine bağlıdır. Örneğin dayanımı yüksek matrisler gevrek davranış sergileyeceğinden, sünekliğin artırılması için lif miktarının artırılması tavsiye edilir (Bentur ve Mindess, 1990). Şahin ve Köksal (2011) çalışmalarında yüksek dayanımlı liflerin farklı matris özelliklerine sahip betonlarda eğilme dayanımını arttırabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca ACI 544.4R (1999)'a göre, iri agrega oranı D_{max} ile birlikte arttığında dayanımı düşürebilir.

Betonarme kirişlerde ise çelik lifli beton kullanımı daima eğilme dayanımını, deplasman yapabilme kapasitesini ve eğilme tokluğunu artırır. Geleneksel beton kullanılarak üretilen betonarme kirişlerin normal gerilmelerden kaynaklanan büyük çatlaklar gerçekleşir. Halbuki ÇLDB kullanılarak üretilen betonarme kirişlerde sünek kırılma mevcuttur ve enine donatı bulundurmaksızın kiriş birçok küçük çatlama sonucunda taşıma gücüne ulaşır fakat tamamen göçmez, parçalar lifler sayesinde bir arada kalır. Enine donatı (ettriye) içeren ve içermeyen çelik lifli betonarme kirişlerinde oluşan çatlamlar ise benzerdir (Şekil 2.22 ve 2.23) (Abdul-Ahad ve Aziz, 1999; Chalioris, 2013; Furlan ve Bento de Hanai, 1997; Meda vd., 2012).



Şekil 2.22. Enine donatı bulunduran çelik lifli betonarme kirişler (Furlan ve Bento de Hanai, 1997).



Şekil 2.23. Enine donatı bulundurmeyen çelik lifli betonarme kirişler (Furlan ve Bento de Hanai, 1997).

2.4.2.4. Darbe Direnci ve Dinamik Yükler Altındaki Dayanımı

Patlama, çarpma ve dinamik yüklemeler altında ÇLDB'nin dayanımı, dayanıklılığı ve bu yükler altında enerji yutması geleneksel betona göre oldukça fazladır. Çeşitli lif tipleri için gerçekleştirilen deneyler sonucunda, ÇLDB'nin dinamik yüklemeler altındaki dayanımının geleneksel betonunkinin 3~10 katına ulaşabildiği görülmüştür. Normal dayanım sınıfına sahip betonlarda, ÇLDB'nin darbeleri eğilme yüklemesi altında ulaştığı pik yükün, lifsiz betonunkine göre en az %40 artış gösterdiği de bilinmektedir (Williamson, 1965; Robins ve Calderwood, 1978; Suaris ve Shah, 1984; ACI 544.4R, 1999; ACI 544.1R, 2002; Song vd., 2004). Darbe dayanımı araştırmaları genellikle, ya lif içermeyen referans betonu ile ÇLDB'nin dayanımı ya da dinamik yükleme ile statik yükleme sonuçları karşılaştırılarak yapılmaktadır (ACI 544.1R, 2002). ÇLDB'nin dinamik yükler altındaki davranışı veya darbe dayanımı lif tipine bağlı olarak değişir. Ayrıca lif geometrisine ve matris özelliklerine bağlı olarak değişen lif-matris ara yüzey özellikleri de bu davranış üzerinde oldukça etkilidir. Beton matrisin dayanımı arttıkça darbeye gösterilen direnç artar (Nataraja vd., 2005; Nia vd., 2012; Tran ve Kim, 2013). Darbe yükleri altında

çatlama ve göçmeye karşı gösterilen direnç ise genelde lif miktarı arttıkça artar (Aliabdo vd., 2013; Nataraja vd., 2005; Nili ve Afroughsabet, 2010; Wang ve Wang, 2013).

Nguyen-Minh vd. (2012) çelik lif miktarının 30'dan 60 kg/m³'e çıkartılmasının plakların zımbalama dayanımlarında lifsiz plaklarınkine göre değişim oranının %8'den %26'ya ve enerji yutma kapasitelerinde de %10'dan %40'a çıktığını belirtmişlerdir. Choi vd. (2007) zımbalama etkisindeki döşeme-kolon birleşimlerinde ÇLDB kullanımını araştırmışlar ve teorik bir model geliştirmişlerdir. Ayrıca ÇLDB'nin zımbalama kapasitesini arttırdığını savunmuşlardır.

2.4.2.5. Yorulma Dayanımı

Literatürde mevcut deneysel çalışmalar göstermiştir ki, ÇLDB'nin çekme veya eğilme yüklemesi altındaki yorulma dayanımı, geleneksel betonunkinden fazladır. Basınç yüklemesi altında ise çelik lifler, yorulma dayanımı üzerinde neredeyse etkisizdir. Çelik lif tipi ve miktarına da bağlı olarak değişen yorulma dayanımı, ÇLDB ile üretilmiş betonarme elemanlarda daha yüksektir. Belirli bir lif tipi için, lif miktarı arttıkça yorulma dayanımı da artar. Bu artışın liflerin beton içerisindeki dağılımına da bağlı olduğu bilinmektedir. Ayrıca yorulma ömrünün de artması lif dağılımı ile ilgili olarak değişir (ACI 544.1R, 2002; Cachim vd., 2002; Morris ve Garret, 1981; Naaman ve Hammoud, 1998; Parvez ve Foster, 2014).

ÇLDB'nin diğer mekanik özellikleri gibi yorulma dayanımı da lifler arasındaki matris özellikleri, yorulma çatlaklarının lifler tarafından köprülenmesi ve matris-lif ara yüzeyinde oluşan yorulma hasarına bağlı olarak değişir (Chenkui ve Guofan, 1995; Li ve Matsumoto, 1998; Zhang vd., 2001).

2.4.2.6. Aşınma Dayanımı

Deneysel çalışmalar sonucunda ÇLDB'nin aşınma dayanımının geleneksel betonunkinden farklı olmadığı anlaşılmıştır. Hidrolik yapılarında özellikle yavaş akıntının getirdiği süprüntü maddeleri etkisinde çelik liflerin aşınma dayanımına katkısı yoktur. Ancak hızlı akıntıların oluşturduğu kaviteasyon ve büyük darbelerin etkisine karşı ÇLDB'nin gösterdiği direnç fazladır. Yol kaplamaları veya tabliyeler düşünüldüğünde ise ÇLDB, trafik yükleri altında aşınma açısından etkisizdir. Laboratuvar testleri ve

uygulamaların sonuçları da bu yöndedir (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.4R, 1999; Horszczaruk, 2009; Nanni, 1988; Schrader ve Munch, 1976).

2.4.2.7. Elastisite Modülü ve Poission Oranı

Genel bir kabul olarak hacimce %2 oranından az lif içeren ÇLDB'nin elastisite modülünün ve poission oranının lifsiz yalın betonunki ile aynı olduğu söylenebilir. ÇLDB'nin elastisite modülü liflerin arasını dolduran matris özelliklerine bağlıdır (ACI 544.1R, 2002; Aslani ve Nejadi, 2013; Bentur ve Mindess, 1990; Mehta ve Montiro, 2006).

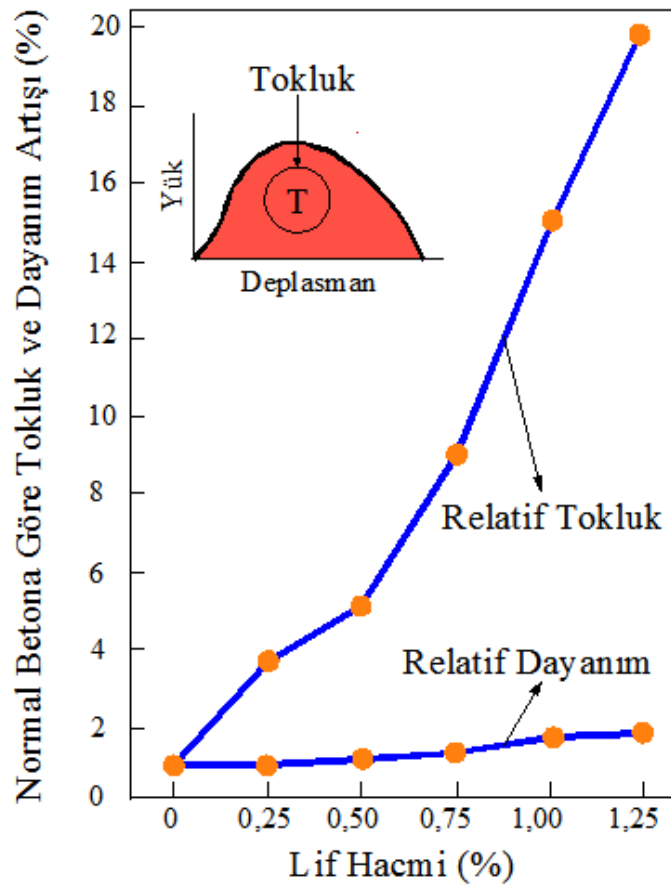
2.4.2.8. Büzülme (Rötre)

Çelik liflerin rötre çatlaklarını sınırlamakta başarılı oldukları ve büzülme hareketlerini sınırladıkları bilinmektedir. Çatlakları köprüleyerek gerilme akışını sağlayan çelik lifler kimi zaman çatlakların kapanmasına bile olanak verir. Bu özellikleri nedeniyle ÇLDB'nin rötre çatlakları, normal betonunkine kıyasla daha azdır. Plastik rötre üzerinde etkili olamayan çelik lifler, kuruma rötresinde nispeten daha etkili olabilirler. Hacimce %1 oranından daha az lif içeren ÇLDB'lerde rötre çatlaklarının sınırlandırılması ihmal edilebilse de, Atış ve Karahan (2009) %0,25; 0,50; 1 ve 1,5 oranında kullanılan çelik liflerin betonun 210 günlük kuruma rötresini sırasıyla %10, 21, 25 ve 26 oranlarında azalttığını ortaya koymuşlardır. Mangat ve Azari (1998) tarafından %1 çelik lifli betonun kuruma rötresi %15~20 oranında azaltılabilmektedir (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.5R, 2010; Kayali vd., 1999; Yalçın, 2009). ACI 544.1R (2002), rötre çatlaklarının engellenmesi hususunda betonda rasgele dağılmış kısa çelik lifleri önermektedir. Bunlara ek olarak geleneksel betonda olduğu gibi ÇLDB'de rötre, lif parametrelerine bağlı olduğu kadar beton matrisin özelliklerine de bağlıdır (ACI 544.1R, 2002).

2.4.2.9. Tokluk

Basınç, çekme veya eğilme yükleri altında dayanımı önemli ölçüde arttırmasa bile çelik lifler bu yüklerin altında tokluğu arttırırlar. Tokluk bir malzemenin yük altında enerji yutma özelliğinin ölçüsüdür ve yük-deplasman veya gerilme-şekil değiştirme grafiğinin

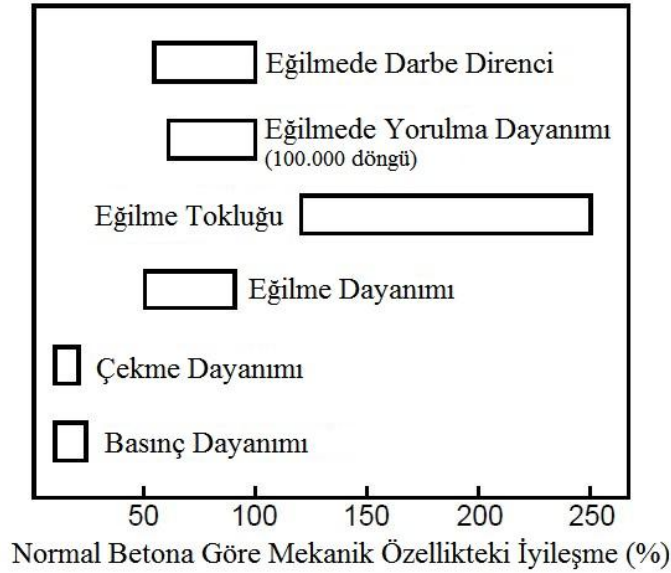
altında kalan alan olarak hesaplanır (Şekil 2.24). Normal beton, gevrek bir malzeme olduğundan ilk çatlaktan sonra aniden göçer ve bu sebeple tokluğu sıfıra yakındır. ÇLDB, çatlamadan sonra hemen göçmez ve lifler sayesinde yük taşımaya devam eder. Bu sebeple normal betonun aksine gevrek olarak değil sünek olarak kırılırlar. Normal betonun ise sünek olarak göçebilmesi için boyuna ve enine donatılar ile takviye edilmesi gerekir. Fakat normal beton çelik donatılar ile eğilme ve kayma kapasitesi kazanırken, ÇLDB tokluk, darbe dayanımı ve çatlamaya karşı direnç kazanır (ACI 544.1R, 2002; Gopalaratnam ve Gettu, 1995; Mehta ve Monteiro, 2006; Nataraja vd., 1999; Nataraja vd., 2000; Yalçın, 2009).



Şekil 2.24. Tokluk yük-deplasman eğrisinin altında kalan alandır ve ÇLDB'nin en önemli özelliğidir (Shah ve Rangan, 1971; Mehta ve Monteiro, 2006).

Bütün bu tokluk mekanizmalarının içinde ve hatta bütün mekanik özelliklerin içinde çelik liflerin yalın betona göre arttırdığı en önemli özellik eğilme tokluğudur. Şekil 2.25'de ÇLDB'nin geleneksel betona göre artan özellikleri ve artış oranları görülmektedir. Burada

da görüldüğü gibi en fazla artan mekanik özellik eğilme tokluğudur (ACI 544.1R, 2002; Gopalaratnam ve Gettu, 1995; Mehta ve Monteiro, 2006; Yalçın, 2009).



Şekil 2.25. ÇLDB'nin mekanik özellikleri arasında normal betona göre en çok artış gösteren özelliği eğilme tokluğudur (Mehta ve Monteiro, 2006).

Literatürde genelde tercih edilen tokluk hesabı eğilme altında elde edilen yük-deplasman eğrisinin altında kalan alandır. Bu grafiğe göre ilk çatlak oluşumuna kadar lifler etki gösteremeseler bile, çatlama gerçekleştikten sonra lifler devreye girer ve çatlağı köprüleyerek açılmayı önlerler. Artan yük ile lifler betondan sıyrılmaya başlar ve bu sırada enerji yutulmasına sebep olurlar. Lif matris etkileşimine, lif tipine ve matris özelliklerine bağlı olarak değişen bu sıyrılma davranışı sünekliğin ve tokluğun ortaya çıkma sebebidir. Genelde lif miktarı ve lif boyu ile narinliği arttıkça tokluk artar (Soulioti vd., 2011; Wang ve Wang, 2013). Karma lifli betonlarda ise farklı lif bileşimleri farklı boyutlardaki çatlakları sınırladığından tokluğu daha olumlu etkileyebilirler (Banthia ve Sappakittipakorn, 2007; Mehta ve Monteiro, 2006). Lifleri saran beton matrisin dayanımının artması yeterince lif kullanılmış ise tokluğu artırır (Altun vd., 2007; Kurihara vd., 2000).

Lif tipi daha çok çatlak oluşuktan sonraki aşamada etkili bir parametredir. Düz liflere nazaran kancalı uçlu veya bükülmüş lifler daha yüksek sıyrılma direnci gösterdiğinden ÇLDB'nin tokluğunu ve deplasman yapabilme kapasitesini daha çok artırırlar. Hatta

deforme edilmiş lifler düz liflere göre maksimum yükü bile arttırabilirler. Bu özelliklerin hepsinin çatlakları sınırlandıran liflerin yönelmesi ve dağılımı ile alakalı olduğu da unutulmamalıdır (Ferrara vd., 2008; Kim vd., 2008; Özyurt vd., 2007; Soulioti vd., 2011; Soutsos vd., 2012; Pajak ve Ponikiewski, 2013). Choi ve Lee (2003) halka şekilli çelik lifler ile kancalı uçlu çelik lifleri karşılaştırmışlar ve halka şekilli çelik liflerin tokluğu daha fazla arttırdığını kanıtlamışlardır. Xu vd. (2012) de sipiral şekilli liflerin enerji yutma kapasitelerini araştırmışlardır. Böylece spiral çelik lifin üç boyutlu etkisini incelemişleridir. Ayrıca D_{max} ve iri agrega oranının diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi tokluk üzerinde de etkisi vardır (Chenkui ve Guofan, 1995).

2.4.3. Durabilite

Geleneksel beton bünyesinde barındırdığı mikro çatlaklar nedeniyle geçirimlidir ve bu sebeple durabilitesi olumsuz etkilenebilir. Mikro çatlakları sınırlandırılmış olan ÇLDB ise geleneksel betona göre daha geçirimsiz bir yapıya sahiptir. Bu özelliği ÇLDB'nin üstün durabilite özelliklerine sahip olmasını sağlar. Örneğin ÇLDB, sülfat ataklarına karşı daha dayanıklıdır (Miao vd., 2002).

Yüksek sıcaklık etkisi ile geleneksel yalın beton dayanım kaybı gösterir ve sonunda bütünlüğünü yitirerek dağılır. Geleneksel beton 427°C'de basınç dayanımının %50'sini kaybeder ve 927°C'de ise dayanımının %90'ını kaybederek dağılır. Çelik lifler betonun yüksek sıcaklıkta göçmesini engelleyemese de dağılmanın gerçekleşeceği eşik sıcaklığı yükseltir ve betonun göçme süresini uzatır. Yangın gibi felaketlerde zaman kazandırılmasını sağlar (ACI 544.5R, 2010; Sideris vd., 2009). Fakat yapısal uygulamalar için çelik lif katkısı ile beton donatısının azaltılması yangın dayanımı açısından iyi bir çözüm değildir (Rodrigues vd., 2010; Yan vd., 2013). Lau ve Anson (2006)'a göre %1 çelik lif içeren betonun mekanik performansı yüksek sıcaklık etkisinde normal betonunkinden iyidir.

Pigeon ve Cantin (1998) düşük sıcaklık etkisinde ÇLDB'nin performansını deneysel olarak araştırmışlar ve sıcaklık düştükçe (özellikle -30°C'de) tokluğun arttığını tespit etmişlerdir.

Donma çözünme etkisindeki ÇLDB elemanlarını daha durabil yapmak için literatürde bilinen bütün yöntemlerden yararlanılabilir (hava sürüklemeye vs.). ÇLDB'nin boşluk oranı karakteristikleri yalın betonunki ile benzerdir (Balaguru ve Ramakrishnan, 1988; Balaguru

ve Ramakrishnan, 1986; ACI 544.1R, 2002). Atış ve Karahan (2009) donma-çözünmeye karşı dayanıklılığın çelik lifler tarafından az da olsa arttırıldığını söylemişlerdir. Niu vd. (2013) donma-çözünme döngüsünde gittikçe kötüleşen mekanik özelliklerin çelik lifler tarafından geciktirilebileceğini belirtmişlerdir.

ÇLDB'nin durabilitesi geleneksel betonunkinden farklı olarak çelik liflerin korozyonuyla da ilgilidir. Çelik liflerin klor iyonları etkisi ile korozyona uğraması olayı ÇLDB için özellikle de çatlamış ÇLDB için problemdir. Fakat çatlamamış ÇLDB'de liflerin korozyona uğraması sınırlıdır. Yapılan deneyler ancak yüzeysel liflerin (yüzeyden 2,5 mm derinliğe kadar) korozyona uğradığı, daha derin liflere korozyonun ulaşmadığı görülmüştür (Schupack, 1986; ACI 544.1R, 2002). Bunun sebebi çelik liflerin kısa ve süreksiz oluşu ve beton içerisinde birbirlerine temas etmemeleridir (ACI 544.1R, 2002). Çatlamış kesitte ise korozyonun sadece çatlak üzerinde bulunan liflerde meydana geldiğini göstermiştir. Eğer çatlak genişliği 0,1 mm'den daha büyük değil ise lif korozyonu problem olmazken, 0,1 mm genişlikten daha büyük çatlaklarda da korozyon ancak belirli bir derinliğe ulaşabilmektedir. Çelik lif korozyonunun problem olacağı yapılarda paslanmaz çelik lifler veya yüzeyi kaplanmış çelik lifler tercih edilebilir (Hoff, 1987; Morse ve Williamson, 1977; ACI 544.1R, 2002). Bunlara ek olarak mikro boyutlu çelik liflerin alkali-silika reaksiyonu sonucundaki genleşmeyi de azalttığı bilinmektedir (Turanlı vd., 2001).

3. ÇELİK LİF DONATILI BETON TASARIMI

Kompozit bir malzeme olarak ÇLDB'yi anlamak için öncelikle lifli betonlarda çatlak oluşumu ve yayılmasını incelemek gerekir. Çünkü ÇLDB kompozitinin neredeyse bütün iyi özellikleri bu mekanizma sayesinde meydana gelir. Tipik olarak ÇLDB, çelik lifler ve bunların arasını dolduran matris (beton) gibi iki ayrı fazdan meydana gelir. Bu bölümde ÇLDB bu iki fazda ayrı ayrı incelenmiş ve literatürde bu alanda yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

3.1. Çelik Lif Donatılı Betonların Performansına Etki Eden Faktörler

ÇLDB kompozitinin mekanik özellikleri ve performansı aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Çelik lif özellikleri (tip, geometri, narinlik, miktar, yönelme ve yayılma),
- Beton özellikleri (dayanım, agrega özellikleri),
- Beton-lif ara yüzeyindeki etkileşim.

Bu tezin 2. bölümünde açıklanan mekanik ve taze özellikleri ile ÇLDB, geleneksel betondan farklı davranışlar sergiler. Çelik liflerin çatlak tutma özelliğinden dolayı ortaya çıkan bu mekanik performans, hem çelik lif özelliklerinden hem de beton matrisin dayanım, dozaj, elastisite modülü gibi özelliklerinden de etkilenir. Bütün bunların dışında ÇLDB'nin performansı kullanılan numunenin boyut, geometri ve üretilme metoduna bağlı olarak da değişir (ACI 544.1R, 2002; Bentur ve Mindess, 1990).

3.1.1. Matris

Temel bileşenleri çimento, agrega ve su olduğundan, genelde ÇLDB'nin matris ile ilgili özellikleri geleneksel betonunki ile aynı gelişir. Artan çimento dozajı ve azalan su/çimento oranı dayanımı artırır. Çelik lifleri çevreleyen beton matrisin artan dayanımı ise ÇLDB'nin dayanım özelliklerini arttırsa da dayanımı artan beton gevreklediğinden tokluk özelliklerinde bir miktar azalma gözlemlenebilir. Ayrıca silis dumanı kullanımı da gevrekliği arttırdığından yük-deplasman eğrisinde çatlak sonrası kısmında nispeten düşüş yaşanabilir. Bu durumda işlenebilirliği uygun seviyelerde tutarak lif miktarının artırılması önerilir. Bu

sebeptir ki yüksek performanslı betonda yüksek dayanımlı liflerin kullanılması önerilir (Bentur ve Mindess, 1990; Tran ve Kim, 2013; Yalçın, 2009). Literatürde yapılan çalışmalarda ise genelde betonun dayanımının artırılması ÇLDB'nin bütün mekanik özelliklerini olumlu etkilemiştir (Altun vd., 2007; Köksal vd., 2008; Khaloo ve Afshari, 2005; Nataraja vd., 2005). Üretim tekniklerinden de etkilenen ÇLDB, geleneksel betonda olduğu gibi kür koşullarına göre dayanım artışı gösterebilir (Toutanji ve Bayasi, 1998).

Betonun performansını etkileyen bir diğer parametre de betonun %75'ini oluşturan agreganın özellikleridir. Granüloometri, incelik modülü (k) ve D_{max} gibi parametrelerden fiziksel ve kimyasal özelliklerine kadar agregalar geleneksel betonda olduğu gibi ÇLDB'nin de performansını etkiler. Granülometrisi iyi ayarlanmış agrega, betonun hem işlenebilirlik hem de mekanik özelliklerini iyileştirebilir (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.3R, 1998; Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991). Beton performansı üzerinde en büyük etkiye sahip olan su/çimento oranı veya çimento dozajı literatürde sıkça araştırılırken, Meddah vd. (2010)'ne göre agreganın tipi, oranı, fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşan birkaç çalışma olmasına rağmen, betonda granüloometri ve D_{max} ile ilgili çalışmalara ise gereken önem verilememiştir (Meddah vd., 2010; Mehta ve Monteiro, 2006). ÇLDB ile ilgili bu alanda yapılan çalışmalar ise daha sınırlıdır. ÇLDB'nin tasarımı üzerinde çalışan Dvorkin vd. (2011)'ne göre ÇLDB'nin optimizasyonu, iri ve ince agrega oranları en iyi işlenebilirlik özelliklerine göre göz önüne alınarak yapılabilir.

Daha önce ACI tarafından tavsiye edilen agrega granülometrilerinden (Tablo 2.1) ve D_{max} 'ın 10~38 mm olarak tavsiye edildiğinden bahsedilmiştir. Ayrıca toplam iri agrega miktarının bütün agrega kompozisyonunun %55'ini geçmemesi ve ince malzeme ile çimento harcı hacminin artırılmasının da ÇLDB için önerildiğini biliyoruz. Ek olarak her ne kadar dayanım üzerinde olumlu etkisi olsa da D_{max} 'ın daima çelik lif boyundan az olması, liflerin betona daha iyi tutunması ve ÇLDB'nin mekanik performansı için gereklidir. Literatürde lif boyunun D_{max} 'ın 2~4 katı kadar seçilmesi de tavsiye edilmiştir (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.3R, 1998; Chenkui ve Guofan, 1995; Grünwald, 2004; Johnston, 1996; Vandewalle, 1993). ÇLDB'de iri agrega miktarının azaltılması ve ince agrega miktarının artırılması (hatta toz miktarının artırılması) ÇLDB'de boşluk oranını azaltarak çelik liflerin sıyrılmaya karşı direncini artırır, bu sayede mekanik performans artar (Eren ve Marar, 2009; Igarashi vd., 1996; Kang vd., 2013; Kim vd., 2012; Yang vd., 2009).

3.1.2. Çelik Lifler

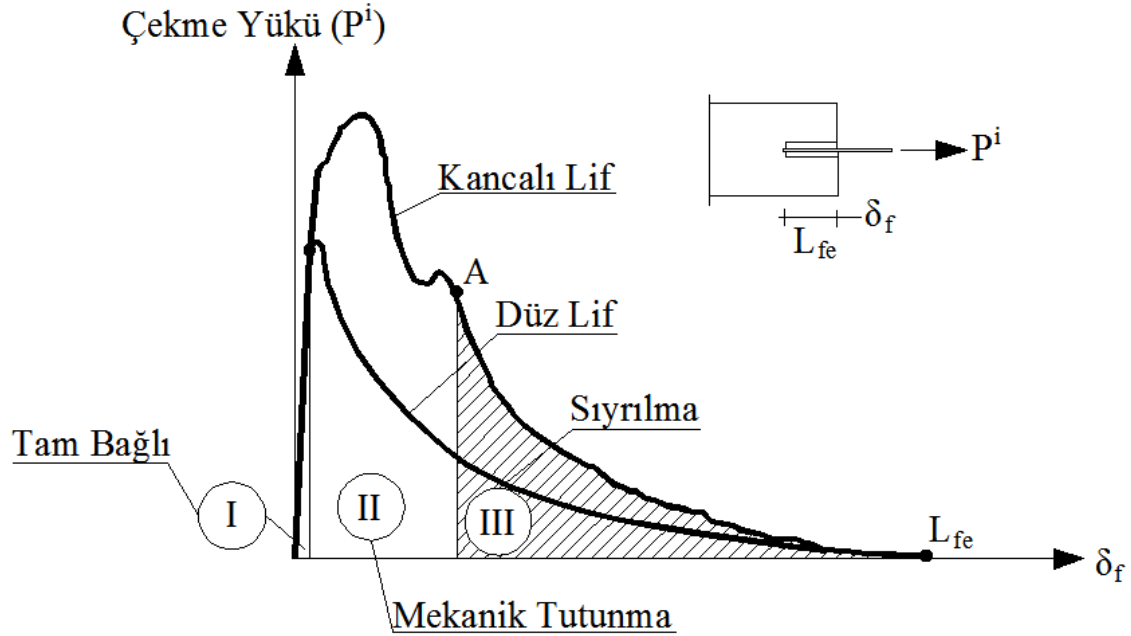
Çelik lifler yük altında beton çatlamadan önce, beton matrisindeki kılcal çatlakların meydana gelmesini önlemektedir. Çelik lifli betonun, taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıma özelliği vardır. Beton matris çatlayarak devreden çıktığında yük çelik lifler üzerinden betona aktarılır (çatlak köprüleme), bu sırada beton ile lif arasında oluşan aderans kuvveti ise süneklik ve tokluk bakımından önemlidir. ÇLDB’de göçmeden sonra çatlamlar, dökülme, parçalanma ve dağılmalar geleneksel betona göre daha az olmaktadır (Yalçın, 2009). Özellikle basınç yüklemesi altında çelik lifler dayanımı etkileyemeseler de malzemenin göçme şeklini gevrekten süneğe çevirirler. Üstelik taşıma gücüne ulaşılsa bile çelik liflerin çatlakları köprüleme özelliği sayesinde birden bire sıfıra inmez, malzeme birden bire kırılmaz ve test sonuna kadar bütünlüğünü korur (Olivito ve Zuccarello, 2010).

ÇLDB içeriğindeki lif miktarına göre sınıflandırılabilir. Lif tipinde olduğu gibi lif miktarına da yapının maruz kalacağı etkiler düşünülerek karar verilebilir. Mehta ve Monteiro (2006) tarafından yapılan lif miktarı sınıflandırması aşağıdaki gibidir.

- Düşük hacim miktarı ($V_f < \%1$), plak ve kaplamalarda kullanılan lif miktarıdır. Genelde rötre çatlaklarının önlenmesi amacıyla kullanılır.
- Ortalama hacim miktarı ($\%1 < V_f < \%2$), tokluk ve darbeye karşı direncin artırıldığı lif miktarıdır. Püskürtme yöntemi ile kullanılabilir. Enerji sönümü, pullanma ve yorulmaya karşı dayanımın artırılması gereken yapılarda tercih edilir.
- Yüksek hacim miktarı ($\%2 < V_f$), pekleşmeye riski olan yapılarda kullanılır. Bu oranın üstünde zayıf lif dağılımı riski vardır, özel üretim tekniklerine ihtiyaç duyulabilir (Yalçın, 2009). Bu miktar genelde yüksek performanslı betonlar ile kullanılır ve Yüksek Performanslı Lifli Beton olarak anılırlar.

Bu tezin 2. bölümünde bahsedildiği gibi, çelik lif dağılımı düzgün sağlandığında, lif miktarı, lif boyu ve narinliği arttıkça ÇLDB’nin mekanik özelliklerinin hemen hepsi artmaktadır. Çelik lifler normal dayanımlı betonda çatlamadan sonra devreye girerler ve ÇLDB’nin mekanik performansı da burada ortaya çıkar. Buradaki kompozit davranış liflerin sıyrılma dayanımları ile doğrudan bağlantılıdır. Liflerin çatlak üzerindeki yönelimi ve dağılımı da bu performansı etkiler. Çatlağa dik biçimde çekme gerilmelerine paralel ne kadar çok lif çatlakta köprülenirse mekanik özellikler de o derece artar. Ayrıca deforme edilmiş lifler de sıyrılmaya karşı direnci arttırdıklarından hem çekme dayanımını hem de

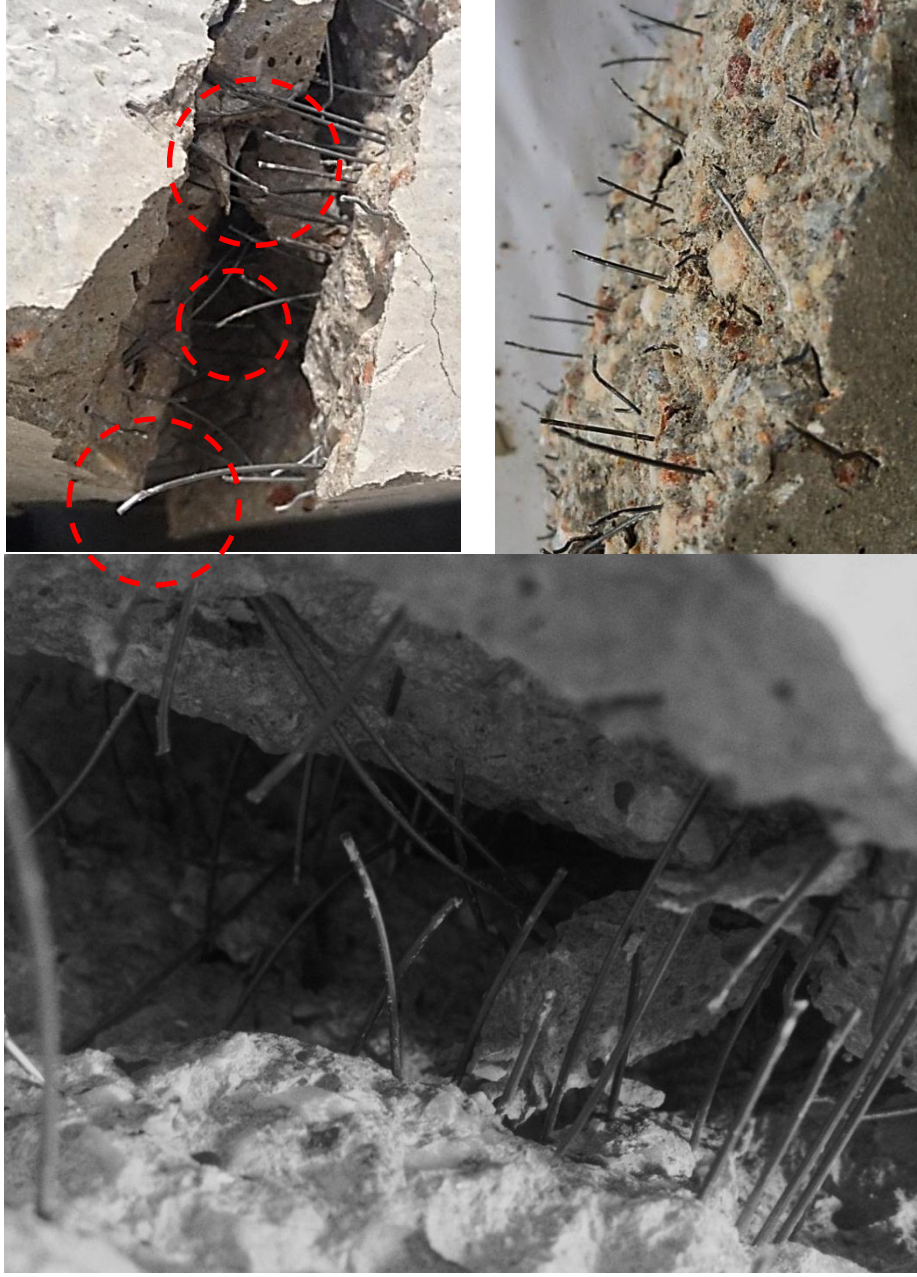
tokluğu arttırırlar (Şekil 3.1) (Alwan vd., 1999; Grünewald, 2004; Kang vd., 2013; Soulioti vd., 2011).



Şekil 3.1. Düz ve kancalı tip lifler için sıyrılma performansı (Alwan vd., 1999; Grünewald, 2004).

Kancalı uçlu lifler hem sıyrılma kuvvetini arttırırlar. Başka bir deyişle kancalı uçlu liflerin betondan sıyrılması için daha büyük kuvvet gerekir. Çünkü düz lifler beton içinden direk sıyrılırken, kancalı uçlara sahip lifler betondan sıyrılmadan önce kanca kısımları eğilerek düzleşir. Bu düzleşme için fazladan kuvvet gerekir ki bu da ÇLDB'nin çekme dayanımının artması demektir. Maksimum sıyrılma kuvvetini neredeyse %50 arttıran bu mekanizma, bu esnada daha fazla enerji yutulmasını da sağladığından tokluk artar (Grünewald, 2004).

Şekil 3.2'de bu tez çalışması sırasında yapılan eğilme deneyleri sonucunda beton içerisinde sıyrılarak çıkmış kancalı uçlu lifler görülmektedir. Kang vd., (2013) çalışmalarında ince agrega miktarı arttıkça liflerin sıyrılma dayanımının arttığını ve bu durumda dalgalı tip liflerin düz liflerden daha iyi sıyrılma direnci gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca lifli beton içerisinde betonarme donatısının sıyrılma testlerinde de ÇLDB'nin donatının sıyrılmasını oldukça zorlaştırdığı hatta çelik lif miktarı ve lif uzunluğu ile narinliği arttığında sıyrılmaya karşı direncin arttığı ortaya konulmuştur (Gesoglu vd., 2013; Güneyisi vd., 2013; Söylev, 2011).



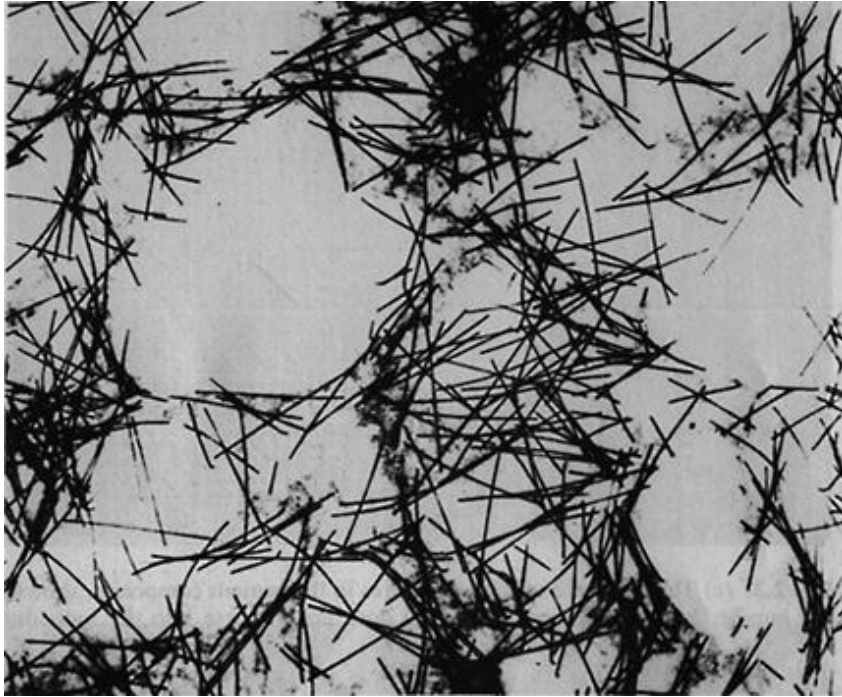
Şekil 3.2. Betondan düzleşerek sıyrılan kancalı uçlu lifler

3.2. ÇLDB’de Çatlak Gelişimi ve Yayılması

ÇLDB’nin performansını ve kazandığı süneklik mekanizmasını anlayabilmek için bu malzemede meydana gelen çatlak ilerleme biçimini ve çelik liflerin çatlak köprüleme özelliğini anlamak gerekir.

3.2.1. Matris

Beton düşük çekme dayanımına ve düşük çekme birim deformasyon kapasitesine sahip gevrek bir malzemedir. Bu gevrekliği sağlayan betonun yapısındaki sayısız mikro çatlaktır (Taşdemir vd., 1996). Ayrışma, genleşme ve termal etkiler sebebiyle betonda oluşan bu mikro çatlaklar beton içinde dağılmış haldedir ve genelde agrega-çimentolu matris ara yüzeyinde toplanmışlardır. Mikro çatlakların daha çok bu bölgede toplanmasının esas sebebi, çimentolu matris ile agregaların rijitlik farkıdır (Löfgren, 2005). Beton içerisindeki elastisite modülü en yüksek malzeme agregadır (Alyamaç, 2008). Bu rijitlik farkı agrega ve çimentolu matris ara yüzeyini zayıf bir bölge haline getirir. Burada oluşan mikro çatlaklar gerilmelerin etkisi ile büyür ve yayılır. Çimentolu malzemeler bu ani çatlak büyümesi sonucunda birden gevrek biçimde geçer. Çelik liflerin eklenmesi ile bu çatlakların ilerlemesi veya yayılması durdurulur. Bu sayede lifleri saran beton matraste çatlak oluşup genişlese bile kompozitte gerilme transferi lifler üzerinden devam eder. Bu şekilde süneklik kazanan malzemenin tokluğu artar. Bu noktada asıl vurgulanması gereken husus, çelik liflerin betona takviye edilmesindeki birincil amaç mekanik özellikleri arttırmak değil betonda çatlak oluşumunu geciktirmek veya çatlak yayılımını önlemektir (Bentur ve Mindess, 1990; Yardımcı, 2007).

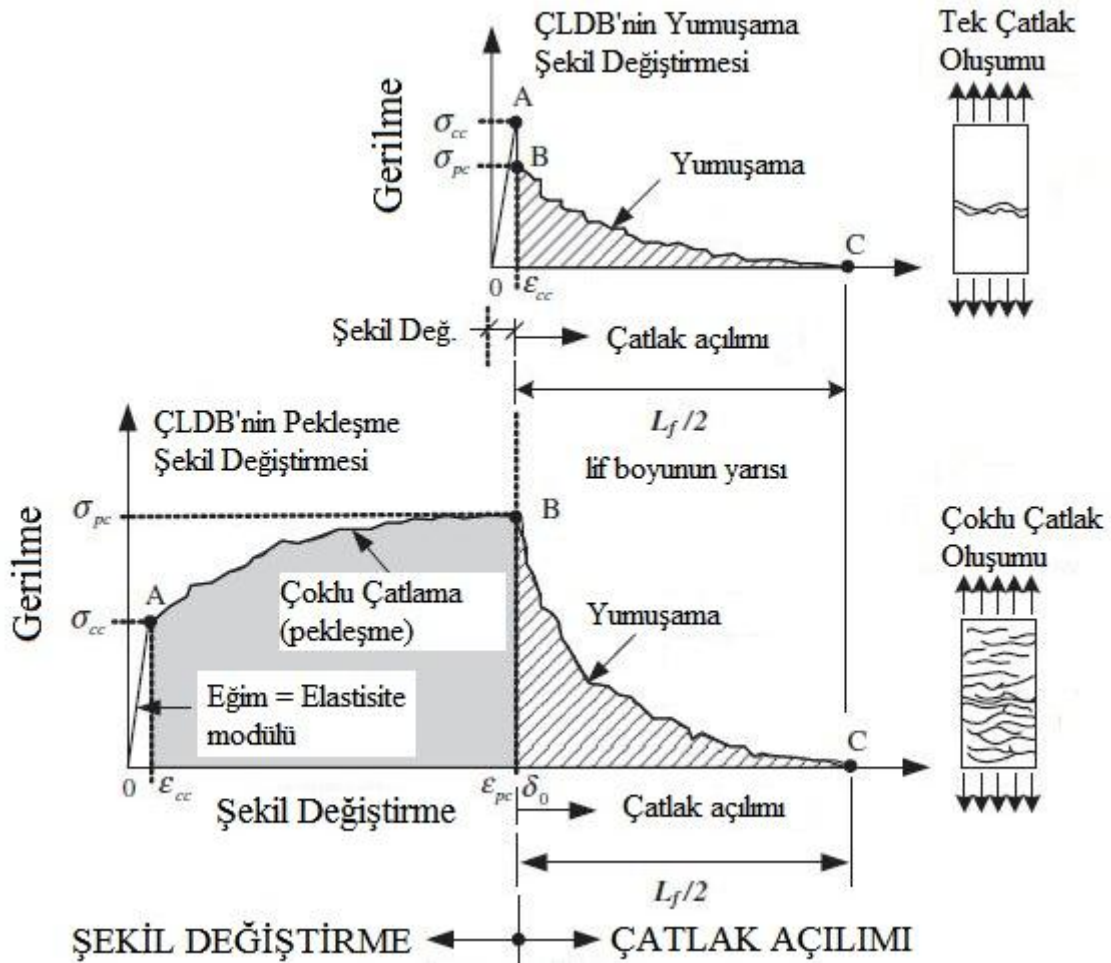


Şekil 3.3. Betonda agregaların arasına dağılmış Çelik lifler (Stroeven ve Shah, 1978).

Çimentolu kompozitler (çimento+su+agrega) neredeyse hiç çekme yükü taşımadığından ve bu malzemenin basınç dayanımı çekme dayanımından kat kat fazla olduğundan, çatlak oluşumu çekme gerilmeleri sonucunda oluşur. Beton matris çatladıktan sonra lifler devreye girer ve çatlakları köprüleyerek çekme gerilmelerini karşılar. Çelik lifli çimentolu kompozitlerde lifler, agregalar ve çimentolu matris dışında boşluklar da bulunur. Şekil 3.3’de beton içerisinde çelik liflerin dağılımı görülmektedir.

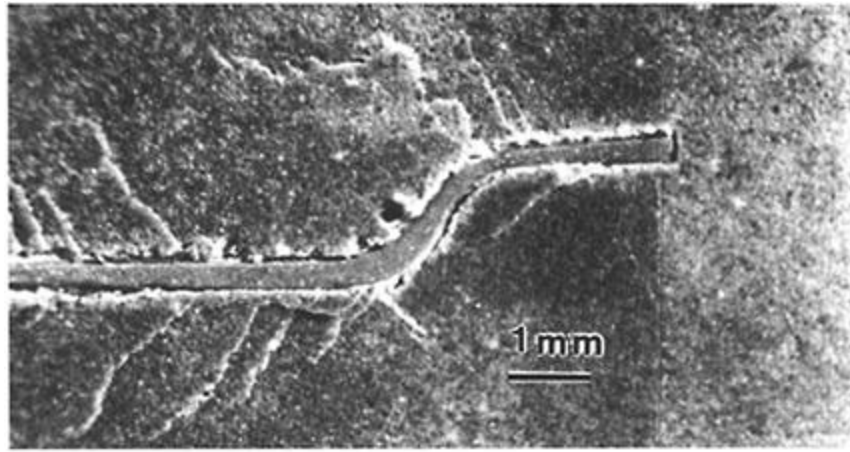
3.2.2. Çelik Lifler

Daha önce de belirtildiği gibi lifler genellikle beton matris çatladıktan sonra devreye girer (Şekil 3.4’de A noktasından sonra). Çelik liflerin sıyrılma özelliklerine bağlı olarak ÇLDB’nin çatlama biçimleri farklı olabilir (Park vd., 2012).

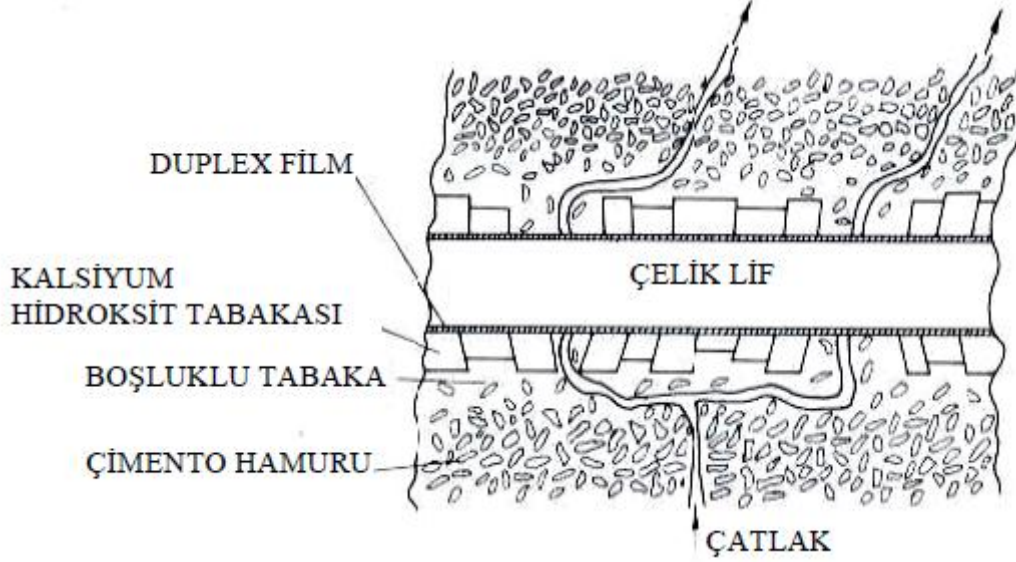


Şekil 3.4. ÇLDB'nin çatlak oluşumuna göre gerilme-şekil değiştirme diyagramları (Park vd., 2012).

Liflerin çatlak sonrası performansını, lif özelliklerine olduğu kadar, beton matrisin performansı ve lif-matris aderansına da bağlamak mümkündür. Bilindiği gibi beton içerisindeki agregaların yüzeyini saran bir geçiş bölgesi vardır. Benzer şekilde çelik liflerin de etrafı kalsiyum hidroksit bakımından zengin ve boşluklu yapıda bir geçiş tabakası ile çevrilmiş haldedir (Şekil 3.5) (Bentur vd., 1985a; Bentur vd., 1985b; Bentur ve Mindess, 1990; Yardımcı, 2007).



(a)



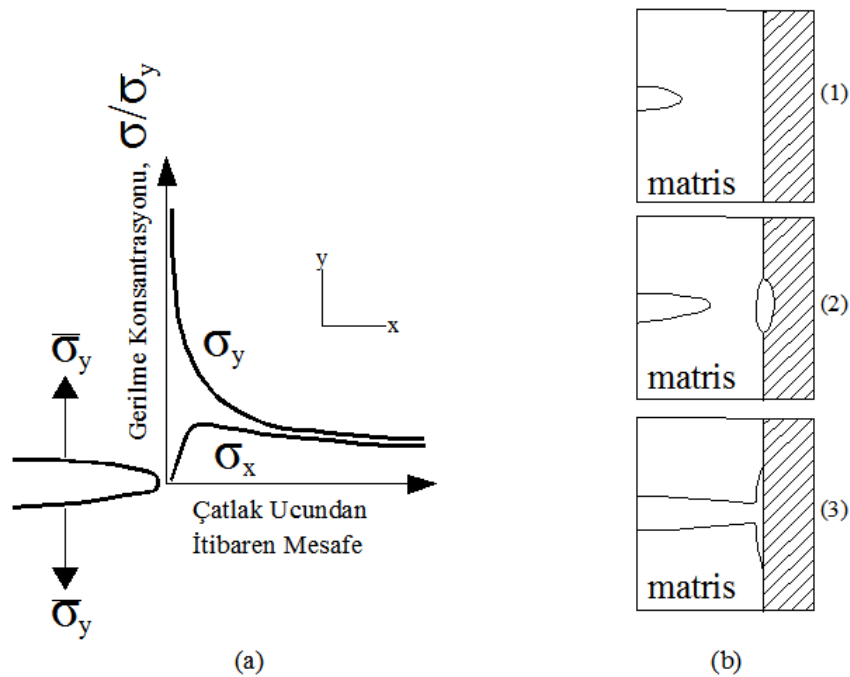
(b)

Şekil 3.5. Lif-Matris ara yüzeyinin ve çatlakların yapısı (a) Kancalı uçlu lifin SEM fotoğrafı, (b) Sem fotoğrafına göre şematik gösterim (Bentur vd., 1985a; Bentur vd., 1985b; Bentur ve Mindess, 1990; Yardımcı, 2007).

Lif-matris ara yüzeyindeki süreklilik oldukça önemlidir. Betonda artan boşluk oranı veya hidrasyon sonucu oluşan artık ürünlerin lifler etrafında toplanması, lifin betondan

sıyrılma performansını etkiler. Bu bölgedeki sürekliliğin artırılması için silis dumanı gibi toz malzemelerin kullanımı fayda sağlayacaktır (Bentur ve Mindess, 1990; Eren ve Marar, 2009; Kayali, 1999; Yardımcı, 2007).

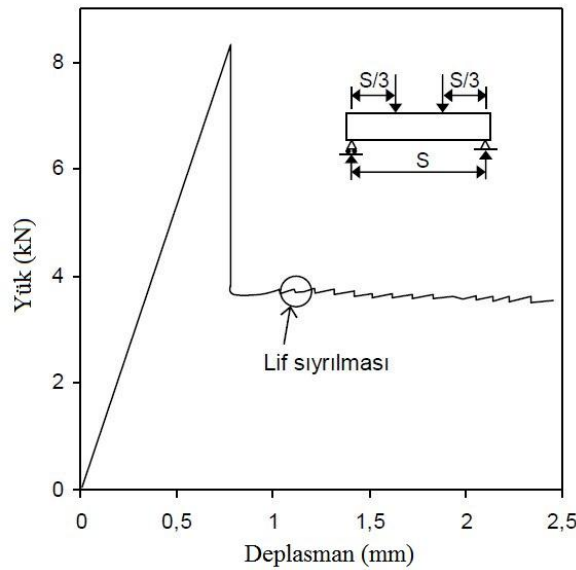
Daha önce de belirtildiği gibi lifler çatlakların oluşumunu önleme işlevi de görebilirler. Şekil 3.6(a)'da görüldüğü gibi çatlağın oluşumuna yol açan çekme gerilmeleri çatlak ucuna doğru azalma göstermektedir. Şekil 3.6(b)'de ise bu çatlağın matriste ilerlerken lif-matris ara yüzündeki boşluklu ve zayıf yüzeye rastlayarak körleşmesi ve ilerlemesinin durdurulması gösterilmiştir (Cook ve Gordon, 1964; Bentur vd., 1985a; Bentur vd., 1985b; Bentur ve Mindess, 1990). Ayrıca Şekil 3.5 daha ayrıntılı incelendiğinde çatlağın ikizlenmesi ve sapmasının da bu bölgede gerçekleştiği görülür. Buraya kadar anlatılan çatlak oluşumu mekanizması kompozitin çatlama öncesi (gerilme transferi mekanizması) davranışını içermekteydi. Araştırmalar, liflerin bu noktaya kadar olan davranışının özellikle normal dayanımlı betonda ve normal dozaj ve boyutlarda lifler kullanıldığında, dayanımın fazla artmadığını ve kompozitin asıl özelliklerinin çatladıktan sonraki (çatlak köprüleme mekanizması) davranışa bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır (Li ve Maalej, 1996a; Li ve Maalej, 1996b; Shah, 1991; Yardımcı, 2007).



Şekil 3.6. Cook ve Gordon (1964) tarafından ortaya atılan lif-matris zayıf ara yüzünün çatlak durdurma mekanizması (a) çatlak ucunda gerilme dağılımı (b) çatlak ilerleyişinin şematik gösterimi (Bentur ve Mindess, 1990).

3.3. ÇLDB’de Çatlak Köprülenmesi Olayı

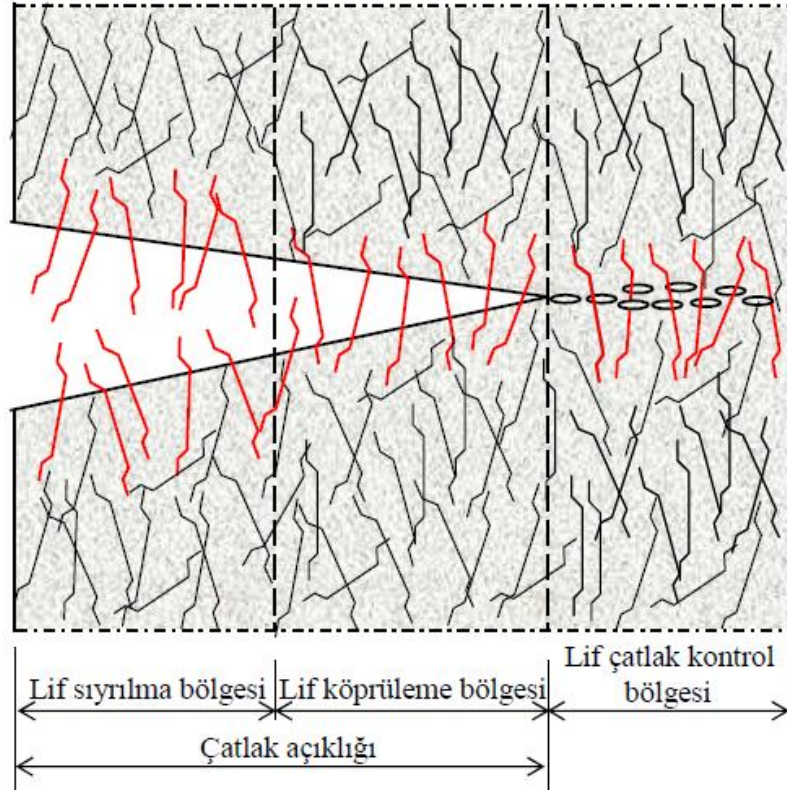
Beton çatlayana kadar, çelik lifler ve beton birlikte çalışırken, çatlama gerçekleşikten ve çatlaklar genişledikten sonra, lifler bütün çekme gerilmesini alarak çatlağı köprülerler. Artan yük ile beton matristen sıyrılmaya başlayan lifler ise enerji yutulmasını sağlarlar. Bu sayede ÇLDB, lifler tamamen sıyrılına ya da kopana kadar yük taşımaya devam eder (Bentur ve Mindess, 1990). Şekil 3.7’de kiriş eğilme deneyi sırasında elde edilen yük-deplasman eğrisi görülmektedir. Görüldüğü gibi çatlakları köprüleyen liflerin sıyrılmaya başlaması sonucunda numunenin taşıdığı yük sıfıra gitmezken, deplasman da artmaya devam etmektedir. Sıyrılmanın zorlaştığı deforme edilmiş liflerin bu davranışı geliştirdiğinden bahsedilmişti. Ayrıca beton matris özelliklerinin de bu davranış üzerinde etkisi olduğunu biliyoruz. Düşük matris dayanımına sahip ÇLDB’lerde sıyrılma bölgesinde matriste yerel hasarlar da meydana gelir (Bentur ve Mindess, 1990; Yardımcı, 2007).



Şekil 3.7. Yük-Deplasman eğrisinde lif sıyrılmasının oluşturduğu etki (Yalçın, 2009).

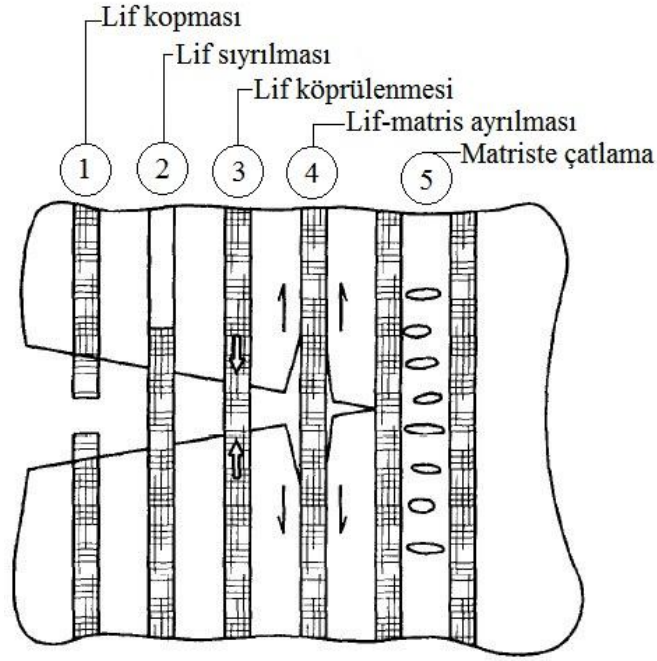
Çelik lif miktarı arttıkça belirli bir hacim için lifler daha fazla yer işgal ederek matrisin azalmasına sebep olacağından liflerin matris tarafından mükemmel biçimde sarılması tehlikeye girer. Hatta bazı durumlarda liflerin sıyrılma direnci düşer (Löfgren, 2005; Shah ve Naaman, 1976; Yardımcı, 2007).

Çatlak açıldıktan sonra çelik liflerin köprülenmesi sırasında çekme gerilmelerini karşılarken, çatlak önünde çatlağın ilerlemesini önleyici basınç kuvveti oluşur. Bu basınç kuvveti de çatlağın ilerlemesini geciktirebilir (Şekil 3.8) (Yalçın, 2009).



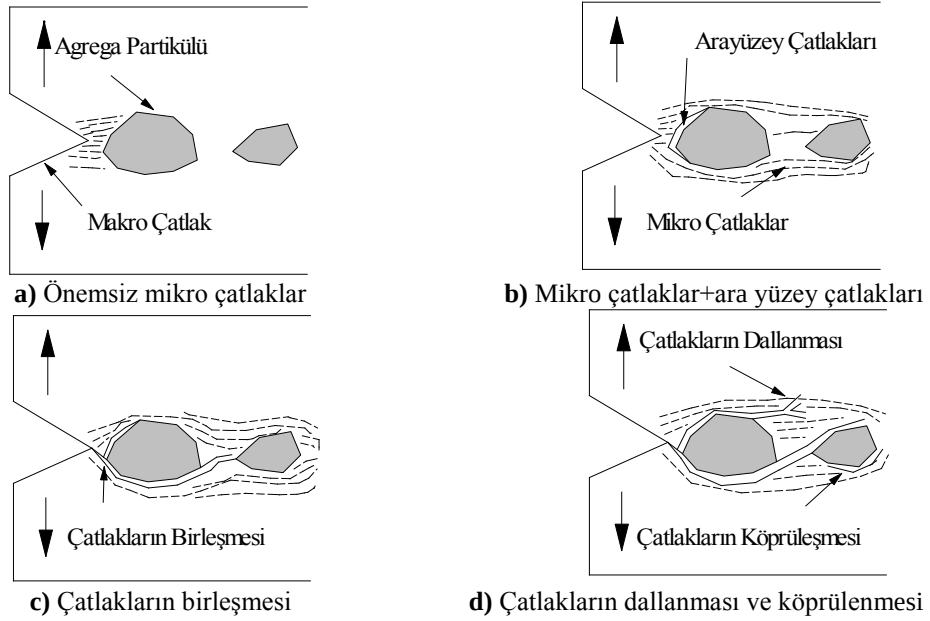
Şekil. 3.8. ÇLDB’lerde liflerin çatlak kontrol ve köprüleme etkisinin sematik gösterimi. (Yalçın, 2009).

Şekil 3.8 ve 3.9’da çatlak üzerinde köprülenen lifler ve artan yükün etkisinde çatlak açıldıkça kopmaya ve sıyrılmaya başlayan lifler görülmektedir. Bu mekanizmanın sağladığı süneklik ve toklaşma ile ÇLDB aniden göçmez, yük taşımaya devam eder ve üstün özelliklerine kavuşur. Normal betonda ise çatlak açıldığı anda gerilme transferinin durduğu düşünülürse gevrek göçmenin sebebi bu ani çatlak oluşumu olarak gösterilebilir. Çatlağı köprüleyen çelik liflerin çatlaktan sıyrılmasının zorlaşmasıyla (lif sayısının artması, lif boyunun artması gibi nedenlerle) bu üstün özelliklerin artacağı da şüphesizdir.



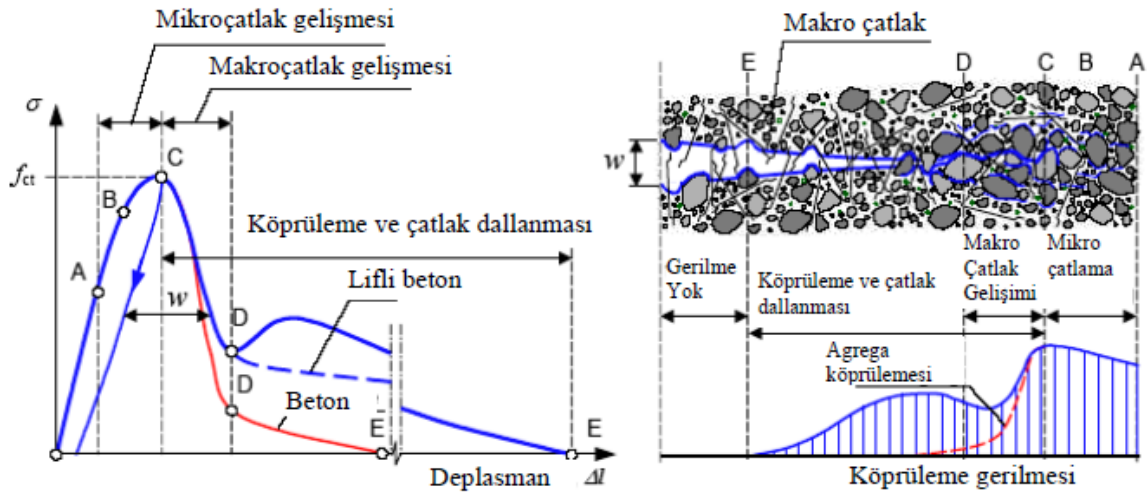
Şekil 3.9. Liflerin çatlağı köprülemesi sırasında kopması ve sıyrılması (Anderson, 1991; Zollo, 1996).

Betonda agregaların da çatlak üzerinde az da olsa köprülenme özelliği vardır (Şekil 3.10) (Alyamaç, 2008). Bu sebeple lifli betonda toklaşma üzerinde hem liflerin hem de iri ve ince agregaların etkisi vardır (Zhang vd., 2001; Zhang ve Li, 2004).



Şekil 3.10. Normal betonda çatlak ilerlemesi ve agregalar tarafından çatlağın köprülenmesi (İnce, 1998; Alyamaç, 2008).

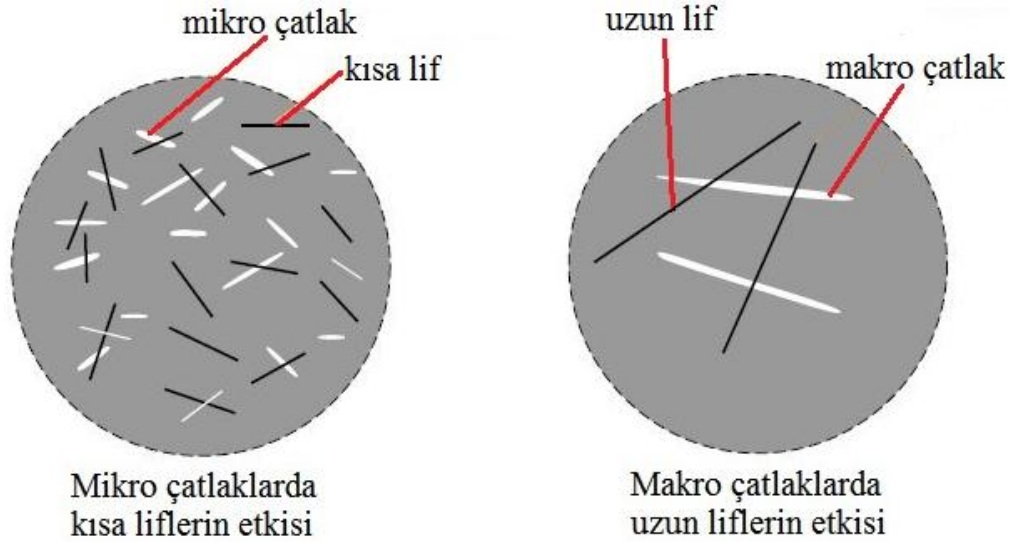
Şekil 3.11’de tek eksenli çekme gerilmesi altındaki çelik lifli betonda kırılma süreci üzerine liflerin ve agregaların etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi çatlağın genişlemeye devam etmesi ile liflerin tamamen sıyrıldığı ve bu bölgede gerilme transferinin sıfıra indiği bir bölge vardır. Köprülenme bölgesine gelindiğinde ise gerilme transferi lifler ve agregalar üzerinden devam eder. İlerleyen ve genişleyen çatlak ucunda yeni mikro ve makro çatlak gelişir. Bu gelişim sebebiyle gerilme-şekil değiştirme eğrisinin yükselen kısmında lineerlik bozulur. Genellikle 0,1 mm’nin altındaki küçük çatlak açılmalarında grafikte CD arasında keskin bir düşüş gözlenir. Çatlak en kesitindeki diğer liflerin çatlak köprülemeye devam etmesi sebebiyle yük tamamen sıfıra inmez. Çatlak genişledikçe ve lifler matristen sıyrıldıkça gerilme aşamalı olarak sıfıra doğru iner (DE arası). Kancalı uçlu liflerin kullanılması, uzun liflerin kullanımı veya yüksek miktarda lif kullanımı ile mekanik etki iyileşerek çatlak artsa bile gerilme yeniden artabilir. Burada verilen grafik lif tipi, lif boyu ve narınlığı ile lif miktarına bağlı olarak değişir. Bazen yeniden artan gerilme ilk çatlak gerilmesini bile aşabilirken, bazen de D noktasından sonra sıfıra doğru gitmeye devam eder (Löfgren, 2005; Yardımcı, 2007). Buradan da anlaşılabacağı üzere agrega granülometrisinin ve D_{max} ’ın da ÇLDB’nin mekanik özellikleri üzerinde etkisi vardır.



Şekil 3.11. Tek eksenli çekme altında ÇLDB’nin çatlaması (Löfgren, 2005; Yardımcı, 2007).

Ayrıca liflerin çatlak köprüleme özelliği boyları ile doğru orantılıdır (Şekil 3.12). Mikro liflerin varlığı betondaki mikro çatlakların genişliğini sınırlarken, makro düzeyde oluşan çatlakları köprüleyemezler. Bu sebeple sünekliği makro lifler kadar arttıramazlar. Fakat mikro liflerin köprülediği mikro çatlakların genişliği sınırlandırıldığından yük altında

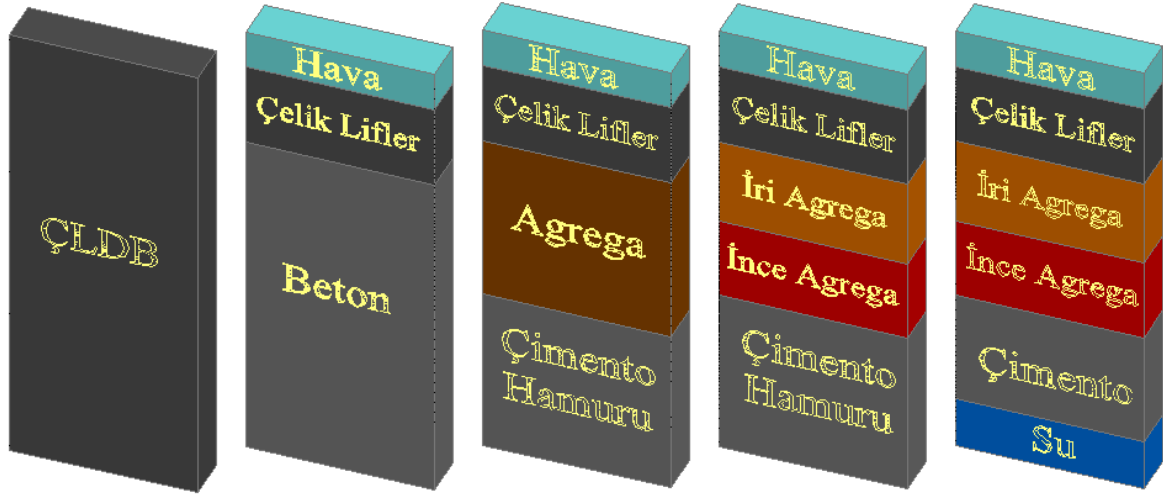
büyüyüp birleşerek büyük bir çatlakla dönüşmeleri gecikir ve malzemenin deformasyon kapasitesi artar. Araştırmacılara göre makro ve mikro liflerin birlikte kullanımı en iyi mekanik performansı verir (Caggiano vd., 2012; Lawler vd., 2003; Yalçın, 2009).



Şekil 3.12. Mikro ve makro boyutlu liflerin çatlak köprüleme özellikleri (Mehta ve Monteiro, 2006).

3.4. ÇLDB'nin Tasarımı

Daha önce ÇLDB'lerin geleneksel betona göre ince malzeme içeriğinin arttırılmasının tavsiye edildiği belirtilmişti. Çelik lif oranı veya lif boyu arttığında düşen işlenebilirlik, için de D_{max} 'ın veya iri agrega miktarının azaltılması (bütün agrega hacminin %55'inden az) gerektiği de vurgulanmıştı. Yüksek lif içeriğinin beton içerisinde düzgün biçimde dağılımını sağlamak zor olduğundan, özellikle geleneksel yöntemler ile karıştırılan ve yerleştirilen betonlar için lif miktarının da %2'yi geçmemesi tavsiye edilir (ACI 544.1R, 2002; ACI 544.3R, 1998; Mehta ve Monteiro, 2006). Bu tedbirler işlenebilirliğin korunması ve topaklanmaya meyilli çelik liflerin beton içinde homojen dağılımının sağlanması açısından önemlidir. Aksi taktirde liflerin düzgün dağıldığı bölgelerde üstün mekanik özelliklere ulaşılırken, lif topaklanmasının olduğu yerlerde lifler arasına giremeyen çimento harcı nedeniyle zayıflamış bölgeler oluşacaktır. Üstelik hacimce lif miktarı arttığında, liflerin etrafını saran beton matrisin hacmi azalacağından topaklaşma riski artar. Şekil 3.13'de verilen ÇLDB'nin kompozisyonunun şematik gösterimine bakıldığında bu durum daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 3.13. ÇLDB'nin kompozisyonu

ACI tarafından önerilen normal ağırlığa sahip ÇLDB için deneme karışımları Tablo 3.1'de verilmiştir. Ayrıca bu betonların karıştırılması, yerine yerleştirilmesi ve kuru ile ilgili standart ve tavsiyeler de vardır (ACI 544.3R, 1998; TS 10514, 1992).

Tablo 3.1. Normal ağırlıklı ÇLDB'ler için karışım oranları (ACI 544.3R, 1998).

	$D_{max} = 9,5 \text{ mm}$	$D_{max} = 19 \text{ mm}$	$D_{max} = 38 \text{ mm}$
Çimento (kg/m^3)	356~593*	297~534*	279~415*
Su/çimento	0,35~0,45	0,35~0,50	0,35~0,55
İnce/iri agrega oranı (%)	45~60	45~55	40~55
Hava (%)	4~8	4~6	4~5
Hacimce çelik lif içeriği – V_f (%)			
Deforme çelik lif	0,4~1	0,3~0,8	0,2~0,7
Düz çelik lif	0,8~2	0,6~1,6	0,4~1,4
* Birimleri metrik sisteme çevrilmiş değerler.			

Tablo 3.2. Betona ilave edilen maksimum lif miktarları (kg/m^3) (TS 10514, 1992).

D_{max} (mm)	$\lambda=60$		$\lambda=75$		$\lambda=100$	
	Normal	Pompa	Normal	Pompa	Normal	Pompa
4	160	120	125	95	95	70
8	125	95	100	75	75	55
16	85	65	70	55	55	40
32	50	40	40	30	30	25

Tablo 3.2'de ise narinliğe (λ) bağlı olarak verilen çelik lif miktarları görülmektedir. Normal betonlar için ayrı verilen lif miktarları, pompalanabilir betonlar için bir miktar azaltılmıştır (TS 10514, 1992). Tablodan da görüldüğü gibi ACI'da olduğu gibi Türk

Standartı da lif narınlığı veya D_{max} artarken lif miktarının düşürölmesi gerektiğini tavsiye etmektedir.

Bu tavsiyeler gerek uygulamada gerek literatürdeki çalışmalarda uygulansa bile ÇLDB gibi özellikleri çok fazla parametreye bağı olan özel beton türleri için çok fazla deneme yanılma karışımı yapmayı ve ara değerleri tahmin etmeyi gerektirmektedir.

Geleneksel yöntemler ile üretilen ÇLDB'nin liflerini çevreleyen beton matris aslında geleneksel betonun tasarımına sahiptir. Zaten çalışmanın başında verilen ÇLDB'nin tanımı da temelde geleneksel betona lif takviyesi ile bu kompozitin elde edildiğini anlatır. Bu sebeptendir ki ÇLDB, geleneksel betonu etkileyen parametrelerden farklı şekillerde de olsa etkilenir. Standart ve çalışmalarda verilen değerler ise daha çok taze ve mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla verilen tavsiyelerdir. ÇLDB tasarımı ile ilgili olarak literatürde birçok çalışmaya yer verilmiştir. Yalçın (2009) ve Yalçın vd. (2011) ÇLDB'nin performansa dayalı tasarımını yapmış ve birçok çelik lif çeşidi ve matris özelliklerine göre ÇLDB'leri basınç dayanımına göre yüksek ve normal dayanımlı olarak iki grupta toplamıştır. Daha sonra eğilme dayanımlarına göre ÇLDB'ler için ikinci bir performans sınıfı belirlemiştir. Ayrıca ÇLDB'lerin tokluklarını ASTM C 1018 (1997) standardında verilen kalıcı dayanım sınıflarına göre de sınıflandırmıştır. Böylece uygulamada geleneksel betonda olduğu gibi kullanılabilecek ÇLDB basınç ve eğilme dayanım sınıfları belirlemiştir. Grünwald (2004) de kendiliğinden yerleşen tipte ÇLDB üzerinde performans tabanlı bir çalışma yürütmüştür. Buna göre hem taze hem de sertleşmiş özellikler incelenmiş ve karakteristiklerin tahmin edileceği bir tasarım oluşturmaya ve karışım oranlarının optimize edilerek belirli sınırlar içerisinde deneme yanılma karışımlarının sayısı düşürölmeye çalışılmıştır. Çünkü çelik liflerin katılmasıyla, geleneksel betondan daha maliyetli bir malzeme haline gelen ÇLDB için boşa giden deneme yanılma karışımları hem zaman hem de iş gücü kaybına yol açmaktadır. Üstelik sadece geleneksel ÇLDB'yi üretmek için kaybedilen süre ve maliyet, kendiliğinden yerleşen çelik lif donatılı beton (KYÇLDB) veya yüksek performanslı çelik lif donatılı beton (YPÇLDB) gibi daha özel türler düşünüldüğünde artmaktadır. Çünkü KYÇLDB için hem üstün işlenebilirlik özellikleri korunmalı hem de çelik lifler ile kazandırılacak mekanik performans optimum seviyede sağlanmalıdır. Bu sebeple literatürde daha çok KYÇLDB veya başka özelliklere sahip çelik lifli kompozitlerin tasarımı için geliştirilmiş model ve formüllere rastlanmaktadır (Karihaloo ve Ghanbari, 2012; Lin vd., 2013; Ferrara vd., 2007; Pereira de Oliveira, 2013; Radhika vd., 2012). Fakat bu model ve

formülasyonların kullanımı pratiklikten uzak olabileceği gibi, sadece ait olduğu ÇLDB türü için kullanılabilir. Örneğin işlenebilirlik özellikleri yüksek KYÇLDB için ortaya atılan bir tasarım metodu sıradan ÇLDB için kullanılamaz, çünkü işlenebilirlik ile mekanik özellikler değişebilir (Ferrara vd., 2008).

Geleneksel ÇLDB'nin tasarımı için ise bazı çalışmaları sıralamak mümkündür. Örneğin Köksal vd. (2013) ÇLDB'nin optimum karışım hesabını yapmaya çalışmışlar ve bu amaçla çelik lif narinliğini ve miktarını optimum değerde tutarak plak numunelerin tokluğunu maksimum, maliyetini ise minimum yapacak bir tasarım ortaya koymaya çalışmışlardır. Sonuçta iki farklı beton sınıfı için optimum bir karışım hesabı oluşturmuşlardır. Bayramov vd. (2004) ÇLDB'nin optimum tasarımını kırılma mekaniğine göre elde ettikleri parametreler ile değerlendirmişler ve “tepki yüzey yöntemi” kullanılarak minimum gevreklik sağlayacak optimizasyonu sunmuşlardır. de Figueiredo vd. (2000) ise tokluk özelliğinin de ÇLDB tasarımında yer alması gerektiğini vurgulayarak çelik lif özellikleri ile tokluk arasında bir korelasyon ortaya çıkarmıştır. Ayrıca su/çimento oranı arttıkça dayanımın düşeceği (Abrams Kanunu) (Abrams, 1918) gerçeğini de baz alarak karışım hesabı yöntemini ortaya çıkarmışlardır.

Açıkgenç vd. (2015), çalışmalarında bir yapay zeka uygulamasını, işlenebilirlik, beton sınıfı, lif miktarı, lif boyutları ve D_{max} parametrelerinden yola çıkarak ÇLDB bileşimlerini tahmin edecek şekilde modellemeyi başarmışlardır.

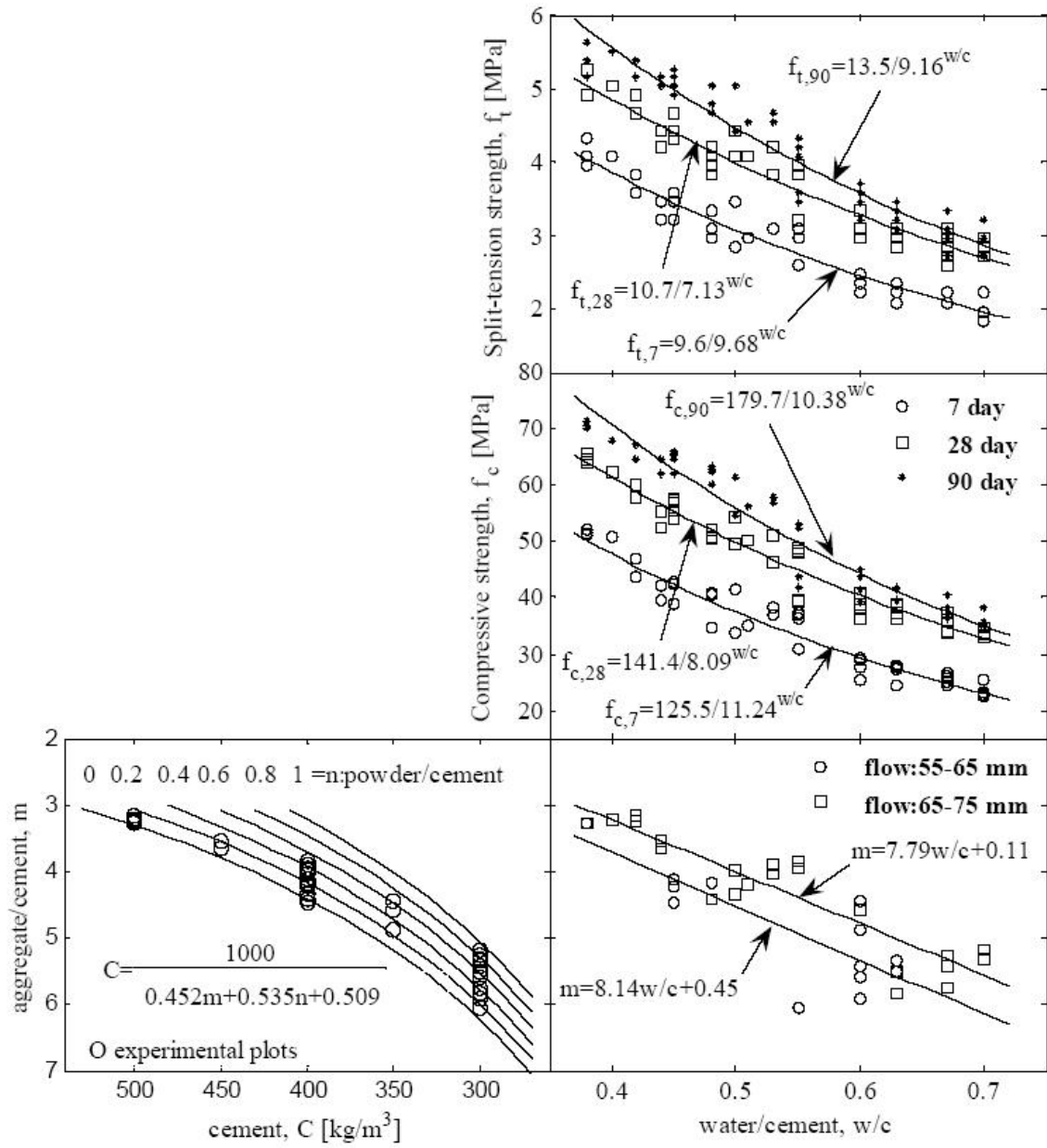
Dvorkin vd. (2011) de ÇLDB için optimum bir tasarım üzerinde çalışmışlardır. Çelik lif miktarı, su/çimento oranı, ince agreganın (kum) incelik modülü, Ve-Be deneyi ile ölçülen işlenebilirlik ve kum miktarının çimentoya oranı olarak belirledikleri beş parametre ile başarılı bir tasarım yapmış ve çeşitli tasarım formülleri sunmuşlardır.

Çelik lif içeriğinin artması mekanik özellikleri olumlu etkilese de taze özellikleri olumsuz etkilediğinden Beddar vd. (2004) ise öncelikli olarak taze hal için çelik lif içeriğini optimize etmeye çalışmışlar ve sonrasında sertleşmiş hal için iyileştirilen mekanik özellikleri göz önünde bulundurarak bu iki hal arasında uyumlu bir nokta bulmaya çalışmışlardır. Sonuçta ÇLDB'de su/çimento (s/ϕ) oranının sabit tutularak kimyasal katkı kullanılmasını ve bu katkının karışım hesaplarında göz önünde bulundurulması gerektiğini savunmuşlardır.

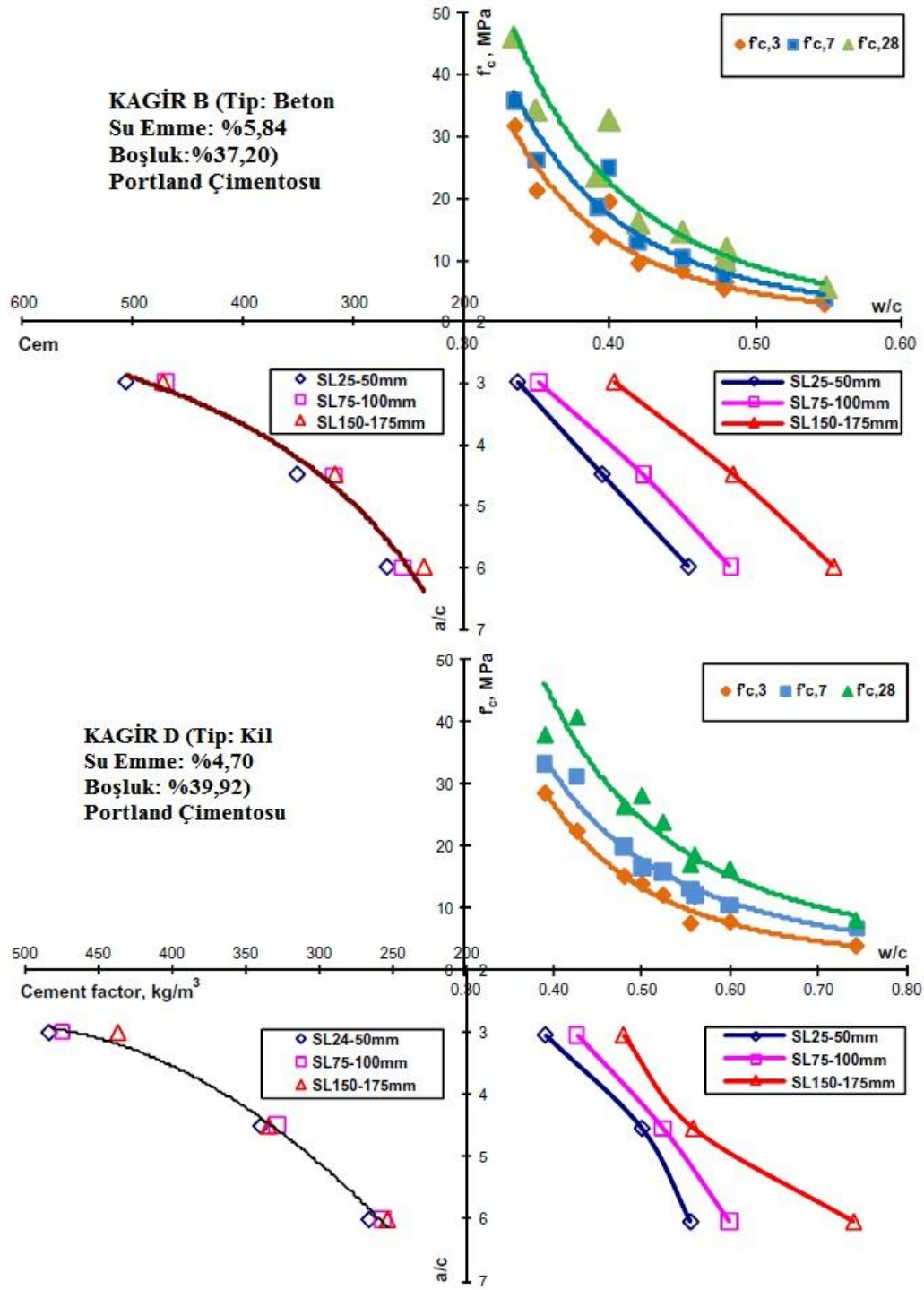
Massicotte vd. (2000) özellikle köprü tabliyelerinde kullanılan ÇLDB'lerin işlenebilirlik ve hava içeriği gibi özelliklerinden yola çıkarak çalışma sonunda karışım hesabı için belirli tavsiyelerde bulunmuşlardır. Almansa ve Canovas (1997) ise karışım oranlarının

ÇLDB'nin taze, sertleşmiş ve durabilite özelliklerine etkisi üzerinde durmuşlardır. Shakhmenko vd. (2009) de benzer şekilde mekanik ve durabilite özelliklerinin lif özelliklerine ve karışım parametrelerine bağlı olarak tahmin edilebileceği bir tasarım yapmaya çalışmışlardır. Huo vd. (2013), Zhao vd. (2011) ve Huo vd. (2011) geliştirdikleri ikili süperpozisyon karışım oranları yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Buna göre farklı beton sınıflarına sahip ÇLDB'lerin basınç dayanımları, yarma dayanımları ve eğilme dayanımları belirlenmiş ve hacimce çelik lif oranı ve bu lifleri saran çimento hamurunun kalınlığı parametrelerinin bunlar üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Sonuçta çelik lifleri saran çimento hamurunun optimum kalınlığının 0,8 mm olması gerektiğini fakat bu kalınlığın değişiminin eğilme tokluğunu lif miktarı kadar etkilemediğini savunmuşlardır. Ayrıca eğilme dayanımının da etkisi göz önüne alınarak ÇLDB yapı elemanları için teknik formüller üzerinde de çalışmışlardır. Achilleos vd. (2011) yol kaplamaları için silindirle sıkıştırılmış ÇLDB'nin karışım oranlarını, çevresel etkiler ve maliyet düşünülerek araştırmışlardır. Altoubat vd. (2008) de ÇLDB kaplamalar için ekonomik etkileri göz önünde bulunduran bir metot üzerinde çalışmışlardır.

Görüldüğü gibi literatürde bulunan çalışmalar ya liflerin veya beton matris özelliklerinin ÇLDB'nin mühendislik özelliklerine etkisini incelemiş ya da maliyet gibi üçüncü bir parametre ile optimize etmeye çalışmışlardır. Üstelik verilen çoğu metotlar formülasyonlara dayalı olup pratik kullanımdan uzaktır. Çoğu çalışmada ise yeni bir karışım hesabı ortaya koymaktansa mevcut metotlar ile kullanılabilecek tavsiyelerde bulunmuşlardır. Oysa uygulamada ÇLDB'nin tasarımı için gerekli olan pratik bir tasarımıdır. İnşaat mühendisliğinde sık sık kullandığımız grafik ve abaklar hesap ve tasarımlarımızı kolaylaştırdığını biliyoruz. Örneğin bu çalışmaya ilham veren Alyamaç ve İnce (2009) tarafından mermer tozu içeren kendiliğinden yerleşen betonların tasarımı için geliştirilmiş monogram, bu beton türü için son derece pratik bir ön tasarım sağlamaktadır (Şekil 3.14). Üstelik bu monogramı basit formüller ile ifade edebilmek de mümkündür. Benzer bir çalışma yapmış olan Huo vd. (2013) de, kagir yapı atıklarından dönüştürülmüş agrega içeren betonlar için iki adet tasarım abağı oluşturmuşlardır (Şekil 3.15). Her iki çalışmada da başarılı sonuçlar elde edilmiş ve ait oldukları beton türleri için pratik tasarımlar sunulmuştur.



Şekil 3.14. Alyamaç ve İnce (2009) tarafından geliştirilen monogram



Şekil 3.15. Hu vd. (2013) tarafından geliştirilen monogramlar

Bugüne kadar yapılmış çalışmalarda sunulan formülasyonlar ise karmaşık, kimi zaman elde edilebilmesi için nitelikli cihazlara ihtiyaç duyulduğundan ve belli kesin parametrelere bağlı olduklarından uygulama için pratik olmayabilirler. Üstelik yapılan çalışmalarda belli yönleri ile ele alınan bu ÇLDB'ler ise sınırlı bir tasarım sunmaktadır. Bu sebeple bu tez

alışmasında da LDB için literatürde de ihtiyaç duyulduėu dűşünűlen bir ön tasarım metodu olarak grafik tabanlı bir metot seçilmiřtir.

Daha önce de bahsedildiği gibi LDB'lerde özellikle agrega gran lometrisinin özelliklerinin etkisini inceleyen çalışmalar azdır. LDB'de çokça çalışılan konular lif özellikleri, beton matris dayanımı üzerinde en etkili parametreler olan imento dozajı ve su/imento oranının işlenebilirlik, mekanik ve durabilite özelliklerine etkisidir. Bu sebeple hangi bahsedilen bu parametrelerin LDB'nin mühendislik özelliklerine nasıl etki edeceğini tahmin etmek mümkündür.

Bu çalışmada öncelikle agrega granülometrisi değiştirilerek D_{max} , ince agrega oranı ve incelik modülü gibi parametrelerin LDB'lerin taze ve sertleşmiş özelliklerine nasıl etki ettiği ortaya konulmaya çalışılacaktır. Daha sonra ise üretilen farklı dozaj ve su/imento oranlarına sahip lifli betonlar ile LDB'nin tasarımı için grafik tabanlı bir yaklaşım sunmak istenmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada deneysel araştırmaları iki ana grupta ifade etmek mümkündür. İlk grupta, literatürde eksikliği hissedilen agrega granülometrisinin ÇLDB özelliklerine etkisi incelenmiş ve ÇLDB’de kullanılacak granülometreler hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci grupta ise uygun granülometri seçildikten sonra çimento dozajları ve su/çimento oranları değiştirilerek yeni deney serileri üretilmiştir. Sonuçta, bu tezin asıl amacı olan ÇLDB tasarımı için yapılabilecek grafik tabanlı yaklaşım için deneysel bir çalışma yürütülmüştür.

4.1. Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

4.1.1. Çimento

Deneysel çalışmaların tamamında TS EN 197-1 (2012) standardına uygun, CEM I 42,5 N tipi portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4.1’de görülmektedir. Çimento özelliklerinde meydana gelebilecek değişimleri engellemek için deneysel çalışmaların her bir kısmına yetecek kadar malzeme tek seferde temin edilmiştir.

Tablo 4.1. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler	%	Mekanik Özellikler		
SO ₃	2,6	Basınç Dayanımı	2 gün	22,4
MgO	2,1	(N/mm ²)	7 gün	39,4
Cl	0,007		28 gün	51,0
Kızdırma Kaybı	1,7	Fiziksel Özellikler		
Çözünmeyen Kalıntı	0,3	Başlangıç priz süresi (dk)	161	
		Son priz süresi (dk)	260	
		Hacim sabitliği (mm)	0,4	
		Yüzey alanı (cm ² /gr)	3749	
		Özgül ağırlık	3,1	

4.1.2. Agrega

Her iki deney grubu için, ÇLDB numuneleri ve bunların referansları üretilirken kırmataş kalker agregası kullanılmıştır. Agreganın doygun yüzey kuru (DYK) özgül ağırlığı ve diğer fiziksel özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir. Birinci grupta incelenen granülometri etkisi için iki tip D_{max} olmak üzere toplamda 12 adet farklı agrega granülometrisi kullanılmıştır. İkinci grupta ise hem birinci grupta elde edilen sonuçlardan yararlanılarak karar verilen hem de TS 802 (2009) standardı tarafından tavsiye edilen granülometri eğrisi kullanılmıştır.

Tablo 4.2. Agreganın fiziksel özellikleri

	İri (31,5~8mm)	Orta (8~2mm)	İnce (1mm~filler)
DYK Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,68	2,60	2,58
Görünür Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,70	2,69	2,70
Kuru Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,67	2,54	2,50
Su emme (%)	0,3	2,2	3,0

4.1.3. Karışım Suyu

Deneyisel çalışmaların tamamında TS EN 1008 (2003)’e uygun Elazığ İli şehir şebeke suyu depoda bekletilmeden, şebekeden alındığı anda kullanılmıştır.

4.1.4. Kimyasal Katkı

Tablo 4.3. Kimyasal katkının özellikleri

Özellik	Test Sonucu
Bağıl Yoğunluk (g/cm ³)	1,092
Katı Madde (%)	26,95
pH	5,30
Suda Çözünür Klorür (%)	0,01
Alkali Miktarı (Na ₂ O eşdeğeri) (%)	0,2658

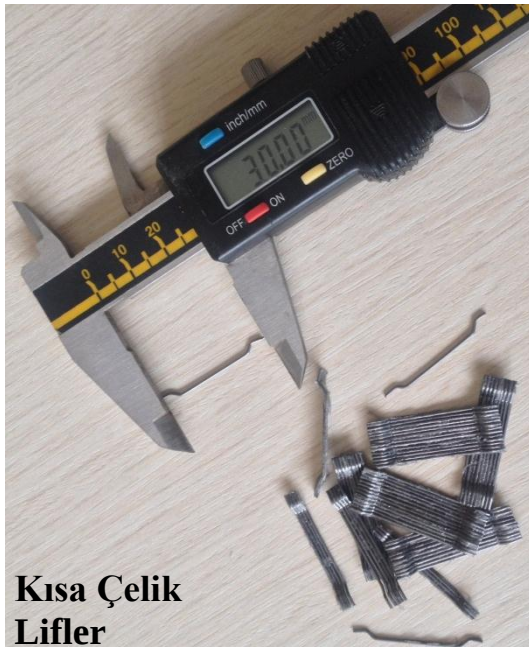
Çelik lif ilavesi ile düşen işlenebilirliği kontrol etmek amacıyla su ilavesiyle karışımların su/çimento (s/ϕ) oranlarını arttırmak yerine polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı (SA) kimyasal katkı kullanılmıştır (Tablo 4.3).

4.1.5. Çelik Lifler

Çalışmada kullanılan liflerin hepsi düşük karbonlu (normal dayanımlı) ve kancalı uçlu çelik liflerdir. Çelik lifler TS 10513 (1992) standardına uygun olarak üretilmişlerdir. Tablo 4.4’de kullanılan liflerin özellikleri görülmektedir. Şekil 4.1’de ise çelik liflerin fotoğrafları verilmiştir.

Tablo 4.4. Çelik liflerin özellikleri

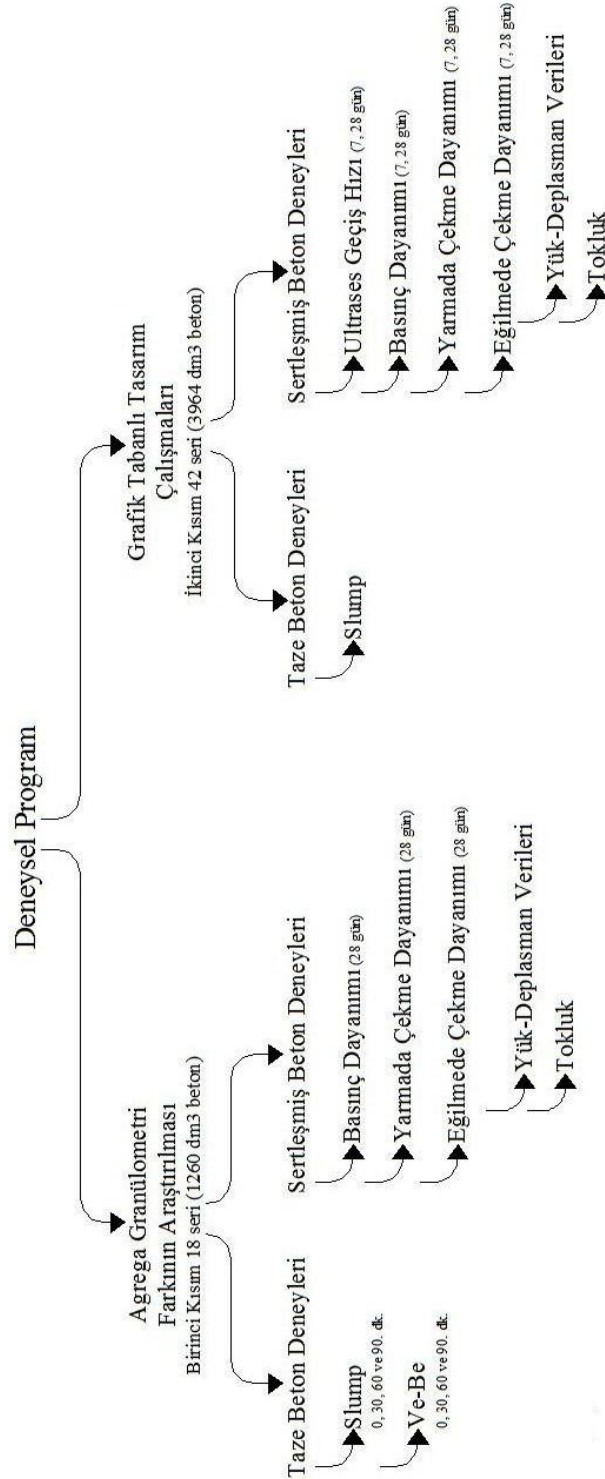
İsimlendirme		Lif Narinliği ($\lambda=l/d$)	Lif Boy - l (mm)	Lif Çapı - d (mm)	Elastisite Modülü - E (GPa)	Tel Çekme Dayanımı - f_t (MPa)
Uzun lifler	80/60	80	60	0,75	200	1250
Kısa lifler	40/30	40	30	0,75	200	1250



Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik lifler

4.2. Deneyisel Program

Çalışmada her iki grup için de deneyisel program taze ve sertleşmiş özellikler olmak üzere iki aşamada yürütülmüştür. Uygulanan prosedür Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Deney programı

4.2.1. Taze Beton Deneyleri

Taze beton özelliklerini ölçmek amacıyla Slump ve Ve-Be deneyleri, karıştırma işleminin (Şekil 4.3) hemen sonrasında sırasıyla TS EN 12350-2 (2010) ve TS EN 12350-3 (2010) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3. ÇLDB'lerin üretimi



(a)



(b)

Şekil 4.4. Taze beton deneyleri (a) Slump deneyi aparatları, (b) Ve-Be deneyi cihazı

Slump testi için standart bir Abrams konisi üç aşamada taze beton ile doldurulmuş ve her seviyede 25 defa şişlenmiştir. Koni tam olarak dolduğunda düz bir biçimde yukarı doğru çekilmiş ve taze betonun eski konumuna göre çökme değeri ölçülmüştür (Şekil 4.4a) (TS EN 12350-2, 2010). Ve-Be testinde ise silindir kalıbın içindeki kesik koni biçimli

kalıp Slump testi ile aynı şekilde taze beton ile doldurulmuş ve çekilmiştir. Daha sonra saydam disk aparatı beton kütle üzerine serbestçe bırakılmış ve vibrasyon çalıştırılmıştır. Bu andan sonra, diskin ağırlığı ile silindir kalıp içine yerleşen betonun saydam diskin bütün yüzeyini tamamen kaplayana kadar geçen süre kaydedilmiştir. Bu süre Ve-Be süresi olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.4b) (TS EN 12350-3, 2010).

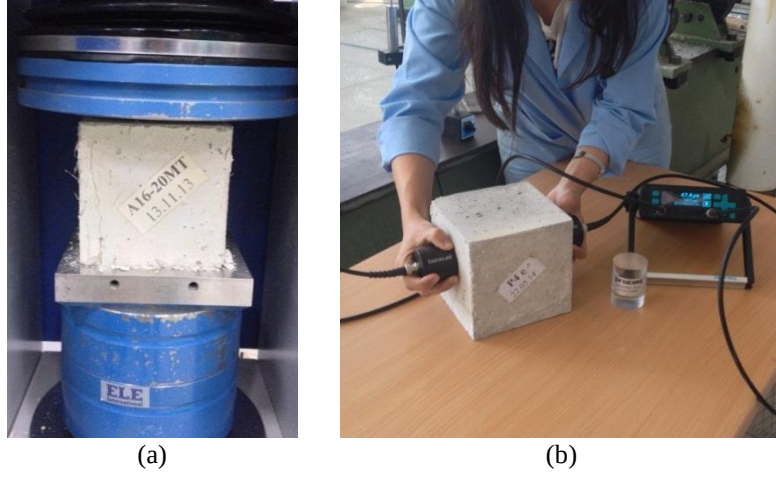
Granülometri etkisinin incelendiği birinci grup serilerde bu taze deneyler hem karıştırma işleminin ertesinde hem de 30, 60 ve 90 dakikalık periyotlarda tekrarlanmıştır. İki periyot arasında taze beton, karıştırılmaya devam edilmiştir. Bu sayede ÇLDB'nin taze özelliklerinin zaman ile değişimi ölçülebilmektedir.

4.2.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Serleşmiş beton özelliklerini tespit edebilmek amacı ile 28 gün suda kür edilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarma dayanımı ve eğilme dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasıyla TS EN 12390-3 (2010), TS EN 12390-6 (2010) ve TS 10515 (1992) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Her iki deneysel çalışma grubunda da her bir seri için, basınç ve yarma dayanımlarını ölçmek amacıyla 3'er adet 150×150×150 mm boyutlu küp numune ve eğilme dayanımını ölçmek amacıyla 3 adet 150×150×500 mm boyutlu kiriş numuneleri üretilmiştir. Ayrıca bütün referans ve ÇLDB'lerin ultrases geçiş hızı ölçümleri de standart küp numuneler ile TS EN 12504-4 (2004) standardına uygun şekilde yapılmıştır (Şekil 4.5).

Agrega granülometrisi ile ilgili yapılan çalışmalarda sadece 28 günlük dayanımlar elde edilirken, grafik tabanlı yaklaşım için yapılan deneylerde bazı serilerin 7 günlük dayanımları da test edilmiştir.

Bunlara ek olarak eğilme deneyi kapalı çevrim deplasman kontrollü cihazda yapılmış olup, yük-deplasman değişimleri kaydedilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak ÇLDB serilerinin eğilme toklukları da hesaplanmıştır.



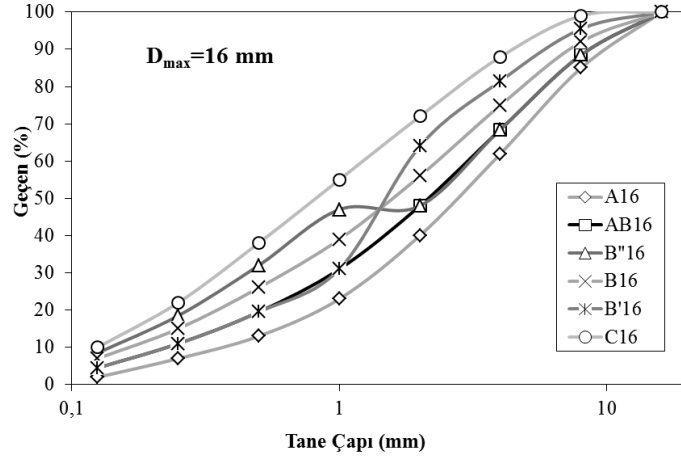
Şekil 4.5. Sertleşmiş deneyler (a) Basınç deneyi (b) Ultrases geçiş hızı deneyi

4.3. Karışım Oranları

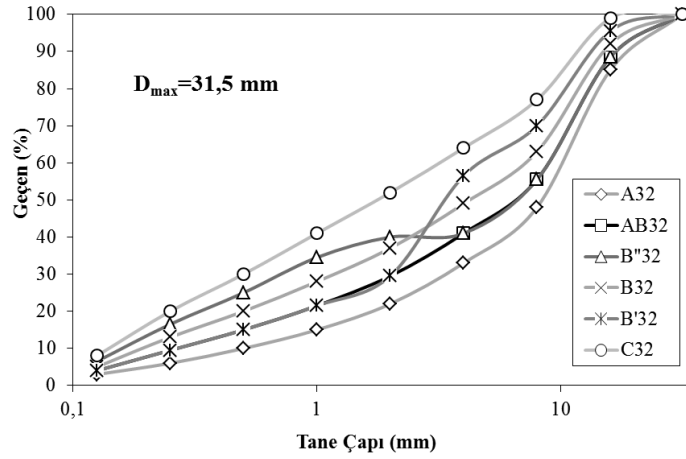
Çalışmada iki grupta da üretilen ÇLDB karışımları ve bunların referans serileri aşağıda verilmiştir.

4.3.1. Agregat Granülometrisinin Etkisini Değerlendirmek İçin Üretilen Karışımlar

Agregat granülometrisinin değişimini incelemek adına TS 802 (2009) standardında verilen sınır granülometrelerinden yola çıkılarak iki farklı D_{max} için 6'şar farklı (toplamda 12) granülometri eğrisi tasarlanmıştır. Kalker agregası TS 706 EN 12620+A1 (2009) standardında tanımlanan standart elek sınıflarına göre elenerek farklı tane boylarına ayrılmıştır. Elde edilen farklı boyutlardaki agregalar 12 farklı tip granülometri sağlayacak şekilde karıştırılarak ÇLDB karışımlarına ilave edilmiştir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de bu granülometri eğrileri görülmektedir.

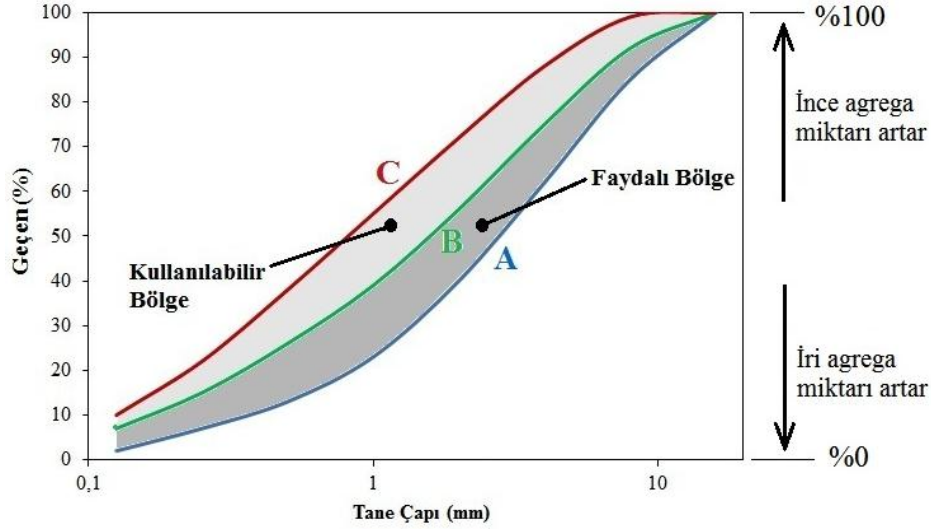


Şekil 4.6. $D_{max}=16$ mm için tasarlanan granülometri eğrileri



Şekil 4.7. $D_{max}=31,5$ (32) mm için tasarlanan granülometri eğrileri

Bu granülometri eğrileri TS 802 (2009) standardında verilen granülometri sınırlarından yola çıkılarak tasarlanmıştır. Şekil 4.6 ve 4.7'de verilen eğrilerden A, B ve C olarak kodlanan eğriler bu standartta sınır granülometriler olarak verilmiştir. Buna göre ekonomik ve işlenebilirliği uygun betonu elde edebilmek için A ve B eğrilerinin arasına düşen bütün granülometri eğrileri en elverişli olanlardır (faydalı bölge). Ancak B ve C eğrileri arasına düşen granülometri eğrileri de tercih edilebilir (kullanılabilir bölge) (Şekil 4.8). Ayrıca bilindiği gibi granülometri eğrileri %100 eksenine yaklaştıkça agregada ince malzeme miktarı artar. %0 eksenine yaklaştıkça agregada kompozisyonunda iri malzeme miktarı artar. Bu sebeple A ve C eğrilerinin dışına çıkılması beton kalitesini bozar (Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991; TS 802, 2009).



Şekil 4.8. TS 802 (2009)'da uygun granülometri için tavsiye edilen bölgeler

Tablo 4.5. Birinci kısım çalışmalar için karışım oranları

Karışım Oranları (kg/m ³)					Boyutlarına göre ayrılmış agregalar (mm)								
Kod	PÇ	s/ç	Çelik lif	SA	32 16	16 8	8 4	4 2	2 1	1 0,5	0,5 0,25	0,25 0,125	<0,125
R-A16	350	0,5	0	7,0	0	282	420	402	310	181	109	91	36
A16	350	0,5	78,5	7,0	0	282	420	402	310	181	109	91	36
A32	350	0,5	78,5	7,0	282	696	274	201	128	91	72	54	54
R-AB16	350	0,5	0	7,0	0	216	365	374	310	208	154	118	82
AB16	350	0,5	78,5	7,0	0	216	365	374	310	208	154	118	82
AB32	350	0,5	78,5	7,0	216	621	265	210	146	118	100	100	72
R-B"16	350	0,5	0	7,0	0	216	365	374	18	272	245	181	154
B"16	350	0,5	78,5	7,0	0	216	365	374	18	272	245	181	154
B"32	350	0,5	78,5	7,0	216	621	265	18	100	172	154	181	118
R-B16	350	0,5	0	7,0	0	151	310	347	310	235	199	145	127
B16	350	0,5	78,5	7,0	0	151	310	347	310	235	199	145	127
B32	350	0,5	78,5	7,0	151	546	256	219	164	145	127	145	91
R-B'16	350	0,5	0	7,0	0	85	256	319	602	208	154	118	82
B'16	350	0,5	78,5	7,0	0	85	256	319	602	208	154	118	82
B'32	350	0,5	78,5	7,0	85	480	246	493	146	118	100	100	72
R-C16	350	0,5	0	7,0	0	19	201	292	310	308	290	217	181
C16	350	0,5	78,5	7,0	0	19	201	292	310	308	290	217	181
C32	350	0,5	78,5	7,0	19	414	237	219	201	199	181	217	145

Deneysel çalışmaların birinci kısmı olan, agrega granülometrisi değişimini incelemek için 12 adet granülometri eğrisinden, A, B ve C kodlu olanlar dışında AB eğrisi ile B' ve B" eğrileri de verilmiştir. AB eğrisi A ile B eğrilerinin ortalaması olup TS 802 (2009) standardında verilen faydalı bölgenin tam ortasından geçmektedir. B' ve B" eğrileri ise B

granulometrisi ile aynı incelik modülüne sahip fakat ince/iri agrega oranları farklı eğrilerdir. Böylece 12 farklı granulometri eğrisine sahip ÇLDB serileri ve 6 adet lifsiz referans serileri ile birlikte toplam 18 adet seri, çalışmanın birinci bölümü için hazırlanmıştır (Tablo 4.5). Burada beton serileri sadece granulometri açısından farklılık göstermektedir. Bunun dışında malzeme tipleri ve hacimleri bütün karışımlar için tamamen aynıdır. Yani bütün karışımlar için kullanılan agrega hacmi sabittir. Dolayısıyla agregaların arasını dolduran çimento hamurunun hacmi de sabittir.

Bütün ÇLDB karışımlarında sabit çimento dozajı ve s/ϕ oranı kullanılmıştır. Bunun yanında, çelik lif içeren karışımlarda hacimce (V_f) %1 oranında çelik lif bulunmaktadır. Çalışmanın bu kısmında mekanik özellikleri en iyi şekilde gözlemleyebilmek için sadece uzun çelik lifler (80/60) kullanılmıştır.

Verilen agrega miktarları ise boyutlarına göre ait olduğu granulometride ihtiyaç duyulan miktardır. Örneğin $\frac{16}{8}$ olarak verilen kodlama şekli, 16 mm gözlü elekten geçen ve 8 mm gözlü elek üzerinde kalan agregayı temsil etmektedir. Karışım kodlarında görülen 16 ve 32 (31,5) ise karışıma ilave edilen agreganın D_{max} 'ını temsil ederken, bu rakamların önünde bulunan harfler de granulometri eğrisini tanımlamaktadır. Ayrıca isimlerinin önünde R harfi bulunan karışımlar da ait oldukları serinin lifsiz referans karışımlarıdır.

Bu agrega granulometrilerinin değişen özellik ve parametrelerini de hesaplamak, deneyler sonucunda elde edilecek taze ve sertleşmiş özellikleri yorumlamak açısından da faydalı olacaktır. Bu parametrelerden biri olan incelik modülü, bilindiği gibi bir granulometri eğrisini tek bir rakam ile ifade etmek için hesaplanır. Elek üzerinde yığılımlı kalan agrega yüzdelерinin toplanarak 100'e bölünmesi ile hesaplanan incelik modülü, bir agrega yığınının ortalama tane boyutu (d_o) hakkında da bilgi verir. İncelik modülünün artması, agreganın ortalama tane boyutunun da arttığı anlamına gelir. Yani incelik modülü arttıkça agrega irileşir, incelik modülü azaldıkça agrega incelik (Alexander ve Mindess, 2005; Neville, 1991; TS 706 EN 12620+A1, 2009). Öyleyse granulometri değıştikçe değışken parametrelerden biri de ince/ iri agrega oranıdır. TS 706 EN 12620+A1 (2009)'a göre ince agrega (kum) 4 mm kare gözlü elekten geçen malzemedir. Buna göre bu çalışmada kullanılan agrega kompozisyonlarının, ağırlıkça ince/iri agrega oranları ve tüm agrega kompozisyonu içerisindeki ince agrega yüzdeleri de hesaplanmıştır. Bu hesaplanan parametreler 5. Bölümde verilecektir.

Bunların dışında önemli olan başka bir parametre de agregalar arası boşluk hacmidir (V_{bh}). Agregalar arasındaki boşluğu ölçmek için, bütün agrega kompozisyonu hacmi

bilinen bir konteynere (8 dm³) yerleştirilir. Konteynerdeki agreganın ağırlığı ölçülür ve agreganın gevşek birim hacim ağırlığı hesaplanır (W) (Şekil 4.9). Her agreganın grubu için uygun olarak bir araya getirilen yığınlar oluşturulmuş ve her biri için bu deney yapılmıştır. Daha sonra aşağıdaki denklem (4.1) kullanılarak boşluk oranı bulunmuştur (Yardımcı, 2007).



Şekil 4.9. Agregalar arası boşluk oranının bulunması

$$V_{bh} = \left[1 - W \times \frac{a \times (\rho_c - \rho_f) + \rho_f}{\rho_c \times \rho_f} \right] \times 100 \quad (4.1)$$

Burada,

V_{bh} = agregalar arası boşluk hacmi (%),

W = agreganın gevşek birim hacim ağırlığı (g/cm³),

a = ince / toplam agreganın oranı,

ρ_c = iri agreganın kuru özgül ağırlığı (g/cm³),

ρ_f = ince agreganın kuru özgül ağırlığı (g/cm³) dir.

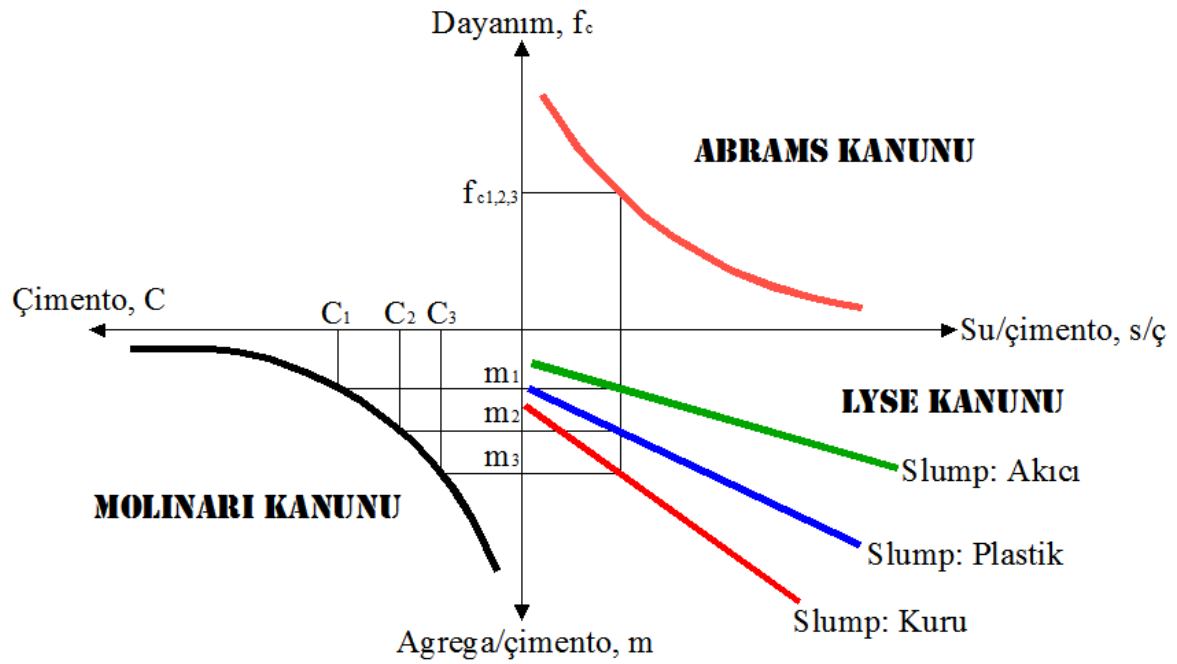
Hesaplanan boşluk oranları da 5. Bölümde verilmiştir.

4.3.2. ÇLDB'nin Grafik Tabanlı Yaklaşımı İçin Üretilen Karışımlar

İlk bölümün sonunda ÇLDB için uygun granülometriye karar verilmiş ve ikinci bölüm çalışmalarında bu granülometri kullanılarak karışımlar tasarlanmıştır. Bu bölümde Alyamaç ve İnce (2009) ve Hu vd. (2013) gibi çalışmalardan esinlenerek ÇLDB tasarımı için grafik tabanlı bir yaklaşım hazırlamak amacıyla ÇLDB serileri üretilmiştir. Fakat bu

serilere geçmeden önce bahsedilen çalışmaların dayandığı monogram ve bunu oluşturan kanunlara değinmekte fayda vardır.

Literatürde gerek normal beton gerek ÇLDB için taze ve sertleşmiş özellikleri bir arada inceleyen ve bunlar arasında ilişki kurmaya çalışan araştırmalardan daha önce bahsedilmişti. Benzer şekilde Monteiro vd. (1993) yaptıkları çalışmada betonun taze ve sertleşmiş özellikleri ile karışım parametrelerini bir araya getiren oldukça kullanışlı bir monogram sunmuşlardır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Beton karışım hesabı için Monteiro vd. (1993) tarafından sunulan monogram

Monogramdan anlaşıldığı gibi, belirli bir s/ϕ oranı için dayanım sınıfını tahmin etmek mümkünken, üç ayrı işlenebilirlik sınıfı için de üç ayrı beton karışım oranı ortaya çıkmaktadır. Alyamaç ve İnce (2009) bu monogramı mermer tozu katkılı kendiliğinden yerleşen beton için hazırlamış ve dayanım sınıfı için sadece basınç değil yarma dayanımını da kullanmışlar ve başarılı sonuçlara ulaşmışlardır. Çalışma sonucunda, oldukça kullanışlı bir monogram elde eden araştırmacılar, tek bir ön tasarım metodu ile hem işlenebilirlik hem de 7, 28 ve 90 günlük mekanik özellikleri ifade edebilmişlerdir. Bunun yanında mermer tozu kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen türdeki beton için toz/çimento oranı parametresini de göz önünde bulundurarak, Molinari kanununu modifiye etmişlerdir. Araştırmacılar bu monogramı elde edebilmek için toplam 73 seri beton karışımını deneysel

olarak incelemişlerdir (Alyamaç ve İnce, 2009). Buna ek olarak Hu vd. (2013), çalışmalarında kagır yapı atıklarından geri dönüştürülmüş agrega içeren farklı beton türleri için, Şekil 4.10'daki yaklaşımı kullanarak 48 farklı deneysel veri serisi ile iki farklı monogram üretmeyi başarmışlardır. Açıkgenç vd. (2012) de literatürde bugüne kadar yapılan ÇLDB çalışmalarından yararlanarak Şekil 4.10'daki monogramı temel alan bir ön tasarım grafiği oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda monogramın ÇLDB için de başarılı olduğu ispatlanmıştır (Açıkgenç vd., 2012).

Şekil 4.10 da görüldüğü gibi, bu monogram üç kanunu temel almaktadır. Bunlar, Abrams Kanunu, Lyse Kanunu ve Molinari Kanunudur.

Abrams Kanunu: Beton özelliklerini etkileyen parametrelerden biri olan su/çimento ($s/\ç$) oranının artması betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımını düşürmektedir (Abrams, 1918; Alyamaç ve İnce, 2009). Bu ilişki Abrams (1918) tarafından denklem (4.2) ile ifade edilmiştir.

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{s/\ç}} \quad (4.2)$$

Burada f_c , belirli bir beton yaşı için basınç dayanımı, $s/\ç$, betonun su/çimento oranıdır. K_1 ve K_2 ise ampirik sabitlerdir. Bu sabitler betonun kür edilme şekline, test durumuna, beton yaşına ve çimento özelliklerine bağlı olarak değişir (Mindess ve Young, 1981; İnce ve Alyamaç, 2008; Alyamaç ve İnce, 2009).

Lyse Kanunu: Bu kanun temelde betondaki su miktarı ile maksimum agrega çapı arasındaki ilişkiyi belirli bir işlenebilirlik için verir (Lyse, 1932; Alyamaç ve İnce, 2009). Bilindiği gibi, maksimum agrega boyutu arttıkça çimento ihtiyacı azalmaktadır. Öte yandan, sabit su/çimento ($s/\ç$) oranında, agrega/çimento (m) oranı arttıkça beton dayanımı da artma eğilimi gösterir. Sonuçta, su/çimento ($s/\ç$) ve agrega/çimento ($m=a/\ç$) arasındaki ilişki denklem (4.3)'deki gibi ifade edilebilir (Alyamaç ve İnce, 2009).

$$m = K_3 \left(\frac{s}{\ç} \right) + K_4 \quad (4.3)$$

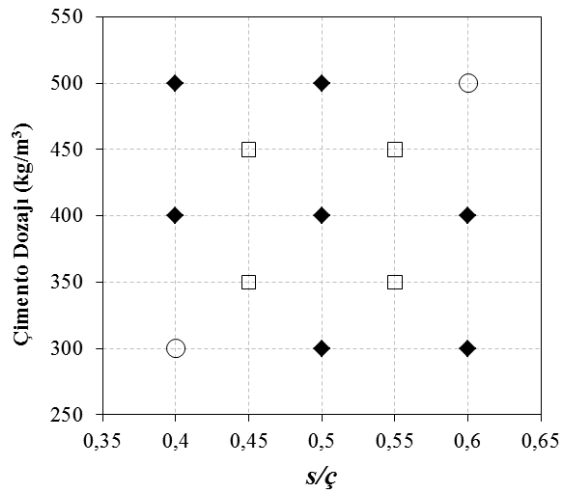
Burada K_3 ve K_4 , işlenebilirliğe bağlı ampirik sabitlerdir.

Molinari Kanunu: Monogramı tamamlamak için gereken son kanun, Molinari tarafından ortaya atılmış, agrega/çimento (m) ve çimento dozajı (C) arasındaki ilişkiyi veren kanundur ve denklem (4.4)'deki gibi ifade etmiştir (Helene, 1987; Alyamaç ve İnce, 2009).

$$C = \frac{1000}{K_5 m + K_6} \quad (4.4)$$

Burada K_5 ve K_6 malzeme sabitleridir.

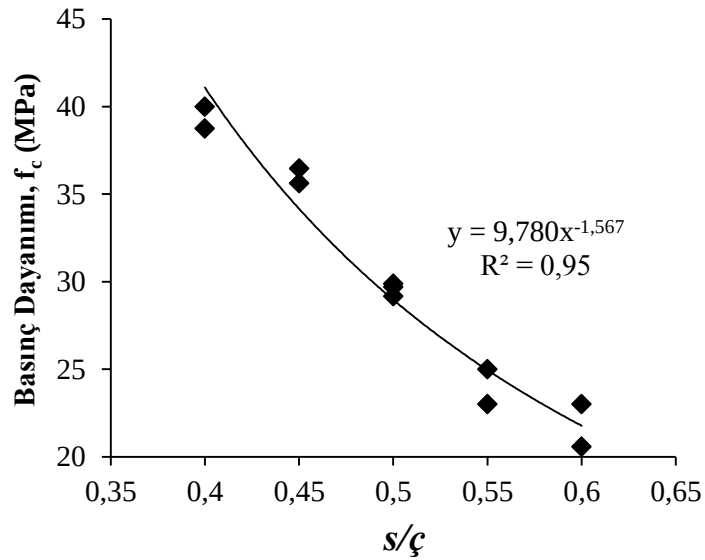
Daha önce de ifade edildiği gibi bu çalışmanın esas amacı, ÇLDB için tasarım ile ilgili grafik bir yöntem geliştirmektir. Bu yöntem ile ÇLDB üreticilerinin istedikleri özellikleri verebilecek beton karışımını tahmin edebilmeleri ve bu sayede deneme yanılma karışımı üretmeden veya az sayıda üreterek istenen ÇLDB'yi elde edebilmeleri amaçlanmıştır. Bu amaçla, beton serilerinde farklılık gösterecek olan çimento dozajı ve s/ç oranını belirlemek için literatür ve ÇLDB uygulamaları araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda çimento dozajının 300~500 kg/m³ ve s/ç oranının da 0,40~0,60 arasında olması uygun görülmüştür. Çalışmanın bu kısmında da birinci kısımda kullanılan malzemelerin (çimento, agrega vs.) aynısı devam edilmiştir. Şekil 4.11, çalışmanın bu kısmı için belirlenen beton karışımlarını ifade etmektedir. Buna göre grafikteki her bir nokta bir beton karışımını göstermektedir.



Şekil 4.11. Çimento dozajı-s/ç oranı grafiğinde tanımlanmış beton serileri

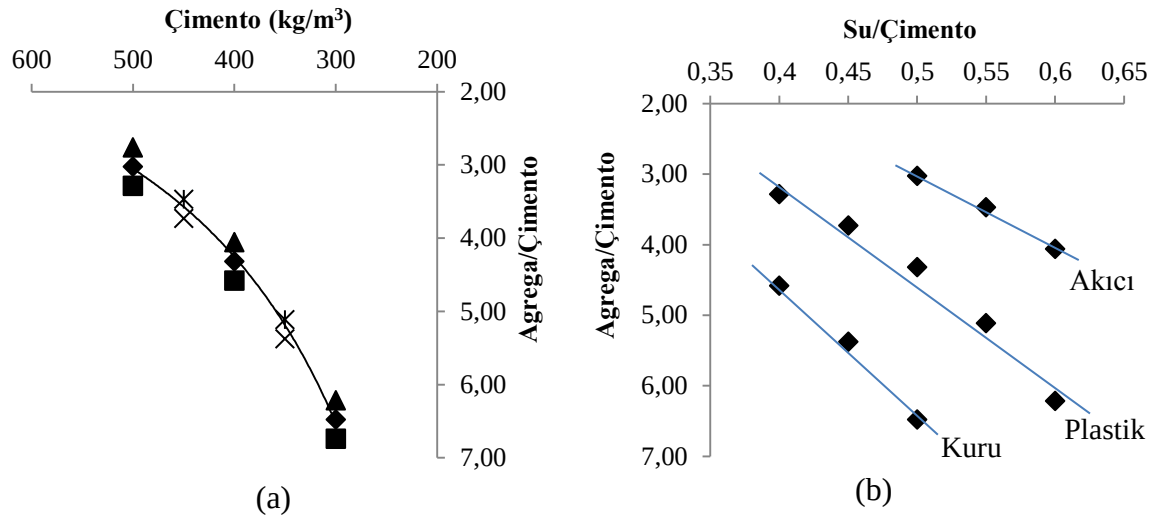
Deneyisel çalışmalar başlamadan önce belirlenmiş bu noktalardan “o” ve “♦” ile gösterilenlerin her biri için beton karışım hesabı yapılmıştır. Bu karışımların gerek taze

gerekse basınç dayanımı açısından incelenebilmesi için bir ön deneysel çalışma yapılmış ve işlenebilirlikleri açısından uygun bulunmayan iki karışım, aşırı kuru (yerleşmez-karışmaz) ve aşırı akıcı (segregasyon) olmaları sebebiyle çalışmadan çıkartılmıştır. Bu karışımlar Şekil 4.11’de “○” ile gösterilen noktalara denk gelmektedir. Daha sonra geri kalan serilerin ara noktalarında kalan değerleri de inceleyebilmek amacı ile Şekil 4.11’de “□” ile gösterilen noktalara denk gelen beton karışımları çalışmaya eklenmiştir. Böylece çalışmanın, bu 11 farklı beton karışımı esas alınarak gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Bu 11 farklı beton karışımlarının çimento dozajı ve su/çimento oranları Şekil 4.11’de “◆” ve “□” ile gösterilmiş noktalara isabet etmektedir. Bu beton karışımlarıyla da yapılan denemelerde hacimce %0,5 oranında kısa lif içeren standart küp numuneler üretilmiş ve 7 günlük basınç deneyleri yapılmıştır. Böylece çalışma sonucunda ortaya çıkacak olan beton karışımlarının dayanım sınıfları hakkında yaklaşık olarak bir fikir sahibi olunmuştur (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. İlk denemelerde elde edilen 7 günlük numunelerin basınç dayanımlarının s/ç oranları ile değişimi

Şekil 4.13’de ise çalışmanın bu kısmında üretilen beton serileri ve bunların işlenebilirlik sınıfları görülmektedir. Buna göre beton serileri Kuru (K) , Plastik (P) ve Akıcı (A) olarak üç grupta toplanmıştır.



Şekil 4.13. (a) Çalışmanın ikinci kısmında üretilen karışımların Çimento dozajı-agrega/çimento oranı grafiği, (b) Tez çalışmasının baz aldığı 11 beton karışımı ve işlenebilirlik sınıfları

Tablo 4.6. Grafik tabanlı yaklaşım için temel referans serileri ve birincil ÇLDB serileri

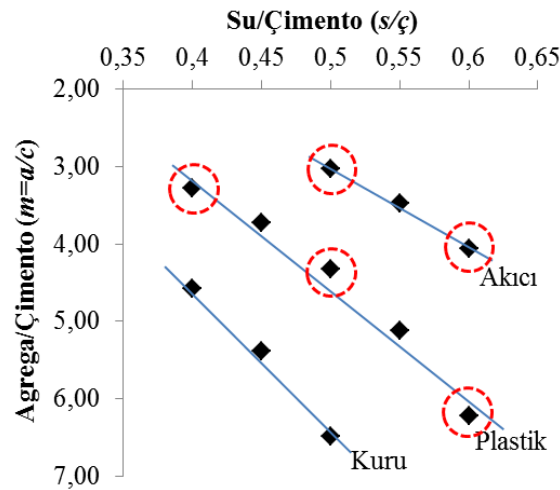
Karışım Kodu	PC (kg/m ³)	s/ç	Agrega (kg/m ³)	SA (%)	V _f (%)	Çelik Lif Tipi	Slump (cm)
Kuru	R-K1 400-0.4	400	0,40	1833	1,70	0	-
	R-K2 350-0.45	350	0,45	1881	1,70	0	6~8
	R-K3 300-0.5	300	0,50	1943	2,00	0	-
Plastik	R-P1 500-0.4	500	0,40	1644	0,75	0	-
	R-P2 450-0.45	450	0,45	1679	0,75	0	-
	R-P3 400-0.5	400	0,50	1728	0,75	0	10~15
	R-P4 350-0.55	350	0,55	1790	0,75	0	-
	R-P5 300-0.6	300	0,60	1865	1,00	0	-
Akıcı	R-A1 500-0.5	500	0,50	1513	0,00	0	-
	R-A2 450-0.55	450	0,55	1562	0,00	0	17~21
	R-A3 400-0.6	400	0,60	1624	0,00	0	-
Kuru	K1 400-0.4	400	0,40	1833	1,70	0,5	40/30
	K2 350-0.45	350	0,45	1881	1,70	0,5	40/30
	K3 300-0.5	300	0,50	1943	2,00	0,5	40/30
Plastik	P1 500-0.4	500	0,40	1644	0,75	0,5	40/30
	P2 450-0.45	450	0,45	1679	0,75	0,5	40/30
	P3 400-0.5	400	0,50	1728	0,75	0,5	40/30
	P4 350-0.55	350	0,55	1790	0,75	0,5	40/30
	P5 300-0.6	300	0,60	1865	1,00	0,5	40/30
Akıcı	A1 500-0.5	500	0,50	1513	0,00	0,5	40/30
	A2 450-0.55	450	0,55	1562	0,00	0,5	40/30
	A3 400-0.6	400	0,60	1624	0,00	0,5	40/30

Çalışmada kullanılan 11 temel beton serisi (birincil) Tablo 4.6'da verilmiştir. Bu seriler hem lifsiz olarak üretilen referans betonları hem de hacimce (V_f) %0,5 oranında kısa (40/30) çelik lif içeren ÇLDB serileri olarak üretilmişlerdir. Burada verilen seriler birincil

seriler olarak adlandırılmıştır. Bu bölümde işlenebilirliğin olumsuz etkilenmemesi ve beton üretiminin sorunsuz bir biçimde yapılabilmesi için birincil ÇLDB serileri için kısa çelik lifler tercih edilmiştir. Tablo 4.6’da verilen malzemelerin özellikleri 4. Bölümün başında verilmiştir. Burada kullanılan $D_{max}=16$ mm olan agrega granülometrisi TS 802 (2009) standardında tavsiye edilen A ve B eğrileri arasındaki faydalı bölgeye düşmektedir. Bu sebeple literatürde de tavsiye edildiği gibi kullanılan agreganın da D_{max} ’ı lif boyundan küçük seçilmiştir.

Birincil serilerin tamamının hem taze hem de 28 günlük sertleşmiş özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca birincil serilerde Plastik olarak adlandırılmış 5 serinin hem referans hem de ÇLDB numunelerinin 7 günlük sertleşmiş özellikleri de araştırılmıştır. 7 günlük deneyler için plastik serilerin seçilmesinin sebebi tüm dayanım sınıflarında yer almasıdır.

Bunlara ek olarak plastik serilerden üç ve akıcı serilerden iki tane olmak üzere 5’er serilik ikincil ÇLDB serileri oluşturulmuştur. Şekil 4.14’de bu seriler işaretlenmiştir.



Şekil 4.14. İkincil seriler

İkincil serilerin seçildiği noktalar, dayanım sınıfları açısından farklılık oluşturabilecek serileridir. Bu seriler işlenebilirlik açısından hem plastik hem de akıcı serileri temsil edecek şekilde seçilmiştir. İkincil serilerde kuru serilerin işlenebilirlik stabilitesini yakalamak zor olduğundan ve dayanım açısından plastik serilerden çok farklı olmadığından, kuru serilerden ikincil beton serisi seçilmemiştir. Bu seriler *P1*, *P3*, *P5*, *A1* ve *A3* serileridir. İkincil serilerin karışım oranları birincil serilerinki ile aynı olup, lif tipi ve miktarları açısından farklılık gösteren setler oluşturulmuştur. Seçilen ikincil serilerin hacimce çelik lif miktarları Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7. İkincil ÇLDB serileri

Karışım Kodu			$V_f(\%)$			
			Uzun Çelik Lif (80/60)	Kısa Çelik Lif (40/30)	Kısa Çelik Lif (40/30)	Kısa Çelik Lif (40/30)
Plastik	P1	500-0.4	0,5	0,1	0,3	1
	P3	400-0.5	0,5	0,1	0,3	1
	P5	300-0.6	0,5	0,1	0,3	1
Akıcı	A1	500-0.5	0,5	0,1	0,3	1
	A3	400-0.6	0,5	0,1	0,3	1

Tablo 4.8. Çalışmanın ikinci bölümünde üretilen tüm ÇLDB serileri ve referansları

Tip	Boy (mm)	Çap (mm)	Miktar (Hacimce %)	Seri Sayısı
Yok	-	-	0	11 [*]
Kancalı uçlu kısa çelik lif	30	0,75	0,1	5 ^{**}
Kancalı uçlu kısa çelik lif	30	0,75	0,3	5 ^{**}
Kancalı uçlu kısa çelik lif	30	0,75	0,5	11 ^{***}
Kancalı uçlu kısa çelik lif	30	0,75	1	5 ^{**}
Kancalı uçlu uzun çelik lif	60	0,75	0,5	5 ^{**}
[*] Referans serileri				
^{**} İkincil seriler				
^{***} Grafik yöntem için üretilen birincil ÇLDB serileri				

Çalışmanın ikinci kısmında üretilen tüm serilerin içerdikleri lif tipi ve bunların özellikleri bölüm başında verilmişti (Tablo 4.4). Bu kısımda üretilen bütün beton karışımlarını ve lif içeriklerini Tablo 4.8’de görmek mümkündür. Buna göre çalışmanın ikinci kısmında toplamda 42 adet beton serisi üretilmiş ve bunların gerek taze gerek sertleşmiş özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır.

Bu bölümde değinilen beton karışımlarının işlenebilirlik ve mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmış ve sonuçlar 5. Bölümde irdelenmiştir. Şekil 4.2’de verilen deney prosedürü takip edilerek yapılan çalışmalar sonucunda başarılı bir çalışma ortaya çıktığı düşünülmektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmanın bu bölümünde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları grafik veya analizler ile değerlendirilecektir. İki kısımdan oluşan deneysel çalışmaların önce birinci kısmı olan agrega granülometrisinin ÇLDB özelliklerine etkisi incelenecektir. İkinci kısımda ise deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilere dayanılarak ÇLDB'nin tasarımı için grafik tabanlı bir yaklaşım sunulacaktır. Üretilen beton serileri üzerinde yapılan deneyler ve deney prosedürü 4. Bölümde Şekil 4.2'de verilmiştir.

5.1. Agrega Granülometrisinin ÇLDB'nin Mühendislik Özelliklerine Etkisi

Çalışmanın bu bölümünde granülometri değişiminin ÇLDB üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 12 farklı granülometri oluşturulduğu ve bu granülometrilere A, AB, B ve C kodlu olanların incelik modülleri farklıyken, B'', B ve B' kodlu olanların ise incelik modülleri aynıdır. A'dan C'ye doğru ince malzeme miktarı artmaktadır. Granülometrilere D_{max} açısından iki gruba ayrılabilir. Ayrıca bütün granülometrilere incelik modülü (k), ince malzeme miktarı, agregalar arası boşluk hacmi (V_{bh}) ve ince/iri agrega oranı parametreleri açısından farklılık göstermektedirler. Bu parametreler hesaplanmış ve Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Agrega granülometrilere göre değişen özellikleri

Seri	D_{max} (mm)	İncelik Modülü (k)	İnce Agrega (%)	V_{bh} (%)	İnce/iri (%)
A	16	4,7	62	38	1,61
AB	16	4,3	68	36	2,14
B''	16	3,9	68	32	2,14
B	16	3,9	75	35	2,96
B'	16	3,9	81	37	4,36
C	16	3,2	88	34	7,28
A	31,5	5,8	32	37	0,48
AB	31,5	5,4	40	35	0,68
B''	31,5	4,9	40	31	0,68
B	31,5	4,9	48	33	0,94
B'	31,5	4,9	56	35	1,27
C	31,5	4,1	63	31	1,73

Tablo 5.1’de görüldüğü gibi incelik modülü azaldıkça, agrega kompozisyonu içerisindeki ince agrega miktarı ve dolayısıyla ince/iri agrega oranı artmaktadır. Buna göre, A’dan C’ye doğru agrega gradasyonu gitgide incelmekte ve D_{max} artışı ise gradasyonu irileştirmektedir. B'' , B ve B' gradasyonları için ise incelik modülleri aynı olduğundan ortalama agrega çapı da (d_o) aynıdır, fakat bu gradasyonlar arasında da agrega kompozisyonları açısından farklılıklar mevcuttur. Ayrıca, Tablo 5.1’de verilen agregalar arası boşluk hacmi (V_{bh}) bu çalışma açısından önemli bir parametredir. Çünkü daha önce de bahsedildiği gibi bütün beton karışımları sabit agrega hacmi ve dolayısıyla sabit çimento hamuru hacmi içermektedir. Bu sabit çimento hamuru hacmi agregalar arasındaki boşluğa dolarak tanelerin etrafını saracağından, değişen V_{bh} bütün boşlukların dolmaması ihtimali vardır. Bu durumun üretilen betonun özelliklerini etkileyeceği açıktır.

5.1.1. Taze Beton Özellikleri

Bilindiği gibi işlenebilirlik, betonun karıştırma, taşıma ve yerleştirme işlemlerinin tamamını kapsayan bir özellik olduğundan, betonun kalitesini tanımlayan en önemli özelliklerden biridir (Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991).

TS 802 (2009) standardı tarafından AB eğrisi ekonomik ve işlenebilir betonu üretmek için uygun granülometri olarak tavsiye edilmektedir. Çelik lif katkısı ile işlenebilirliğin azaldığı bilindiğinden, bu çalışmada s/ç oranı ve kimyasal katkı oranı, R-AB16 karışımının çökme değeri 10~15 cm olacak şekilde ayarlanmıştır.

Geleneksel Slump testinin, çoğunlukla mekanik vibrasyon ile uygulanan ÇLDB’nin işlenebilirlik özelliklerini belirlemekte yetersiz kaldığı bilinmektedir. ÇLDB’nin liflerin tutunma özelliği sayesinde bir arada kalma eğilimi akışkanlığın azalmasına yol açar. Bu sebeple, mekanik vibrasyon içeren Ve-Be testi ÇLDB için daha uygundur (Mehta ve Monteiro, 2006; ACI 544.1R, 2002). Bu çalışmada, hem Slump testi hem de Ve-Be testi uygulanmıştır.

Tablo 5.2’de taze beton deneylerinden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Görüldüğü gibi taze beton deneyleri 0, 30, 60 ve 90 dakikalık karıştırma süreleri sonrasında tekrar test edilmiş ve işlenebilirlik ve süre arasındaki ilişki deneysel olarak araştırılmıştır.

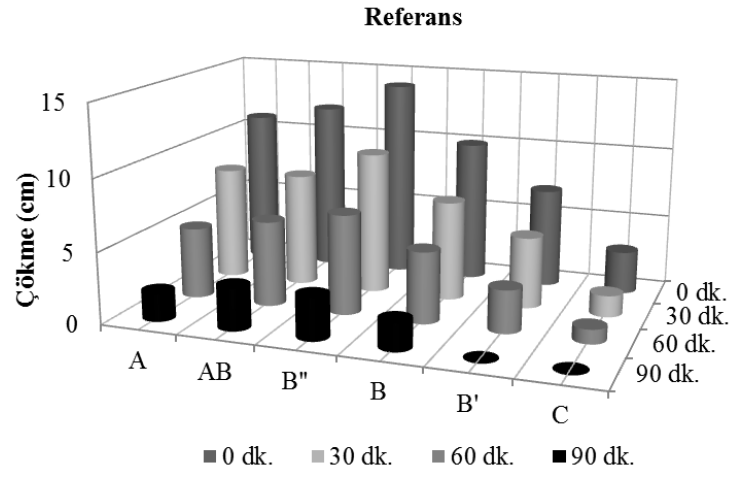
Tablo 5.2. Taze beton deneylerinin sonuçları

Seri	Çökme (cm)				Ve-Be Süresi (s)			
	0 dk.	30 dk.	60 dk.	90 dk.	0 dk.	30 dk.	60 dk.	90 dk.
R-A16	11	8	5	2	3	6	8	10
A16	1	0	0	0	10	11	13	17
A32	0	0	0	0	13	14	17	22
R-AB16	12	8	6	3	2	5	7	9
AB16	2	0	0	0	4	7	10	12
AB32	0	0	0	0	11	12	15	20
R-B"16	14	10	7	3	0,5	0,5	0,5	0,5
B"16	7	4	0,5	0	2	3	4	7
B"32	6,5	3	0	0	7	8	9	12
R-B16	10	7	5	2	2	2,5	3	4
B16	1,5	0	0	0	3,5	4,5	5,5	8,5
B32	0	0	0	0	10	11	14	16
R-B'16	7	5	3	0	2,4	3	4	5
B'16	1	0	0	0	4,5	5,5	7,5	9,5
B'32	0	0	0	0	11	12	15	17
R-C16	3	1,5	1	0	3	6	9	14
C16	0	0	0	0	6	8	11	17
C32	0	0	0	0	11,5	12,7	16	21

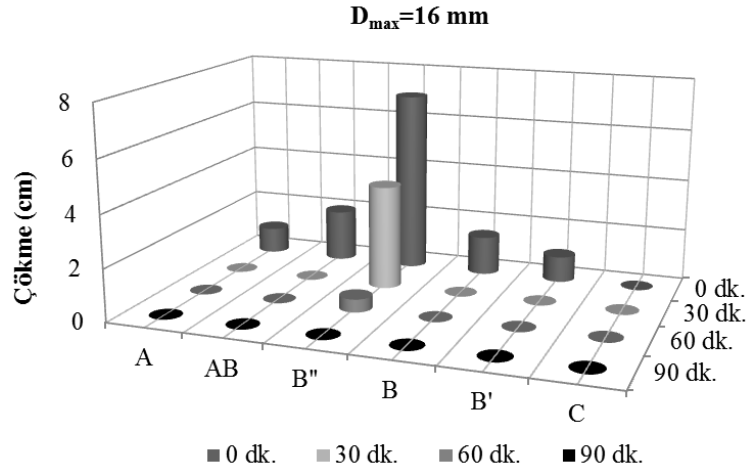
5.1.1.1. Slump Deneyi

Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3’de verilen grafiklerde slump deneyi sonucunda elde edilen çökme değerlerinin referans, $D_{max}=16$ mm ve $D_{max}=31,5$ mm serileri için değişimi görülmektedir. Beklendiği gibi, uzun çelik liflerin katkısı ile işlenebilirlik oldukça azalmıştır (Şekil 5.1 ve 5.2) ve hatta çoğu ÇLDB karışımının çökme değeri sıfırdır (Şekil 5.3 ve 5.4). Dolayısıyla ÇLDB’ler açısından işlenebilirlik farklarını ortaya koyabilmek bu test ile mümkün olmamıştır. Literatürde tavsiye edildiği gibi Ve-Be testi yapılmıştır (ACI 544.1R, 2002).

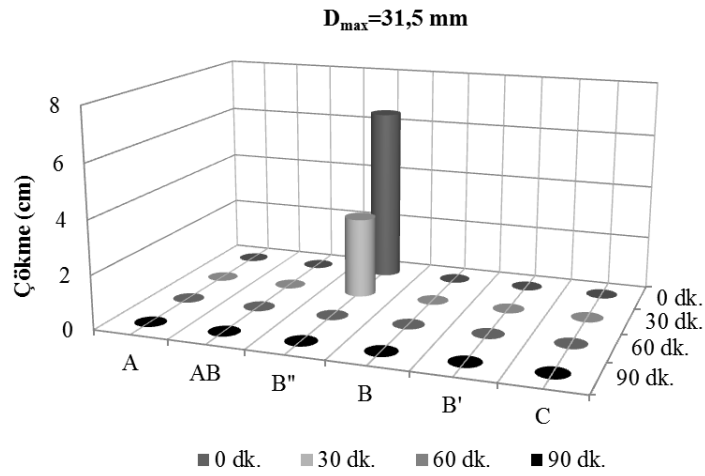
Normal betonun çökme değerinin karıştırma süresi ile önemli derecede azaldığı bilinmektedir (Vijayalakshmi vd, 2013). Bu çalışmada ise gerek referans gerek ÇLDB açısından bakıldığında çökme değerlerinin 0, 30, 60 ve 90 dakikalık karıştırma süreleri sonunda gitgide azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3). Öyleyse tıpkı normal betonda olduğu gibi ÇLDB’nin işlenebilirliğinin de zamanla azaldığı söylenebilir.



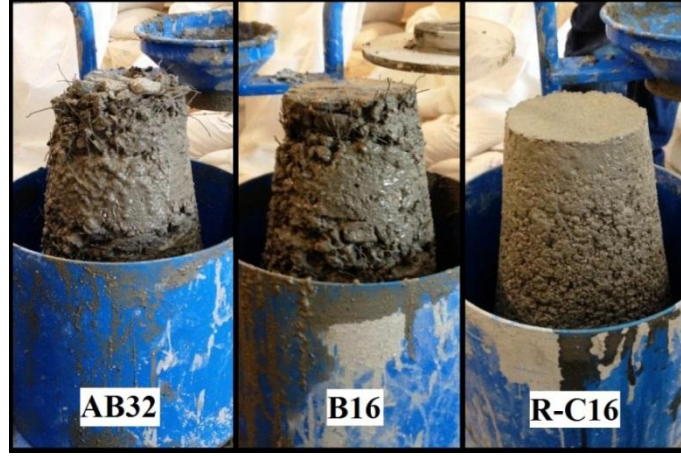
Şekil 5.1. Referans karışımları için çökme değerleri



Şekil 5.2. $D_{max}=16$ mm ÇLDB'ler için çökme değerleri



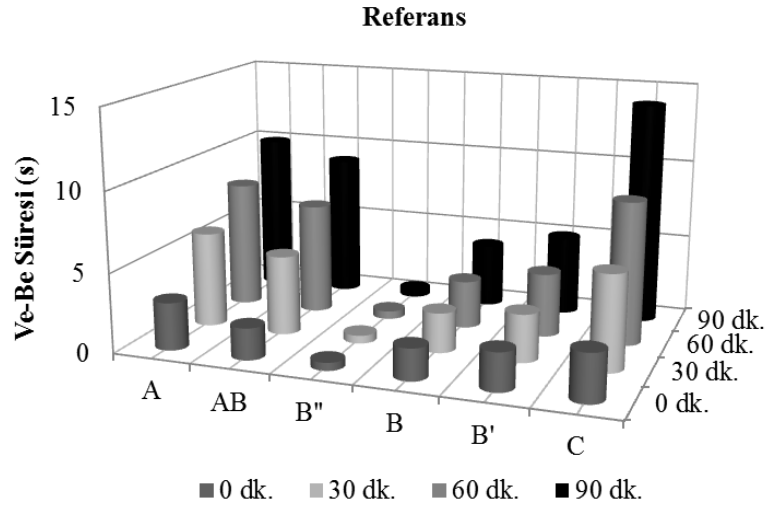
Şekil 5.3. $D_{max}=31,5$ mm ÇLDB'ler için çökme değerleri



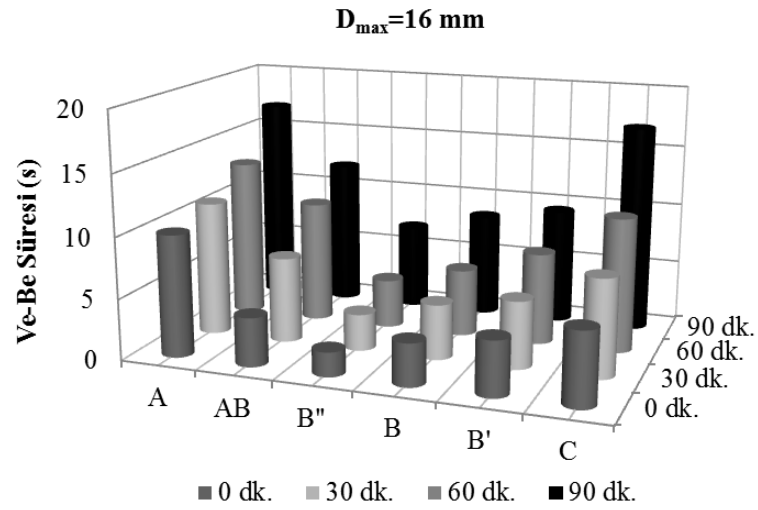
Şekil 5.4. Sıfır çökme değerine sahip taze beton karışımları

5.1.1.2. Ve-Be Deneyi

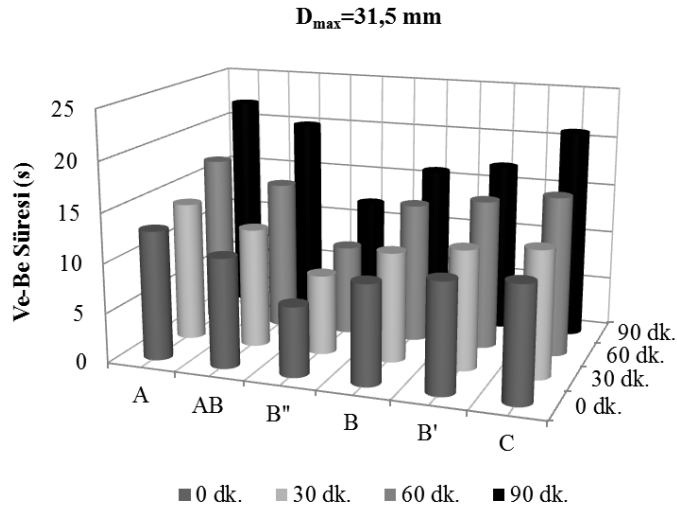
Karışımların deney sonucunda elde edilen Ve-Be sürelerinin değişimi, Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7’de verilmiştir. Çelik liflerin eklenmesi ile işlenebilirlikteki azalma, Ve-Be süresinin artmasına yol açmıştır (Şekil 5.5 ve 5.6). Şekil 5.6 ve 5.7 karşılaştırıldığında görülür ki; özellikle D_{max} ’ın da artması ile Ve-Be süreleri daha da artmış ve işlenebilirlik olumsuz etkilenmiştir.



Şekil 5.5. Referans karışımları için Ve-Be süreleri



Şekil 5.6. $D_{max}=16 \text{ mm}$ ÇLDB'ler için Ve-Be süreleri



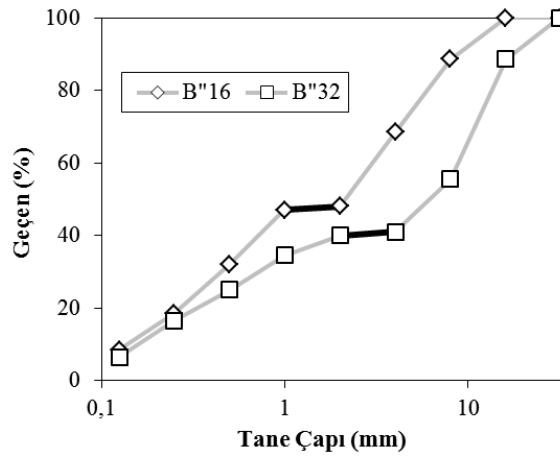
Şekil 5.7. $D_{max}=31,5 \text{ mm}$ ÇLDB'ler için Ve-Be süreleri

Ayrıca granülometri değişiminin de hem normal betonun hem de ÇLDB'nin işlenebilirliklerinin üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.5'de referans karışımlarının işlenebilirliklerinin oldukça farklı özellikler sergilediği görülmektedir.

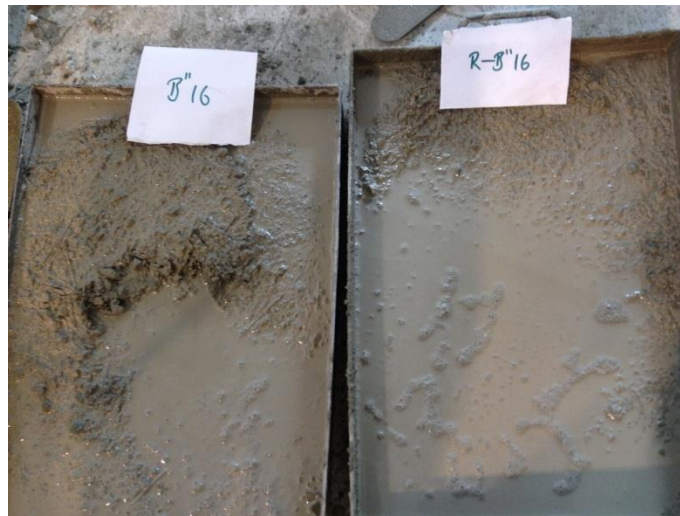
$R-B''$ 16 karışımı en düşük Ve-Be süresine sahip karışımdır. B'' granülometrisine sahip ÇLDB karışımları da diğerlerine göre en işlenebilir karışımlardır (Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7). Çünkü B'' granülometrisi kesikli granülometriye (Şekil 5.8) benzerdir ve bu durumun işlenebilirliği arttırıcı etkisi olduğu bilinmektedir. Fakat kesikli gradasyonun segregasyon riski taşıdığı da unutulmamalıdır. Kesikli gradasyon elek sınıfları arasında bir veya birkaç

grup agreganın eksikliğinden veya yokluğundan kaynaklanır (Neville, 1991). Şekil 5.9'da B'' granülometrisine sahip taze betonların fotoğrafları verilmiştir.

A, AB, B ve C granülometreleri için, Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7 incelendiğinde A'dan C'ye doğru işlenebilirliğin önce artıp sonra azaldığı görülür. AB ve B karışımlarının işlenebilirlikleri çok farklı olmamakla birlikte, C granülometrisine sahip karışımların işlenebilirlik performanslarının düşük olduğu söylenebilir. Bu çalışmadaki en ince (en fazla ince ve en az iri agrega içeren, incelik modülü en az) granülometri C'dir (Tablo 5.1). Bilindiği gibi, agrega granülometrisi incelidikçe agregaların yüzey alanı artmakta ve bu yüzeyi ıslatmak için gerekli su ihtiyacı da artmaktadır. Dolayısıyla ince granülometriye sahip beton karışımlarının zayıf işlenebilirlik sergilemesi beklenir (Alexander ve Mindess, 2005; Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991).



Şekil 5.8. Kesikli granülometriye benzeyen B'' gradasyonları



Şekil 5.9. B'' granülometrisine sahip agrega içeren taze betonlar

A granülometrisi ise bütün granülometri eğrileri arasındaki en iri (en az ince ve en fazla iri agrega içeren, incelik modülü en yüksek) granülometridir. A granülometrisine sahip karışımlar da işlenebilirlik açısından özellikle ÇLDB karışımları için düşük performanslar sergilemişlerdir. Bilindiği gibi, çok fazla iri agrega içeren betonlar, işlenebilirliği kötü ve katı kıvamlı betonlardır (Mehta ve Monteiro, 2006). Üretim sürecinde, her iki D_{max} değeri için, A granülometrisine sahip beton karışımlarının da kalıba yerleştirilmesinin daha zor ve diğerlerine göre daha uzun süre vibrasyon gerektirdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.10'da A granülometrisine sahip beton numunelerin yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 5.10. A32 granülometrisine sahip beton numunelerin yüzey durumları

Daha büyük D_{max} 'a sahip karışımların ise işlenebilirliğinin daha düşük olduğundan bahsedilmişti (Şekil 5.6 ve 5.7). Bu da daha iri agregaların, daha zayıf işlenebilirliğe yol açabileceğini ispatlar. Özellikle çelik lif katkısı ile lif topaklanmasına yol açabileceğinden, ACI 544.1R (2002) raporunda D_{max} ve granülometri özelleştirilmiştir. Bu özelliklerden daha önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bu çalışmada ise A'dan C'ye doğru, granülometrinin incilmesi işlenebilirliği bir noktaya kadar olumlu etkilemiştir.

Aynı incelik modülüne sahip B'', B ve B' gradasyonları karşılaştırıldığında, işlenebilirliğin B'''den B'ye doğru azaldığı görülür (Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7). Bunun sebebi gitgide artan ince agrega oranı ve yüzey alanıdır, çünkü agreganın yüzey alanı arttıkça işlenebilirlik azalır (Çelik ve Marar, 1996).

Son olarak Ve-Be süresi ile karıştırma süresi arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7), Ve-Be sürelerinin 0'dan 90. dk ya kadar oldukça arttığı gözlemlenir. Fakat zaman ile bu artış, karışımların birbirlerine göre işlenebilirlik durumlarını etkilememiştir.

Slump ve Ve-Be deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında Ve-Be sonuçlarının daha değişkenlik gösterdiği görülür. Çoğu çökme değerlerinin sıfıra gittiği verilerde Ve-Be verilerinin değişken olduğu üstelik verilerin farklı değerler aldığı düşünüldüğünde (Şekil 5.6 ve 5.7), Ve-Be testinin özellikle sıfır çökme değerine sahip ÇLDB'nin işlenebilirliğini ölçmek için daha uygun bir deney metodu olduğu söylenebilir.

5.1.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Tablo 5.3 en az üçer numunenin ortalama değerleri alınarak elde edilmiş sertleşmiş beton dayanımlarını vermektedir. Bu bölümde ÇLDB numuneleri iki grupta incelenmiştir: ilk grup farklı incelik modüllerine sahip A, AB, B ve C granülometreleri ile üretilmiş numunelerden, ikinci grup ise aynı incelik modüllerine, farklı ince agrega içeriklerine sahip B'', B ve B' granülometreleri ile üretilmiş numunelerden oluşmaktadır.

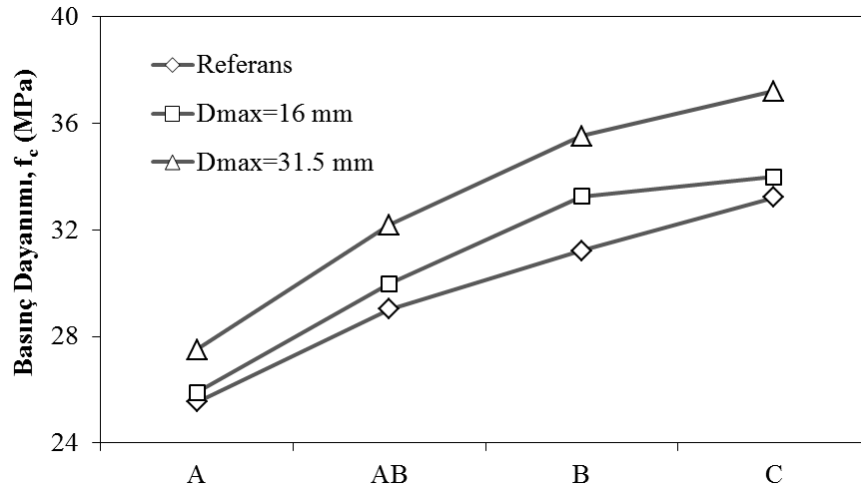
Tablo 5.3. Mekanik özellikler

Seri	Basınç Dayanımı (f_c) (MPa)	Yarma Dayanımı (f_{st}) (MPa)	Eğilme Dayanımı (f_{flex}) (MPa)
R-A16	25,5	2,2	3,5
A16	25,9	3,5	6,6
A32	27,5	4,0	7,5
R-AB16	29,0	2,4	3,6
AB16	29,9	3,7	7,5
AB32	32,2	4,3	8,4
R-B''16	34,2	3,0	3,9
B''16	35,4	4,2	9,5
B''32	40,6	5,1	10,5
R-B16	31,2	2,8	3,7
B16	33,3	3,9	8,4
B32	35,5	4,4	9,1
R-B'16	26,9	2,7	3,5
B'16	28,2	3,5	7,4
B'32	31,4	3,9	8,6
R-C16	33,2	2,9	3,8
C16	33,9	3,9	8,5
C32	37,2	4,5	9,2

Bilindiği gibi ÇLDB'nin mekanik özellikler arasında bir ilişki mevcuttur (Xu ve Shi, 2009; Nataraja vd., 2001; Perumal, 2015; Ramadoss ve Nagamani, 2006). Bu çalışmada mekanik özellikler arasındaki ilişki regresyon analizi ile araştırılmıştır.

5.1.2.1. Basınç Deneyi

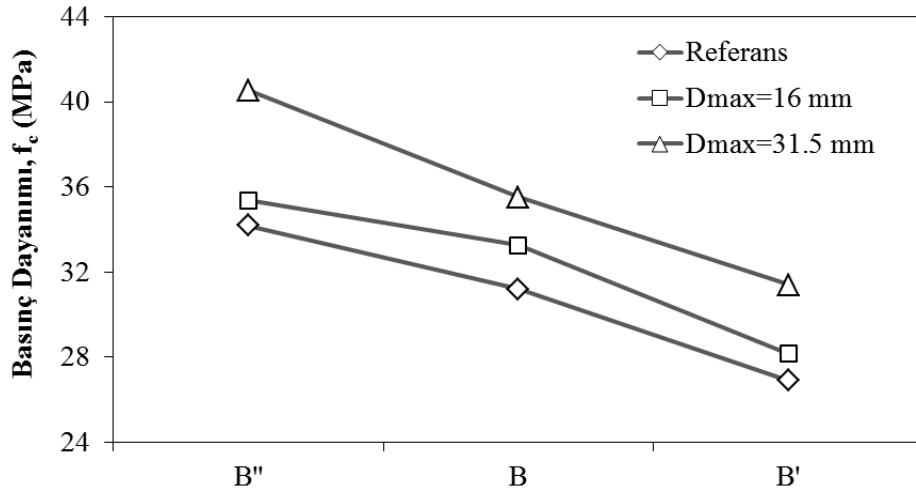
Şekil 5.11 ve 5.12 numunelerin basınç dayanımlarının değişimlerini göstermektedir. Agrega gradasyonunun değişimi hem referans hem de ÇLDB'nin basınç dayanımı üzerinde etkilidir. Sabit çimento dozajı ve s/ç oranı ile agrega granülometrisinin ve özellikle D_{max} 'ın değişimi basınç dayanımını etkilemiştir. D_{max} 'ın artması ile basınç dayanımı da artmıştır. Çelik liflerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi ise diğer dayanımlara nispeten daha azdır. Granülometrinin, özellikle D_{max} değişiminin, ÇLDB'nin basınç dayanımı üzerinde çelik liflere göre daha etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 5.11. A, AB, B ve C granülometrilere sahip numunelerin basınç dayanımları

Şekil 5.11 incelendiğinde, her iki D_{max} değeri için incelik modülündeki azalmanın hem referans hem de ÇLDB'nin basınç dayanımının artmasına sebep olduğu görülür. Şekil 5.12'de ise incelik modülü sabit iken hem referans hem de ÇLDB'lerin basınç dayanımları düşmüştür. Bunun sebebi B'' 'den B' 'ye doğru agregalar arasındaki boşluk hacminin (V_{bh}) artması (Tablo 5.1) ve sabit çimento hamuru hacminin bu boşlukları yeterli derecede dolduramamasıdır. Bilindiği gibi beton içerisinde çimento hamuru tarafından doldurulamayan boşluklar mekanik performansın zayıflamasına sebep olmaktadır (Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991). Burada da gerçekleşen bu durum ile basınç dayanımı,

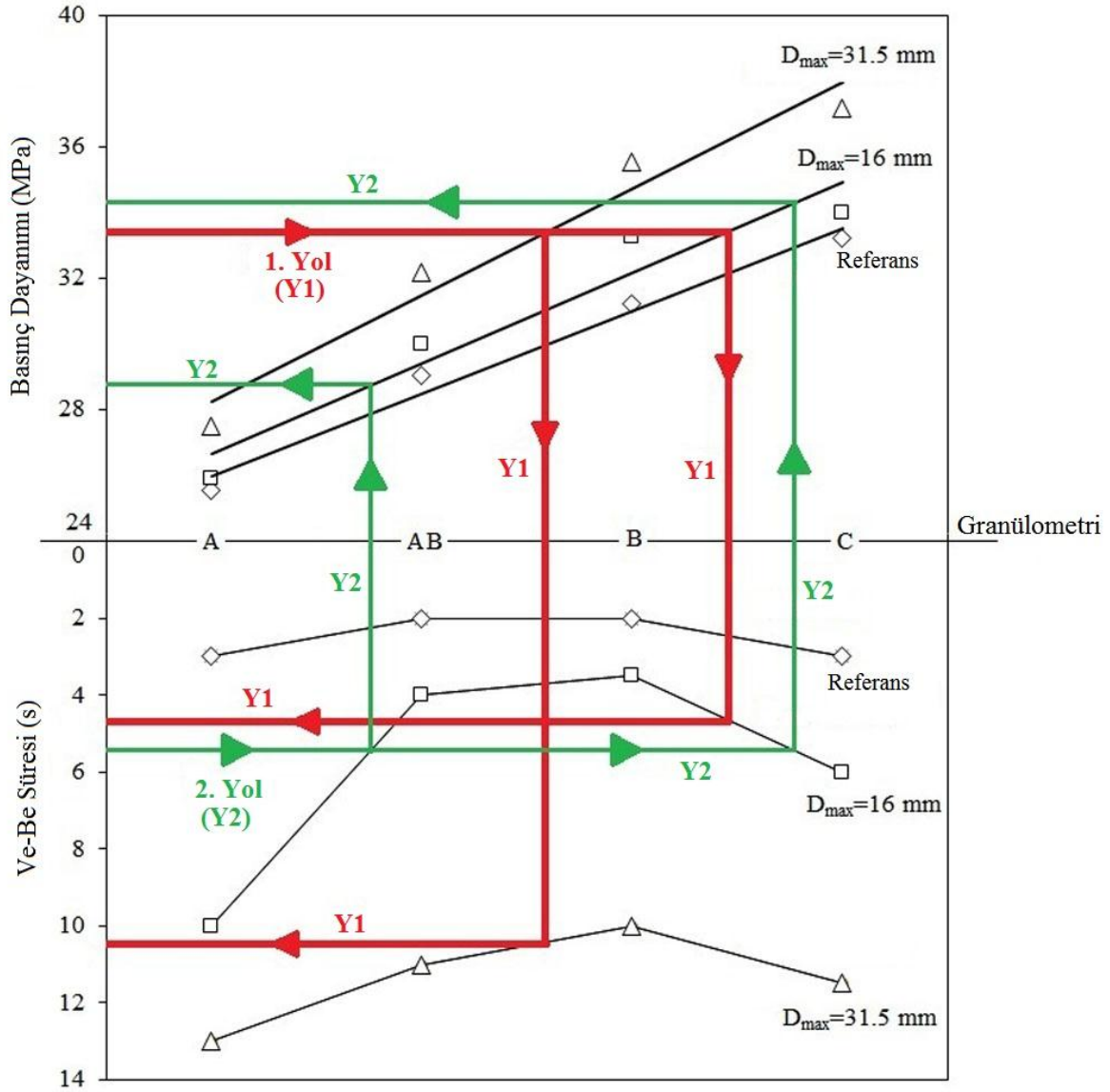
B'' 'den B' 'ye doğru düşüş göstermiştir. Şekil 5.11'de ise A 'dan C 'ye doğru basınç dayanımının artışı ise aynı sebepten yani gradasyonun incelmesi ile V_{bh} 'ın düşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca düşük işlenebilirlik de beton içerisindeki boşluk oranının artmasına yol açabilmektedir (Mehta ve Monteiro, 2006; Neville, 1991). Bütün bu numuneler içerisinde B'' granülometrisine sahip olan numuneler en yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşmışlardır.



Şekil 5.12. B'' , B ve B' granülometrisine sahip numunelerin basınç dayanımları

Şekil 5.11'de en ince agrega granülometrisine sahip olan C serisinin basınç dayanımı (f_c^C) en yüksek basınç dayanımı değeridir. En iri agrega granülometrisi olan A ise en düşük basınç dayanımına (f_c^A) sahip seridir. Buna göre, sabit çimento dozajı ve s/ϕ oranı göz önünde bulundurulduğunda, sadece agrega granülometrisi değiştirilerek ÇLDB'nin basınç dayanımını $D_{max}=16$ mm için %30 ve $D_{max}=31,5$ mm için %35'lere kadar arttırmak mümkündür. Yapı maliyetleri üzerinde en etkili parametre betonun basınç dayanımıdır. Ekonomik değer, dayanım düştükçe düşme eğilimindedir. Ayrıca çimento da beton içerisindeki en pahalı malzeme (ÇLDB için liflerden sonra) olarak (neredeyse agrega maliyetinin 10~15 katı) betonun basınç dayanımı üzerindeki en etkili parametredir (Kim vd., 2013; Mehta ve Monteiro, 2006; Narasimhan ve Chew, 2009; Neville, 1991). Bu çalışmada ise çimento dozajı sabit tutularak agrega gradasyonu değişimi ile basınç dayanımı artışı sağlanabilmektedir. Çelik lif miktarının da sabit tutulduğu düşünülürse, bütün ÇLDB karışımlarının maliyeti aynıdır. Fakat ÇLDB maliyeti X olarak kabul edilirse, ÇLDB'nin birim basınç dayanım (1 MPa) maliyeti her bir karışım için değişir. Örneğin A gradasyonu için birim basınç dayanım maliyeti (1 MPa), X/f_c^A olarak hesaplanırken, C

gradasyonu için X/f_c^C olur. $f_c^C > f_c^A$ olduğundan, diğer bileşenler sabit hacimlerde tutularak gradasyonun değişimi (incelik modülünün azalması) birim basınç dayanım maliyetini (1 MPa) düşürecektir. Özetle, ekonomik değer üzerinde çimentodan daha az etkili bileşen olan agrega (Kim vd., 2013), birim basınç dayanım maliyeti açısından daha ekonomik ÇLDB karışımları üretilmesini sağlar.



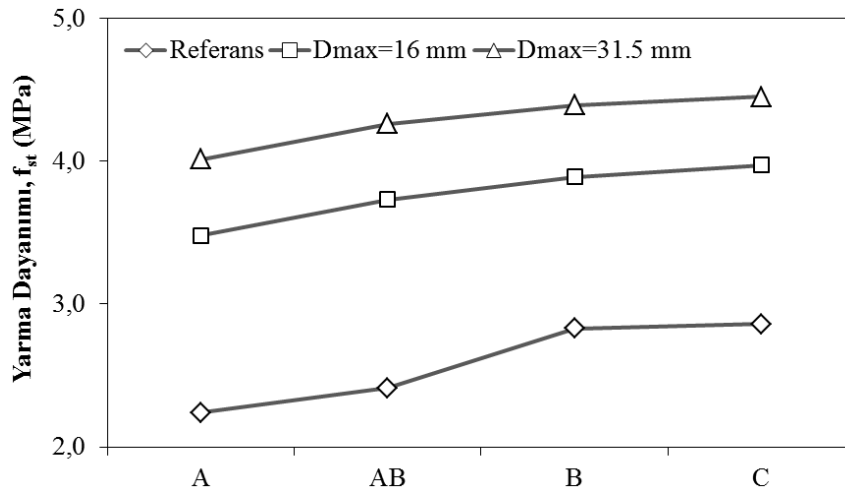
Şekil 5.13. Basınç dayanımı ve işlenebilirlik arasındaki ilişki

İşlenebilirlik ile dayanım arasındaki ilişkiyi de belirleyebilmek açısından Şekil 5.13’de verilen genel karşılaştırmayı incelemek faydalı olacaktır. A, AB, B ve C gradasyonları için referans karışımlarının Ve-Be süreleri birbirine yakınken, ÇLDB’lerinki daha değişken bir

davranış göstermiştir. Bu değişkenlik ÇLDB'lerin basınç dayanımları ile kıyaslanabilir. Grafikte 1. Yol (Y1) takip edildiğinde, belirli bir basınç dayanımı değeri için daha büyük D_{max} ile ÇLDB üretimi tercih edildiğinde işlenebilirlik düşmektedir. 2. Yol (Y2) takip edildiğinde ise, incelik modülünün düşmesi ve ince agrega miktarının artması sabit işlenebilirlik için daha büyük dayanım değeri sağlamaktadır. Bu durum her iki D_{max} için de geçerlidir. Burada, sabit çimento dozajı ve s/ϕ oranında, daha işlenebilir ÇLDB elde etmek için D_{max} 'ı küçük olan malzemenin kullanılması gerektiği söylenebilir.

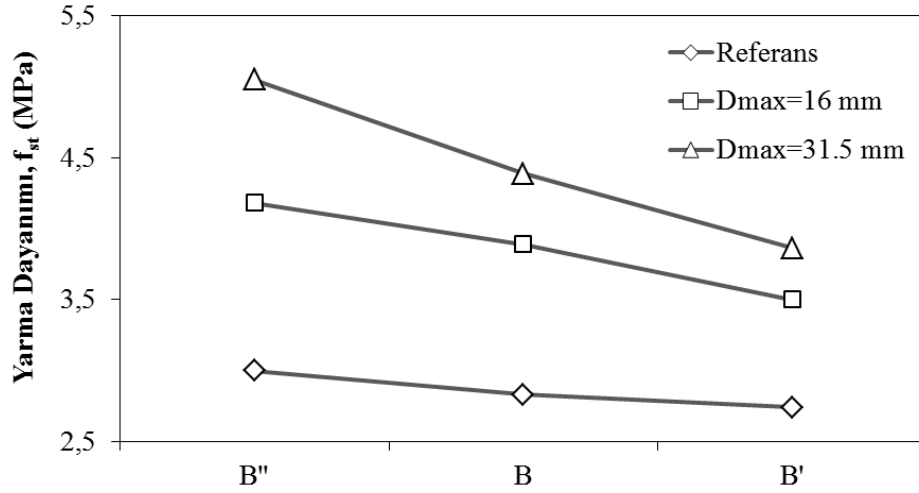
5.1.2.2. Yarma Deneyi

Şekil 5.14 ve 5.15 sertleşmiş beton serilerin yarma dayanımlarını vermektedir. Agrega gradasyonu hem referans hem de ÇLDB'lerin yarma dayanımları üzerinde etkilidir. Sabit çimento dozajı ve s/ϕ oranı için, granülometri değişimi ve D_{max} yarma dayanımını etkilemiştir. Çelik lif katkısının ise basınca göre yarma dayanımı üzerinde oldukça olumlu etkisi olmuştur. Beklendiği ve literatürde de bugüne kadar kaydedildiği gibi çelik lifler çekme dayanımını arttırmışlardır.



Şekil 5.14. A, AB, B ve C granülometrilere sahip numunelerin yarma dayanımları

Hem referans hem de aynı oranda lif içeren ÇLDB'ler için, yarma dayanımı A'dan C'ye doğru artmıştır (Şekil 5.14). Her iki D_{max} değeri için de geçerli olan bu durum, A'dan C'ye doğru giden gradasyonda V_{bh} 'ın azalmasından kaynaklanabilir (Tablo 5.1). Ayrıca ince malzeme artışının ÇLDB özellikleri üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu daha önceki bölümlerde (3. Bölüm) açıklanmıştı.



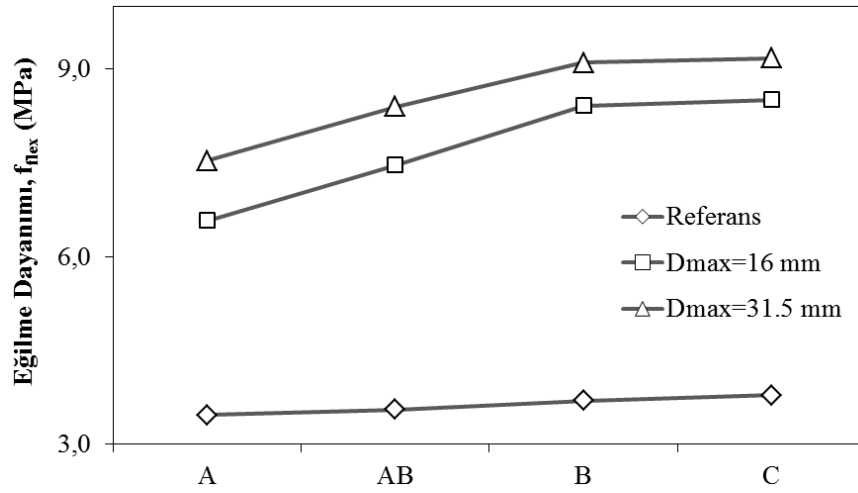
Şekil 5.15. B'', B ve B' gradasyonlarına sahip numunelerin yarma dayanımları

Şekil 5.15'de ise B'''den B' 'ye doğru V_{bh} 'ın artması ile dayanım düşmüştür. Betondaki boşluk hacminin mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisi bir yana, basınç dayanımında olduğu gibi D_{max} artışı yarma dayanımını da olumlu etkilemiştir (Şekil 5.14 ve 5.15). B'' gradasyonuna sahip numuneler yarma dayanımında da en yüksek değere ulaşmışlardır.

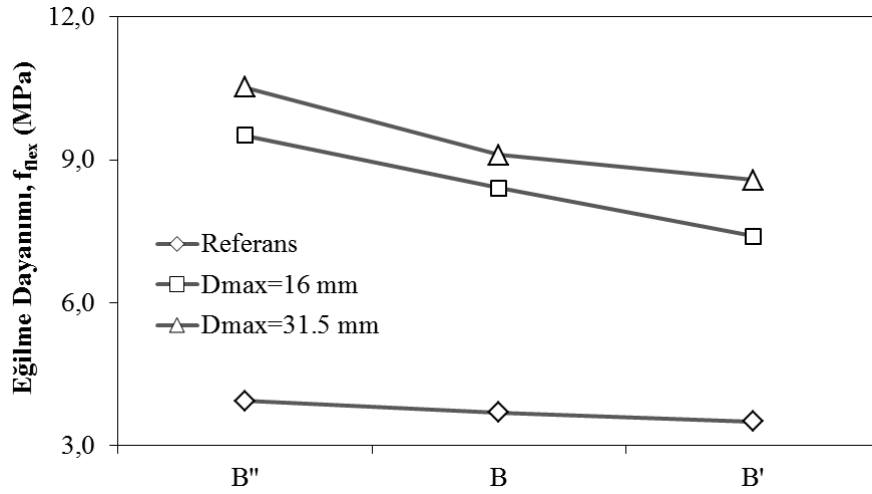
5.1.2.3. Eğilme Deneyi

Şekil 5.16 ve 5.17 numunelerin maksimum eğilme dayanımlarını göstermektedir. Agrega gradasyonu hem referans hem de ÇLDB'lerin eğilme dayanımları üzerinde etkilidir. Gradasyonun değişimi ve D_{max} , sabit çimento dozajı ve s/ç oranı ile üretilen beton serilerinin eğilme dayanımlarını etkilemiştir. Çelik lifler eğilme dayanımını önemli ölçüde iyileştirmişlerdir. Çelik liflerin betonun sünekliğini arttırdığı ve eğilme dayanımlarını oldukça olumlu etkilediğinden daha önceki bölümlerde bahsedilmişti. Beklendiği gibi bu çalışmada da hacimce %1 oranında narinliği yüksek uzun çelik lif katkısı eğilme dayanımını olumlu etkilemiştir.

Gerek referans gerek aynı oranda lif içeren ÇLDB'ler için, A'dan C'ye doğru gradasyon incelidikçe (Tablo 5.1), V_{bh} azalmış ve eğilme dayanımı artmıştır (Şekil 5.16). Bu durum her iki D_{max} değeri için de geçerlidir. Basınç dayanımında açıklandığı gibi, burada da lif miktarı ve beton bileşenleri sabit tutularak agrega granülometrisinin değişimi ile ÇLDB'nin birim eğilme dayanımı maliyeti düşürülebilir.

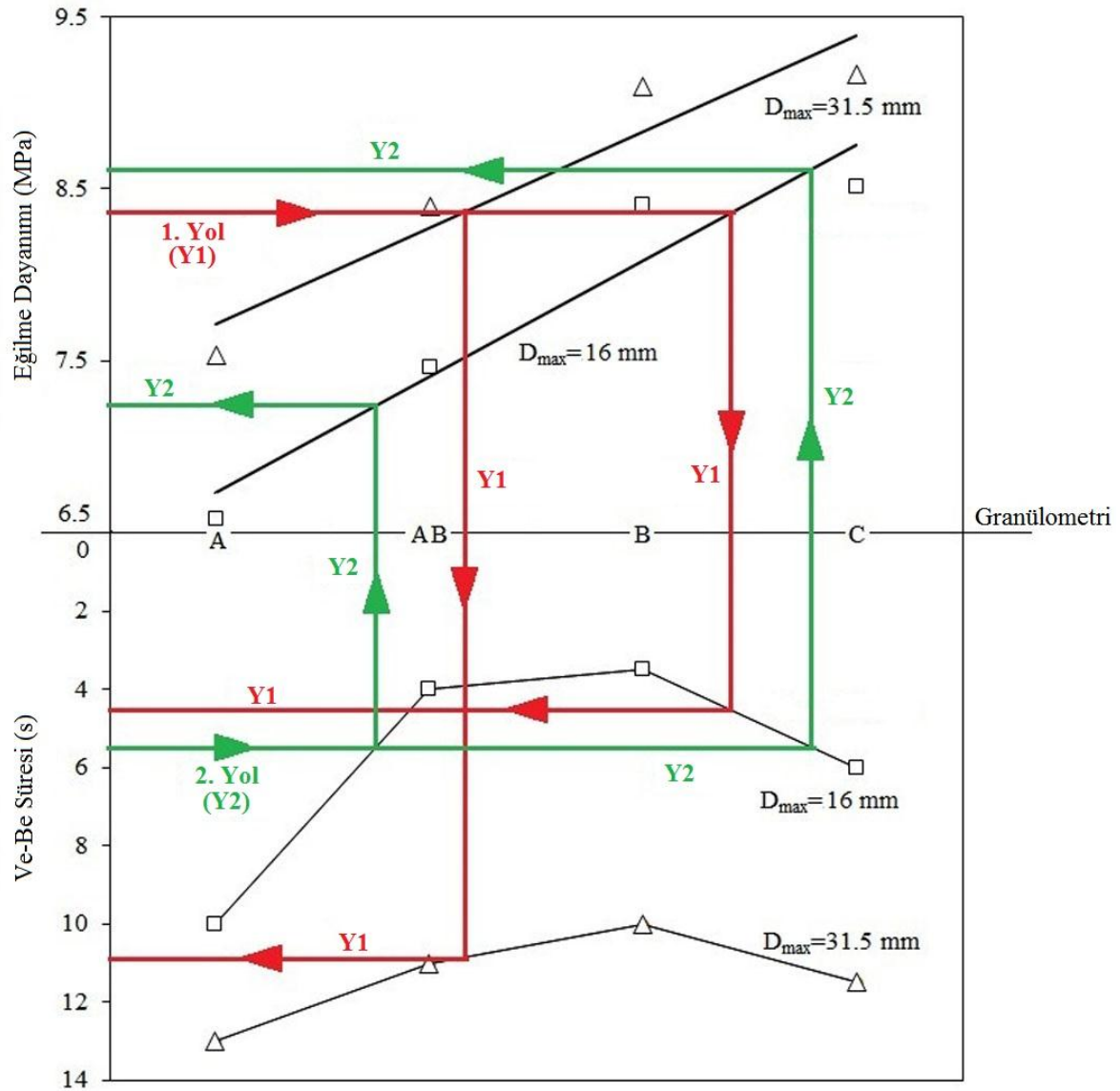


Şekil 5.16. A, AB, B ve C granülometrilere sahip numunelerin eğilme dayanımları



Şekil 5.17. B'', B ve B' granülometrilere sahip numunelerin eğilme dayanımları

Şekil 5.17'de, eğilme dayanımı B'''den B'ye doğru artan V_{bh} ile düşme eğilimi göstermiştir (Tablo 5.1). Dahası basınç dayanımındakine benzer şekilde, D_{max} 'ın artışı eğilme dayanımını da arttırmıştır (Şekil 5.16 ve 5.17). Fakat burada kullanılan D_{max} değerlerinin her ikisi de lif boyundan daha küçük olduğu unutulmamalıdır. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da, ÇLDB'lerin eğilme dayanımlarının referanslarındakilere göre daha değişken değerlere sahip olmasıdır. Yani granülometri değişimi ÇLDB'yi normal betona göre daha çok etkilemektedir. Bütün beton serileri içerisinde en büyük eğilme dayanımına B'' granülometrisine sahip olanlar ulaşmıştır.

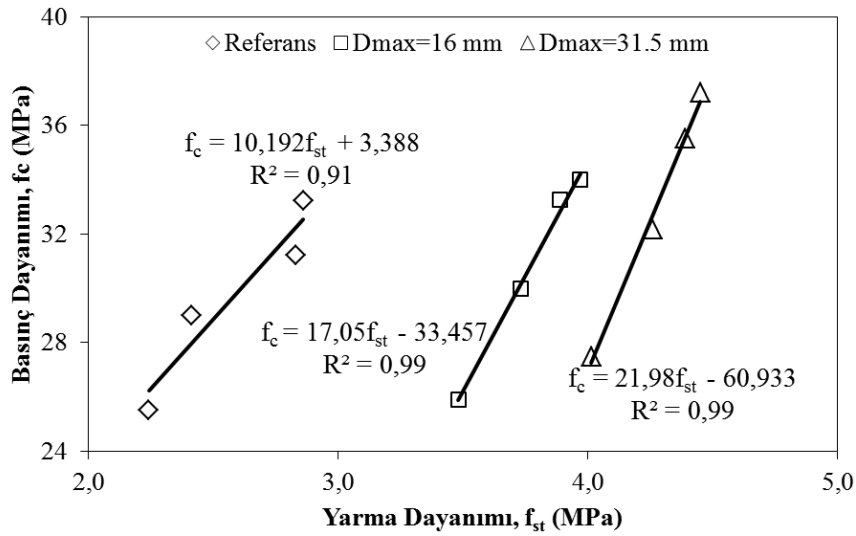


Şekil 5.18. Eğilme dayanımı ve işlenebilirlik arasındaki ilişki

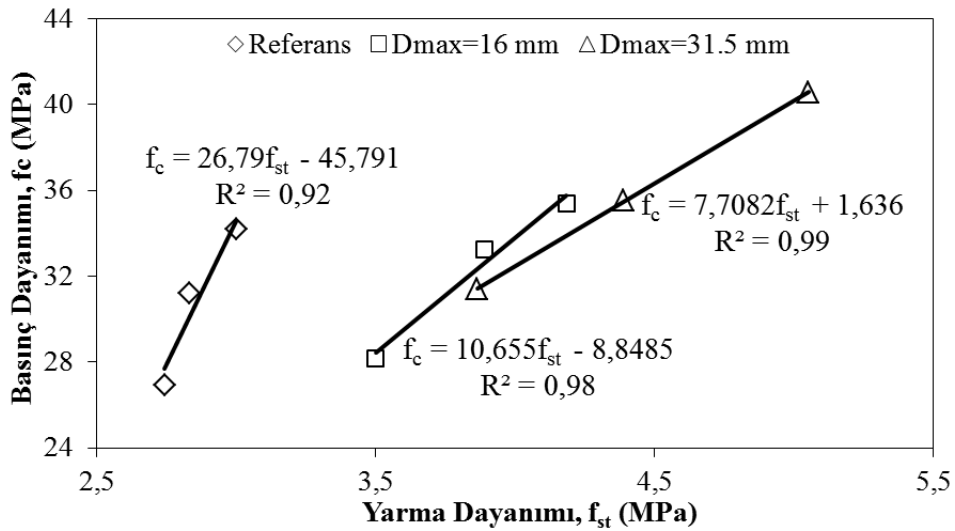
Şekil 5.18’de ise A, AB, B ve C granülometrilerine sahip ÇLDB’lerin Ve-Be süreleri ile eğilme dayanımları arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Burada da basınç dayanımındaki benzer özellikler göze çarpmaktadır. Burada referansların eğilme dayanımları birbirinden çok farklı olmadığından ihmal edilmiştir. 1. Yol (Y1) takip edildiğinde, daha büyük D_{max} ile işlenebilirliği düşük ÇLDB’ler üretilebildiği görülür. 2. Yol (Y2) takip edildiğinde ise, daha ince agrega granülometrisi ile daha yüksek eğilme dayanımları sabit bir işlenebilirlik değeri için elde edilmiştir. Basınç dayanımına benzer şekilde, daha işlenebilir ÇLDB üretebilmek için, beton bileşenleri değişmeden daha küçük D_{max} tercih edilmelidir.

5.1.2.4. Basınç ve Yarma Dayanımları Arasındaki İlişki

Şekil 5.19 ve 5.20'deki grafikler, basınç (f_c) ve yarma (f_{st}) dayanımları arasındaki ilişkiyi sunmaktadırlar. Deneysel veriler üzerinde regresyon analizi yapılmış ve ampirik ilişkiler Şekil 5.19'da A, AB, B ve C granülometrilere ve Şekil 5.20'de ise B'', B ve B' granülometrilere için gösterilmiştir. Burada sunulan özellikler arasında %90'ın üzerinde korelasyonlar tespit edilmiştir.



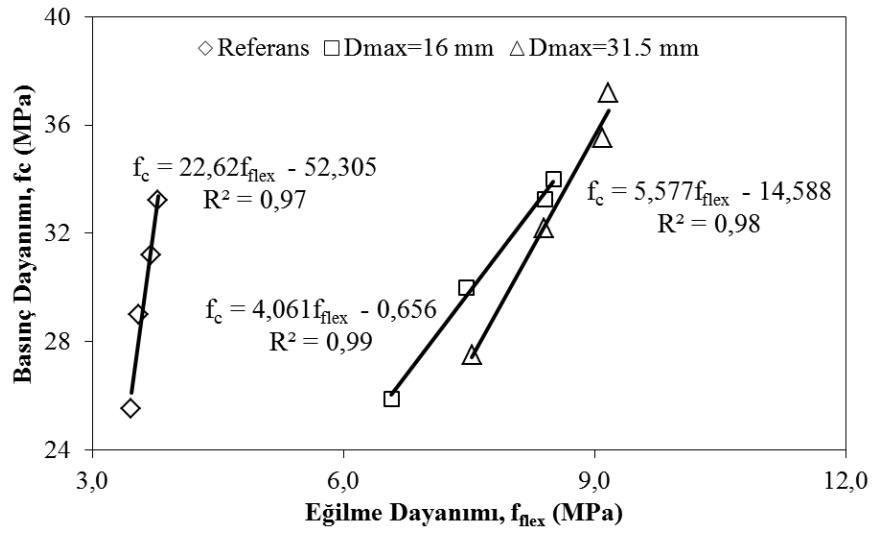
Şekil 5.19. A, AB, B ve C granülometrilere için basınç ve yarma dayanımları arasındaki ilişki



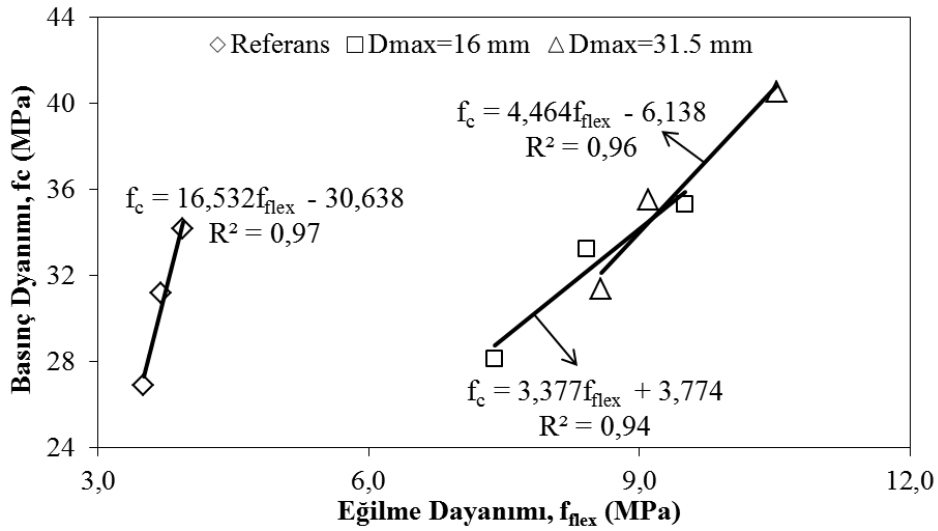
Şekil 5.20. B'', B ve B' granülometrilere için basınç ve yarma dayanımları arasındaki ilişki

5.1.2.5. Basınç ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki

Basınç (f_c) ve eğilme (f_{flex}) dayanımları arasındaki regresyon analizleri A, AB, B ve C granülometreleri için Şekil 5.21 ve B'', B ve B' granülometreleri için Şekil 5.22'de görülmektedir. Analiz sonucunda bu iki dayanım arasındaki korelasyonlar %90'ın üzerinde tespit edilmiştir.



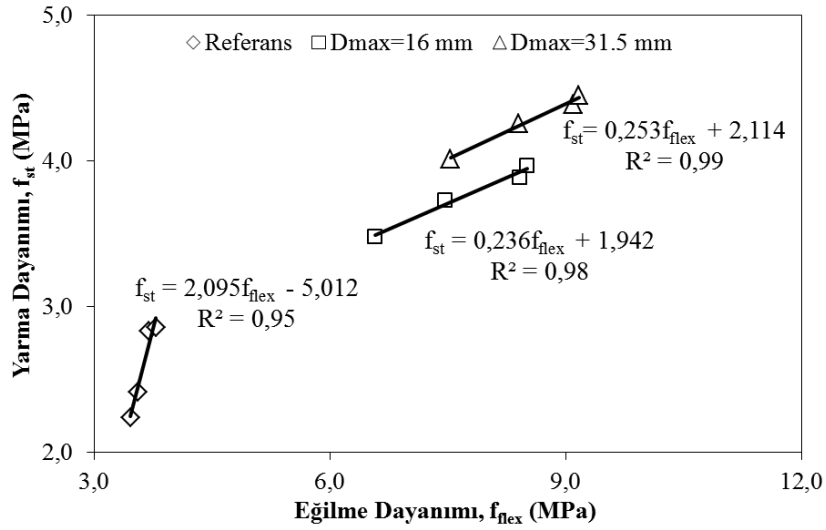
Şekil 5.21. A, AB, B ve C granülometreleri için basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki



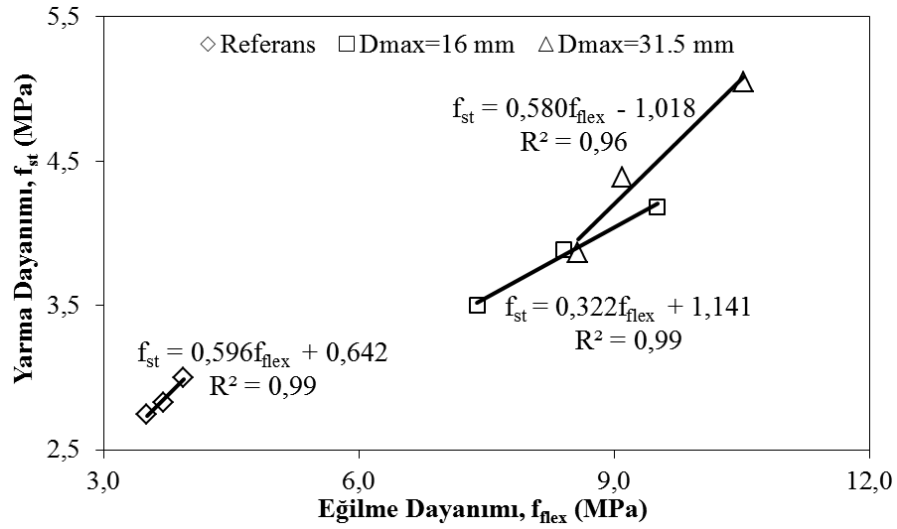
Şekil 5.22. B'', B ve B' granülometreleri için basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki

5.1.2.6. Yarma ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki

Yarma (f_{st}) ve eğilme (f_{flex}) dayanımları arasındaki ilişki de regrasyon analizi ile incelenmiş ve sonuçlar Şekil 5.23 ve 5.24’de verilmiştir. Bu iki çekme dayanımı arasında ise %95’in üzerinde daha güçlü bir korelasyon bulunmuştur.



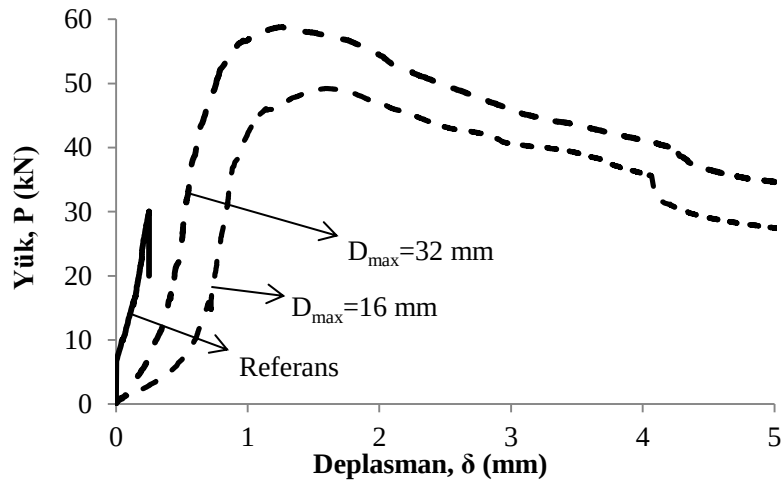
Şekil 5.23. A, AB, B ve C granülometreleri için yarma ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki



Şekil 5.24. B'', B ve B' granülometreleri için yarma ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki

5.1.2.7. Tokluk

Kiriş numunelerin eğilme deneyi sırasında elde edilen yük (P) –deplasman (δ) verileri sayesinde ÇLDB’lerin toklukları hesaplanmıştır. Şekil 5.25’de bu çalışmada üretilmiş bazı ÇLDB numunelerine ve bir referans numunesine ait örnek yük-deplasman grafikleri verilmiştir. Tokluk (T) değerleri ise bu grafiklerin altında kalan toplam alan hesaplanarak bulunmuştur. Tablo 5.4’de en az üç kiriş numunesinin ortalaması alınarak hesaplanmış ÇLDB numunelerin tokluk değerleri görülmektedir.



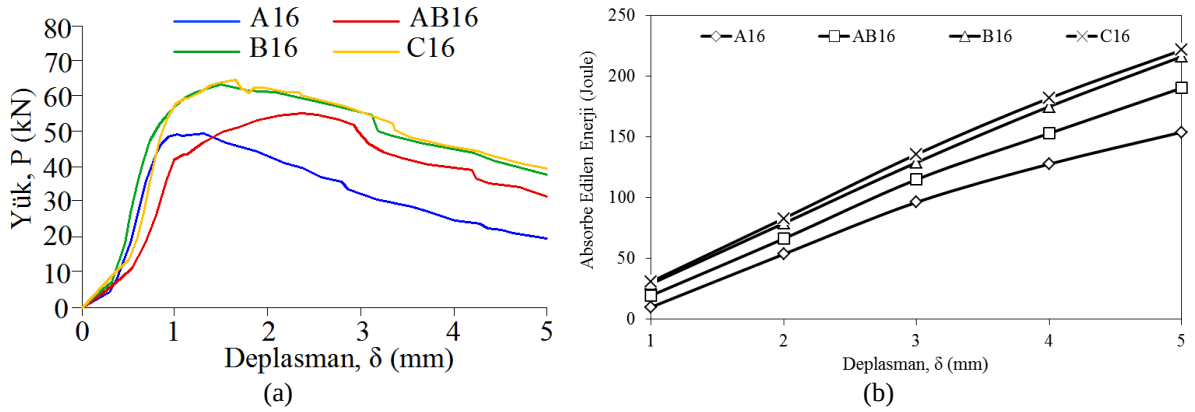
Şekil 5.25. Örnek yük-deplasman eğrileri

Tablo 5.4. ÇLDB’lerin absorbe ettikleri enerji miktarları

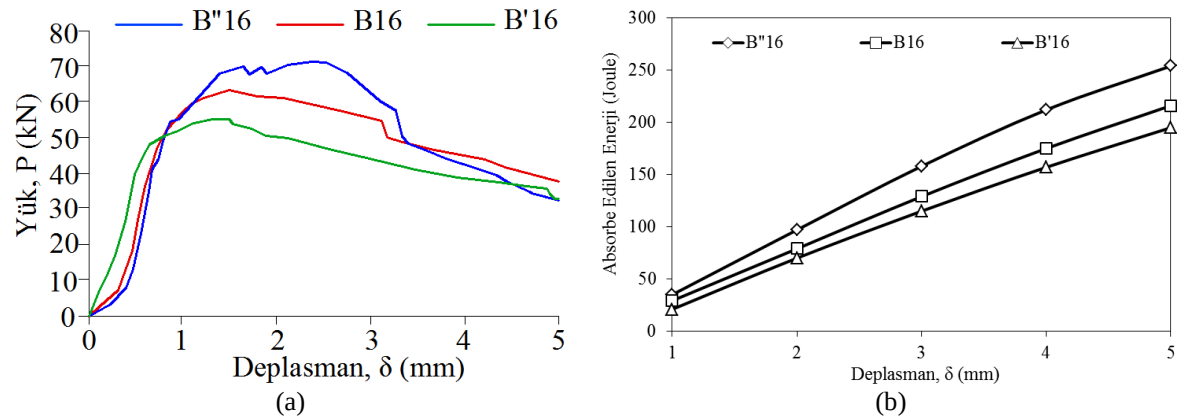
Seri	Absorbe Edilen Enerji (joule, Nm)				
	$\delta=1$ mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm (Tokluk)
A16	10	54	96	128	154
A32	21	71	113	148	171
AB16	20	66	115	153	190
AB32	26	83	135	179	216
B"16	35	97	158	212	254
B"32	41	113	179	234	279
B16	29	79	129	175	216
B32	32	95	155	205	245
B'16	21	70	115	157	195
B'32	27	80	136	182	217
C16	31	83	136	182	221
C32	37	100	160	212	252

Tokluk, yük altında kırılan numunenin toplam absorbe ettiği enerjiyi ifade ettiğinden, bu çalışmada artan deplasman ile absorbe edilen enerji miktarı incelenmiştir. Ayrıca toplam maksimum deplasman için ($\delta=5$ mm) absorbe edilen maksimum enerjinin ÇLDB'lerin tokluğu olduğu kabul edilmiştir.

Şekil 5.26, 5.27, 5.28 ve 5.29'da verilen grafiklerde, ÇLDB'lerin yük deplasman grafikleri ile her bir deplasman değeri için ayrı ayrı hesaplanmış absorbe edilen enerji değerleri görülmektedir. Örneğin, $\delta=1$ mm için absorbe edilen enerji değeri, 0'dan 1 mm ye kadar olan yük-deplasman grafiğinin altında kalan alandır. Diğer değerler de aynı şekilde 0'dan belirli bir δ değerine kadar olan grafiğin altında kalan alan olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.26'da, A'dan C'ye doğru, incelik modülü azalması ÇLDB'lerin absorbe edilen enerji miktarlarını olumlu etkilemiştir. İncelik modülü sabit granülometreler karşılaştırıldığında ise, B'' granülometrisi en iyi performansı sergilemiştir (Şekil 5.27).

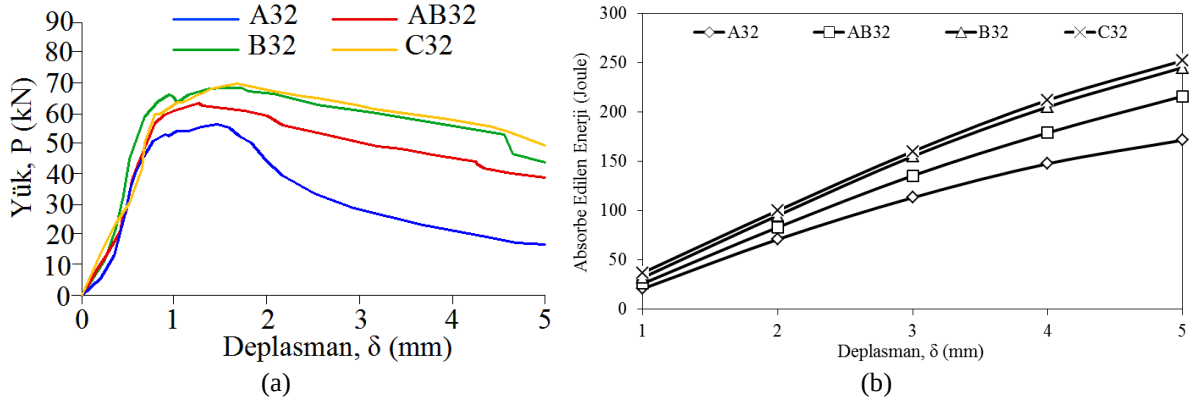


Şekil 5.26. $D_{max}=16$ mm olan A, AB, B ve C granülometreleri ile üretilen ÇLDB'lerin (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi

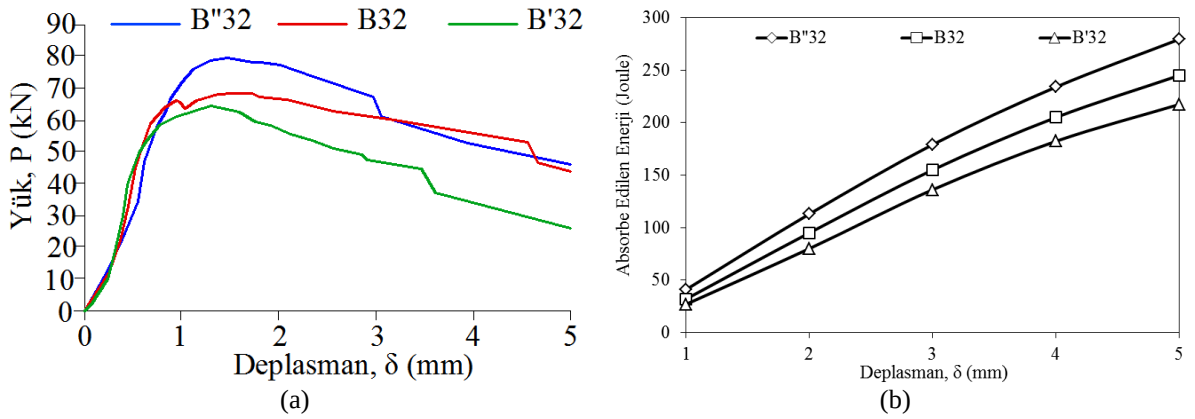


Şekil 5.27. $D_{max}=16$ mm olan B'', B ve B' granülometreleri ile üretilen ÇLDB'lerin (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi

Şekil 5.28 ve 5.29’da, $D_{max}=31,5$ mm için de yutulan enerji miktarları, $D_{max}=16$ mm ile benzer davranış göstermiştir. Ayrıca her iki D_{max} için deplasman miktarı arttıkça sünek davranış sebebiyle yutulan enerji miktarı da artmıştır.

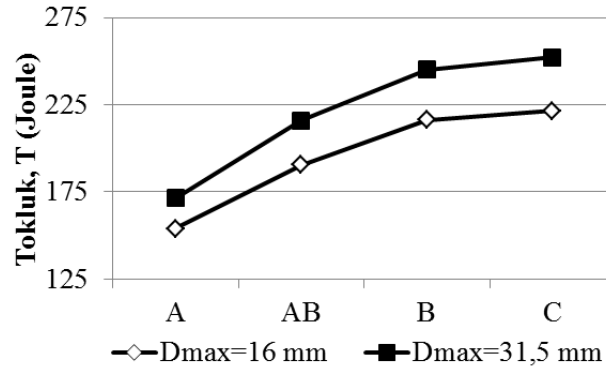


Şekil 5.28. $D_{max}=31,5$ mm olan A, AB, B ve C granülometreleri ile üretilen ÇLDB’lerin (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi

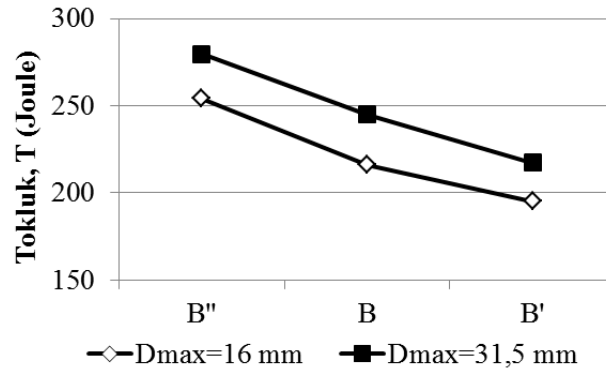


Şekil 5.29. $D_{max}=31,5$ mm olan B'', B ve B' granülometreleri ile üretilen ÇLDB’lerin (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi

Şekil 5.30 ve 5.31’de ise $\delta=5$ mm için tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. D_{max} artışının tokluk değeri üzerinde az da olsa olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir. 16 mm den 31,5 mm ye çıkan D_{max} , genellikle tokluğu %10 arttırmıştır.



Şekil 5.30. A, AB, B ve C granülometrilere sahip ÇLDB'lerin $\delta=5$ mm için tokluk değerleri



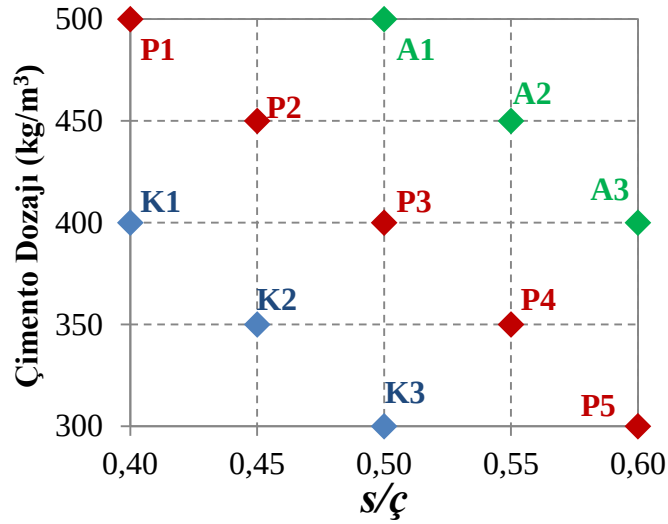
Şekil 5.31. B'', B ve B' granülometrilere sahip ÇLDB'lerin $\delta=5$ mm için tokluk değerleri

5.2. ÇLDB'nin Tasarımı İçin Grafik Tabanlı Bir Yaklaşım

Agrega granülometri değişiminin ÇLDB özellikleri üzerindeki etkisi incelendikten sonra, tez çalışmasının asıl amacı olan ÇLDB için ön tasarım monogramı oluşturmak üzere yapılan çalışmalar bu bölümde ele alınmıştır. Bu bölümde incelenen ÇLDB karışımları 4. Bölümde Tablo 4.6 ve 4.7'de verilmiştir.

ÇLDB karışımları daha önce de bahsedildiği gibi monogramı üretmek için “birincil” ve hem ÇLDB'nin değişen özelliklerini incelemek hem de üretilmiş monogramı geliştirmek için “ikincil” seriler olmak üzere iki grupta incelenmiştir. Birincil seriler, Slump testi sonuçlarına göre kıvam sınıflarına ayrılmış, Plastik (P), Akıcı (A) ve Kuru (K) olmak üzere üç grupta toplanmıştır. Birincil seriler hacimce (V_f) %0,5 oranında kısa (40/30) tip çelik lifler içeren ÇLDB serileri ile bunların referanslarını içermektedir. Birincil serilerin kısa tip çelik lifler ile üretilmesinin sebebi, çelik lif katkısı ile düşecek olan işlenebilirliği kontrol altında tutarak üretim ve testlerde meydana gelebilecek hataları engellemektir. Uzun

(80/60) çelik lif katkısı ve V_f değişiminin etkisi ise ikincil ÇLDB serileri ile incelenmiştir. İkincil seriler ise birincil seriler içerisinde seçilmiş beş seri (P1, P3, P5, A1 ve A3) ile oluşturulan serileridir. Beton serilerinin çimento dozajları ve s/ç oranlarına göre dağılımı Şekil 5.32'deki gibidir.

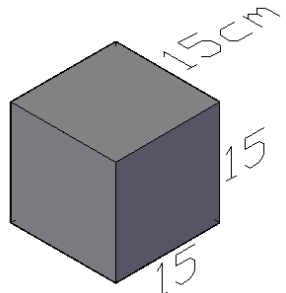
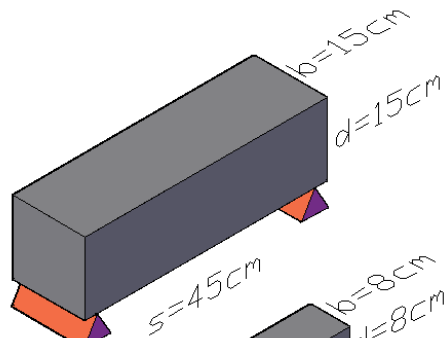
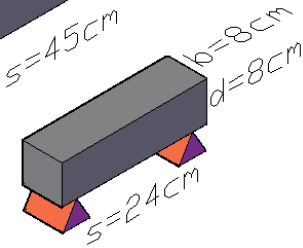
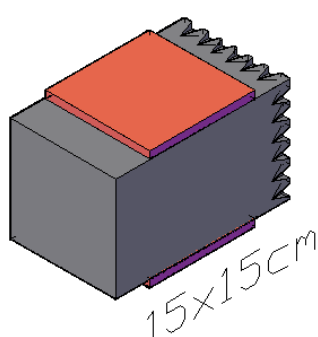
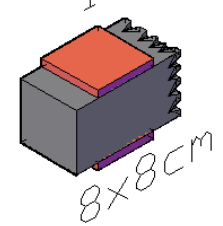


Şekil 5.32. Bu bölümde üretilen beton serileri

Her beton serisi için taze ve sertleşmiş beton özellikleri tespit edilmiştir. Sertleşmiş beton testleri için basınç, yarma, eğilme dayanımı deneyleri ile ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır. Basınç, yarma ve ultrases geçiş hızı deneylerinde standart küp numuneler kullanılırken, eğilme deneylerinde 150x150x500 mm boyutlu kiriş numuneleri kullanılmıştır. Ayrıca standart ve literatürün tavsiyeleri de göz önünde bulundurularak lif boyuna göre (kısa çelik lifler için) mümkün olan en küçük boyutlu kiriş numuneleri üretilerek eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Bu küçük kirişlerin boyutları 80x80x300 mm'dir. Bunlara ek olarak, harç numunelerinde yapıldığı gibi eğilme deneyi sonucunda ikiye ayrılan kirişin parçaları üzerinde de basınç deneyleri yapılarak alternatif basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar standart küp numunesinin dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede basınç deneyinin standart numuneler dışında alternatif beton numunelerle de yapılabilirliği incelenmiştir.

Tablo 5.5'de bu çalışmanın monogram ile ilgili olan kısmında üretilen deney numuneleri ve bu numuneler kullanılarak yürütülen deneyler verilmiştir.

Tablo 5.5. Tez çalışmasının ikinci kısmında üretilen numuneler ve yapılan deneyler

Deney	Numune
Basınç Dayanımı, Yarma Dayanımı ve Ultrases geçiş hızı	
Eğilme Dayanımı ve Tokluk, büyük kiriş ile	
Eğilme Dayanımı ve Tokluk, küçük kiriş ile	
Basınç Dayanımı, büyük kiriş parçası ile	
Basınç Dayanımı, küçük kiriş parçası ile	

Bu bölümde ÇLDB karışım hesabı için oluşturulan ön tasarım grafiklerine geçmeden önce hem üretilen ÇLDB'lerin özelliklerini incelemek ve değişen karışım oranları ile bu özellikleri gözlemlemek hem de farklı numuneler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarını karşılaştırmak faydalı olacaktır.

5.2.1. Taze Beton Özellikleri

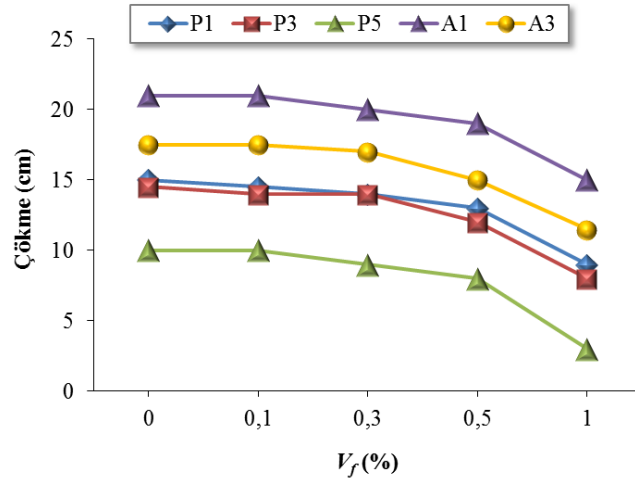
ÇLDB serilerini sınıflandırmak ve taze özelliklerini ölçmek amacı ile Slump testi yapılmıştır. Bu testin sonuçlarına göre birincil seriler Kuru (*K*), Plastik (*P*) ve Akıcı (*A*) olarak isimlendirilmişlerdir. Tablo 5.6’da ÇLDB karışımlarının ve referanslarının çökme değerleri görülmektedir.

Tablo 5.6. Referans ve ÇLDB’lerin çökme değerleri

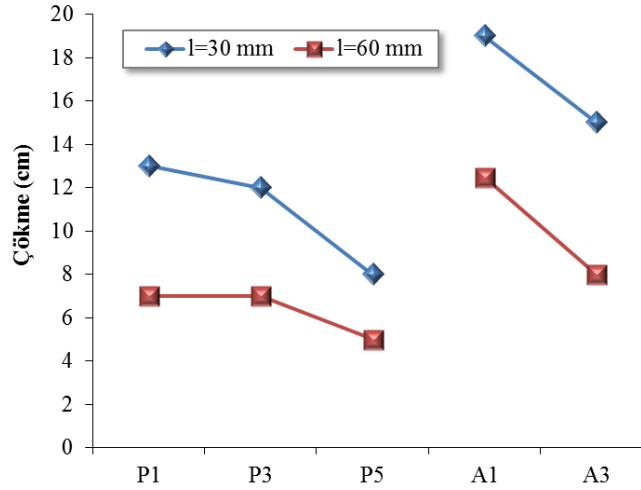
Seri Kodu		Çökme (cm)					
		Birincil		İkincil			
		Referans	$V_f=\%0,5$ Kısa Lifli	$V_f=\%0,1$ Kısa Lifli	$V_f=\%0,3$ Kısa Lifli	$V_f=\%1$ Kısa Lifli	$V_f=\%0,5$ Uzun Lifli
Kuru	K1	8	5,5	-	-	-	-
	K2	8	6	-	-	-	-
	K3	6	2	-	-	-	-
Plastik	P1	15	13	14,5	14	9	7
	P2	15	13	-	-	-	-
	P3	14,5	12	14	14	8	7
	P4	15	13	-	-	-	-
	P5	10	8	10	9	3	5
Akcı	A1	21	19	21	20	15	12,5
	A2	17	15	-	-	-	-
	A3	17,5	15	17,5	17	11,5	8

Hacimce %0,5 oranında kısa (40/30) çelik lif içeren birincil taze ÇLDB’lerin çökme değerleri *K* serisi için 2~6 cm, *P* serisi için 8~13 cm ve *A* serisi için 15~19 cm arasında değişmektedir. Bu serilerin referansları ise sırasıyla 6~8 cm, 10~15 cm ve 17~21 cm arasında değişmektedir. Bu seriler grafik yaklaşımın temelini oluşturdukları için işlenebilirlik açısından bu şekilde sınıflandırılmış ve adlandırılmışlardır.

Şekil 5.33’de ikincil seriler ile yapılan Slump testi sonucunda, artan V_f ile işlenebilirliğin değişimi görülmektedir. Şekil 5.34’de ise lif miktarı sabit ($V_f=\%0,5$) iken değişen lif uzunluğunun işlenebilirliğe etkisi görülmektedir. Şekillerden anlaşıldığı gibi, lif miktarının artmasıyla azalan işlenebilirlik, lif miktarı sabit tutulduğunda lif boyunun artmasıyla da azalmaktadır.



Şekil 5.33. Çökme değerinin V_f ile değişimi



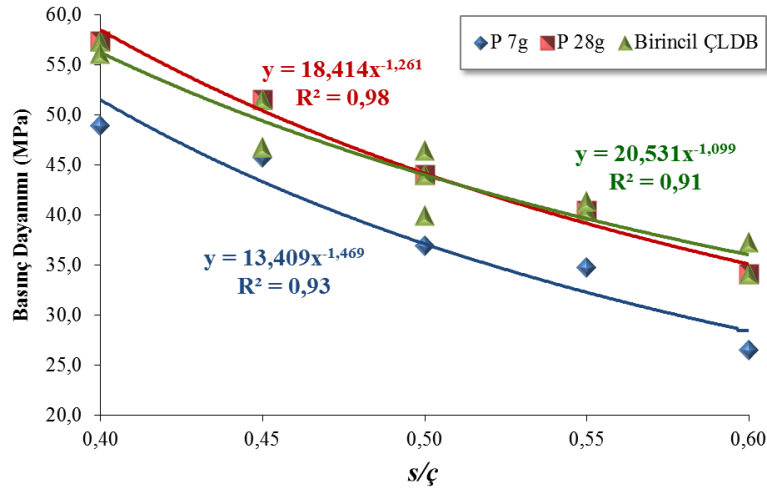
Şekil 5.34. Lif boyunun ÇLDB'nin çökmesi üzerindeki etkisi

5.2.2. Basınç Dayanımı

Tablo 5.7'de betonların küp basınç dayanımları verilmiştir. Referans, birincil ve ikincil beton serilerinin 28 günlük kür süreleri sonunda dayanımları tespit edilmiştir. Buna ek olarak Birincil ÇLDB serisinde P serisinin ve bunun referanslarının 7 günlük dayanımları da test edilmiştir. Çalışma öncesinde yapılan hazırlık deneylerinde tek başına P serisinin tüm birincil ÇLDB serilerinin mekanik davranışını temsil edebildiği anlaşıldığından, 7 günlük bütün dayanımlar sadece P serisi için tespit edilmiştir. Böylece beton yaşının da dayanım ile ilişkisi tüm ÇLDB'ler için ortaya çıkarılmıştır. Şekil 5.35'de tüm birincil ÇLDB serilerinin 28 günlük küp basınç dayanımları ile P serisinin 7 ve 28 günlük küp basınç dayanımlarının değişimi görülmektedir.

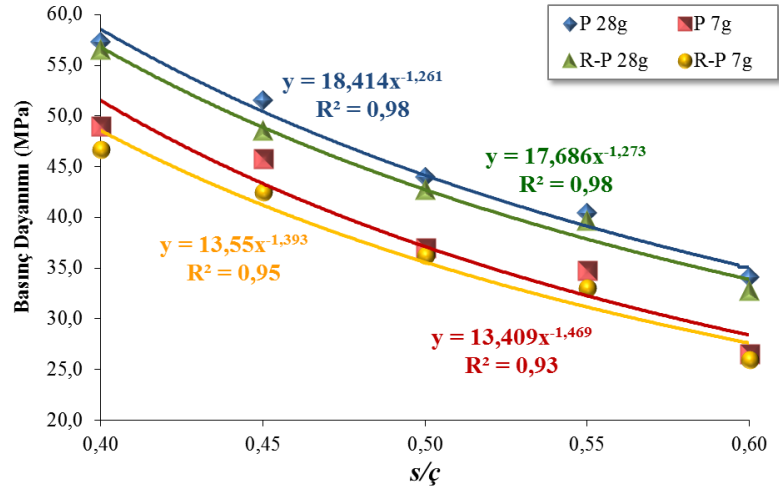
Tablo 5.7. Referans ve ÇLDB'lerin basınç dayanımları

Seri Adı	Basınç Dayanımı (f_c) (MPa)							
	Birincil				İkincil			
	Referans		$V_f= \%0,5$ Kısa Lifli		$V_f= \%0,1$ Kısa Lifli	$V_f= \%0,3$ Kısa Lifli	$V_f= \%1$ Kısa Lifli	$V_f= \%0,5$ Uzun Lifli
	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün
P1	46,6	56,5	48,9	57,3	56,5	56,9	58,4	58,1
P2	42,5	48,6	45,7	51,5	-	-	-	-
P3	36,2	42,7	36,9	44,0	43,2	43,5	44,6	44,6
P4	33,0	39,6	34,8	40,4	-	-	-	-
P5	25,9	32,8	26,5	34,0	33,0	33,3	35,7	34,7
A1	-	45,8	-	46,4	45,9	46,1	47,1	47,4
A2	-	40,1	-	41,4	-	-	-	-
A3	-	36,4	-	37,3	36,6	36,9	38,0	37,9
K1	-	53,9	-	56,1	-	-	-	-
K2	-	45,3	-	46,7	-	-	-	-
K3	-	39,2	-	39,9	-	-	-	-



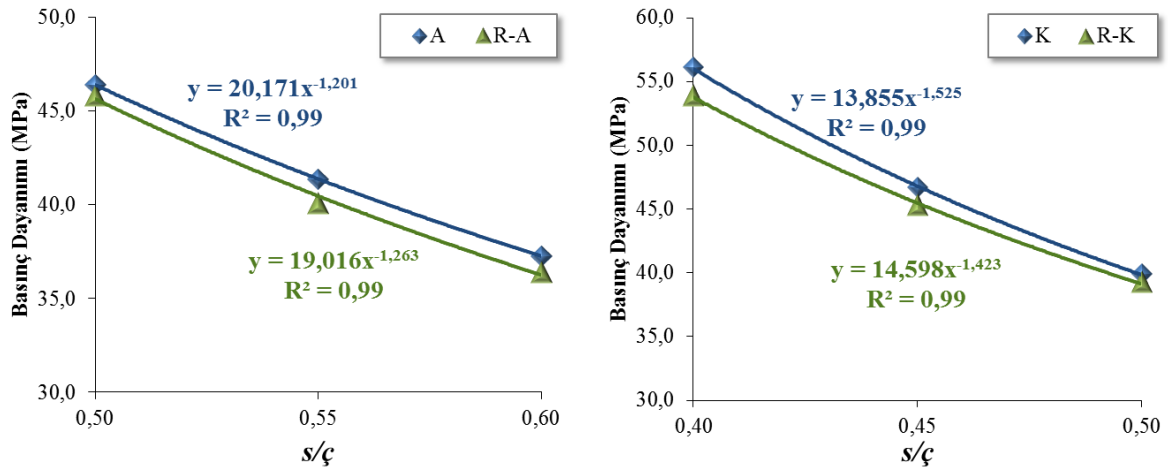
Şekil 5.35. Birincil ÇLDB serilerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının değişimi

Çelik liflerin basınç dayanımı üzerindeki sınırlı etkisinden daha önceki bölümlerde bahsedilmişti. Şekil 5.36'da birincil P serisinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları çelik lif içermeyen referansları ile görülmektedir. Görüldüğü gibi çelik liflerin varlığına kıyasla s/ϕ oranının değişimi basınç dayanımını daha çok etkilemiştir. s/ϕ oranının artması ile basınç dayanımı azalmıştır.



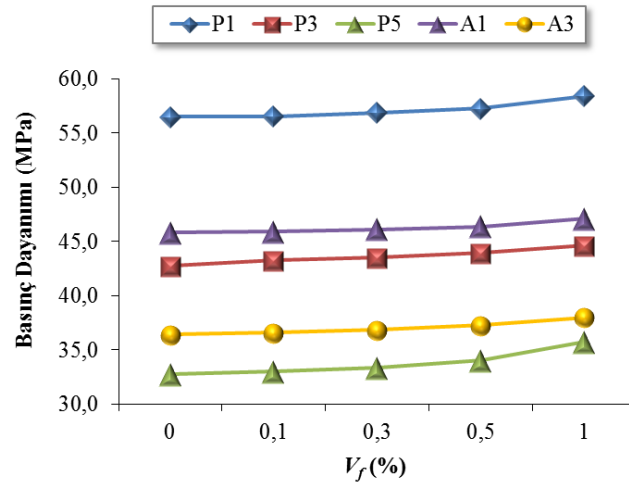
Şekil 5.36. P serisi için basınç dayanımlarının değişimi

Benzer şekilde A ve K serilerinde de çelik lif katkısı basınç dayanımını ihmal edilebilir seviyelerde etkilemiştir (Şekil 5.37).

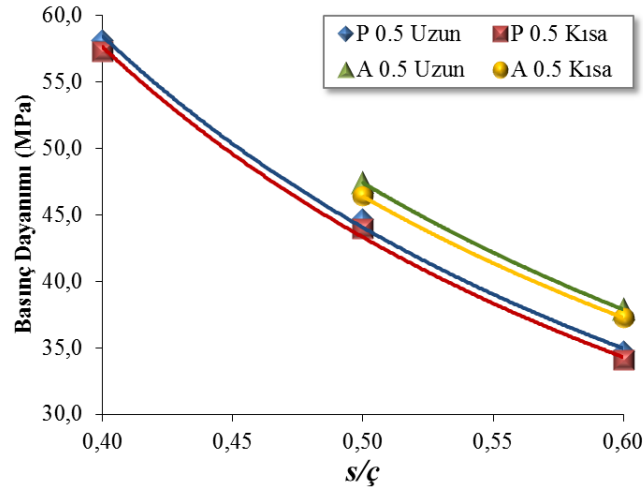


Şekil 5.37. A ve K serileri için basınç dayanımlarının değişimi

İkincil serilerde değişen lif miktarı ve lif tipi söz konusu olduğunda ise basınç dayanımının lif miktarının ve lif boyunun artışından olumlu etkilendiği gözlemlenebilse de bu olumlu etkinin de ihmal edilebilir olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 5.38 ve 5.39). Şekil 5.38’de V_f ile basınç dayanımının değişimi verilmiştir, bu serilerin hepsinde kısa çelik lif kullanılmıştır. Şekil 5.39’da ise $V_f=0,5$ oranında sabit tutularak kısa ve uzun liflerin basınç dayanımına etkisi verilmiştir. Her iki grafikte de basınç dayanımını, çelik lif katkısından ziyade s/ϕ miktarı daha çok etkilemiştir.



Şekil 5.38. V_f değişiminin basınç dayanımları üzerindeki etkisi

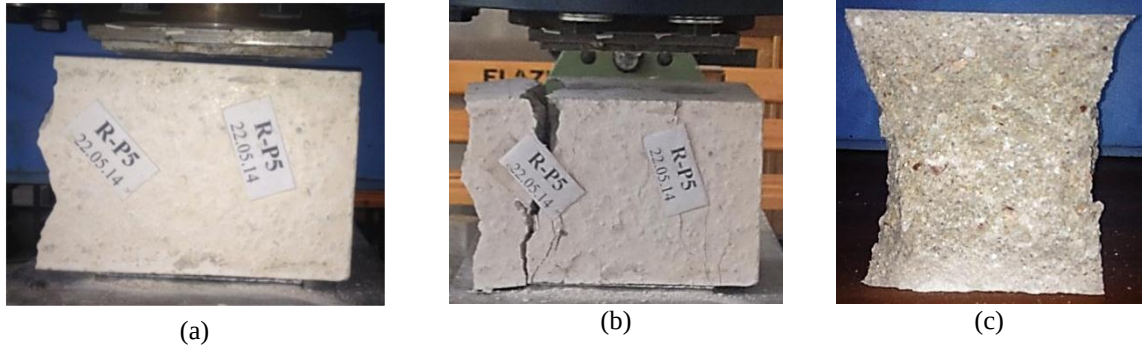


Şekil 5.39. Lif boyu değişiminin basınç dayanımları üzerindeki etkisi

5.2.2.1. Yarım Kiriş Parçaları Kullanılarak Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Kiriş parçalarından basınç dayanımı belirlenmesi yeni bir kavram değildir. TS 3287 (1979) standardında da tarif edildiği gibi yapılan bu çalışmada standart numuneler ile bu kiriş parçalarının dayanımları arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Bilindiği gibi basınç dayanımı tespitinde genellikle standart küp veya silindir numuneler kullanılmaktadır. Burada, bu standart numunelerin kullanımına alternatif olabilecek bir çalışma yürütmek amacıyla eğilme deneyi sonucunda ortaya çıkan yarım kiriş parçalarını kullanarak betonun basınç dayanımı tayin edilmiştir. 15x15 cm kesitli yarım kiriş parçaları alt ve üst yüzeylerine 15x15 cm boyutlu metal plakalar yerleştirilerek basınç yüklemesine maruz

bırakılmıştır. Bu deneyde standart küp numunesi ile yapılan basınç deneyi kuralları takip edilmiş olup, sadece 28 günlük dayanımlar tespit edilmiştir. Şekil 5.40'da yapılan deneylere ait fotoğraflar görülmektedir.

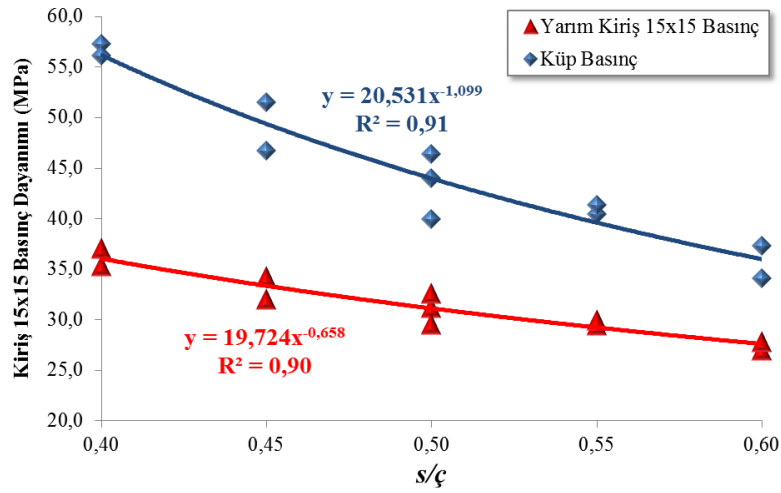


Şekil 5.40. (a) Kiriş parçası kullanılarak yapılan basınç deneyi (15x15) (b) deney sonu (c) deney sonucunda ortaya çıkan kırılma şekli

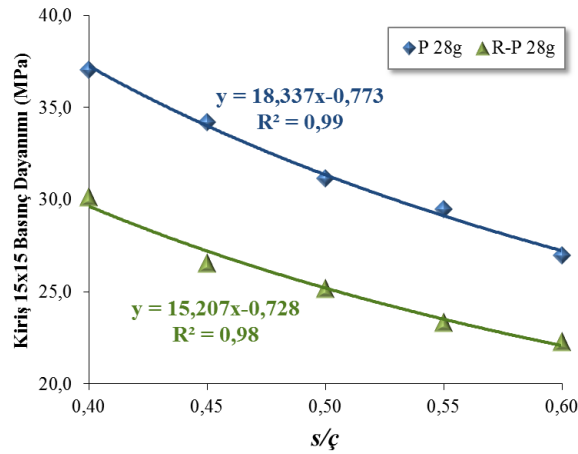
Tablo 5.8. Yarım kiriş parçalarının basınç dayanımları

Seri Adı	Yarım Kiriş Parçası 15x15 Basınç Dayanımı (MPa)					
	Birincil		İkincil			
	Ref	$V_f = \%0,5$ Kısa Lifli	$V_f = \%0,1$ Kısa Lifli	$V_f = \%0,3$ Kısa Lifli	$V_f = \%1$ Kısa Lifli	$V_f = \%0,5$ Uzun Lifli
P1	30,2	37,1	34,1	35,9	42,7	38,5
P2	26,6	34,2	-	-	-	-
P3	25,2	31,2	26,1	28,7	33,4	33,9
P4	23,3	29,5	-	-	-	-
P5	22,3	27,0	24,4	25,5	28,9	27,3
A1	26,6	32,6	28,8	31,4	35,6	34,1
A2	25,1	29,9	-	-	-	-
A3	23,8	27,8	24,5	27,1	29,2	29,3
K1	28,2	35,3	-	-	-	-
K2	24,5	30,7	-	-	-	-
K3	23,4	29,5	-	-	-	-

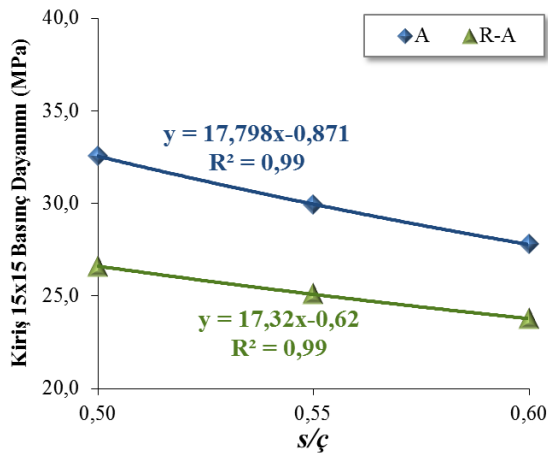
Tablo 5.8'de yarım kiriş numunelerinin basınç dayanımları verilmiştir. Şekil 5.41'de birincil ÇLDB'lerin kiriş parçalarından elde edilen basınç dayanımları ile küp basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Yarım kiriş parçalarının basınç dayanımları kendi içinde, küp numunelerinininki ile benzer eğilim gösterse de daha düşük dayanım sergilemişlerdir (Şekil 5.41). Şekil 5.42'de ise P , A ve K serileri referansları ile karşılaştırılmıştır. Burada lifli kiriş numunelerinin basınç dayanımlarının referansları ile olan dayanım farklarının, küp basınç dayanımlarındaki farklardan fazla olduğu dikkati çekmektedir.



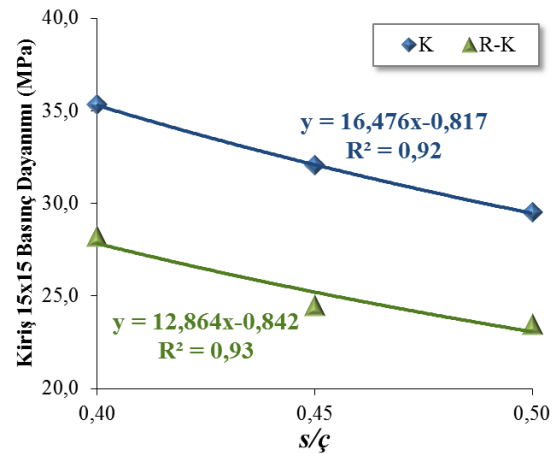
Şekil 5.41. Birincil ÇLDB'lerin kiriş parçası ve küp basınç dayanımları



(a)



(b)

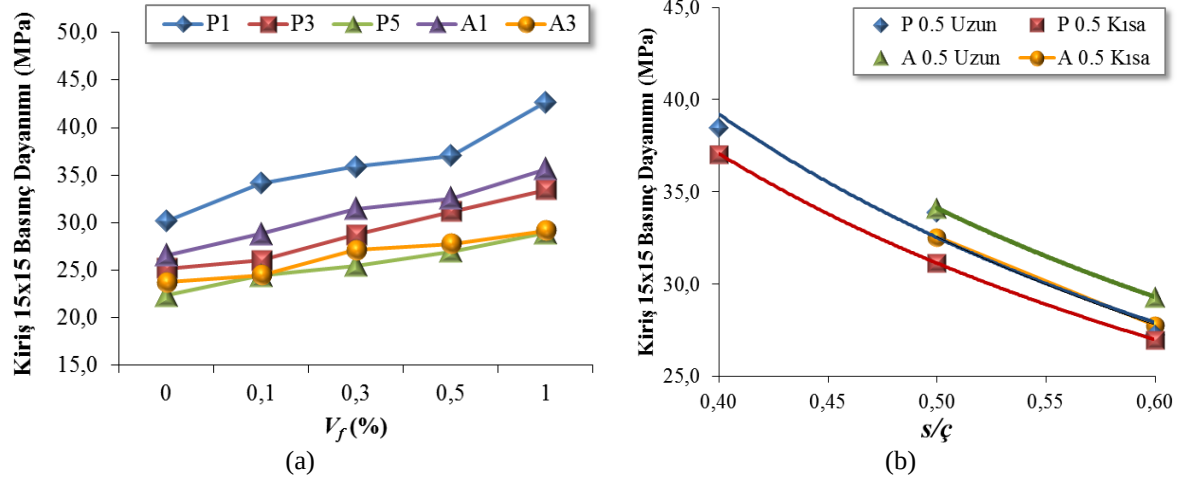


(c)

Şekil 5.42. (a) P serisinin, (b) A serisinin ve (c) K serisinin kiriş basınç dayanımları

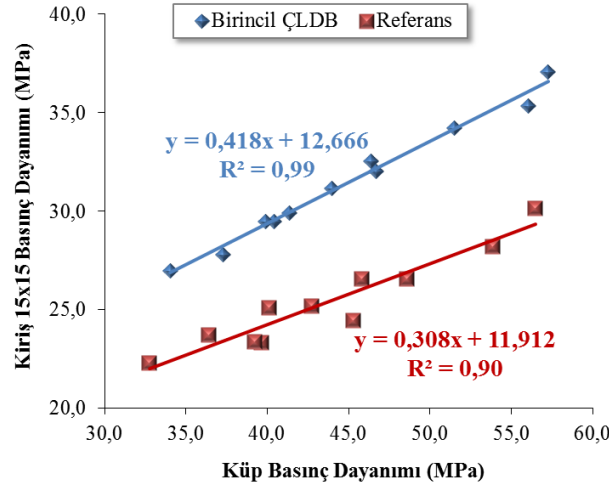
Şekil 5.43'de verilen kiriş basınç dayanımlarının V_f ile değişiminde ve uzun çelik lifler ile kısa çelik liflerin karşılaştırılmasında ise genel olarak küp basınç dayanımındaki gibi bir

davranış görülmektedir. V_f 'nin artması (Şekil 5.43a) ve lif boyunun artması (Şekil 5.43b) ile kiriş basınç dayanımı da artmaktadır.



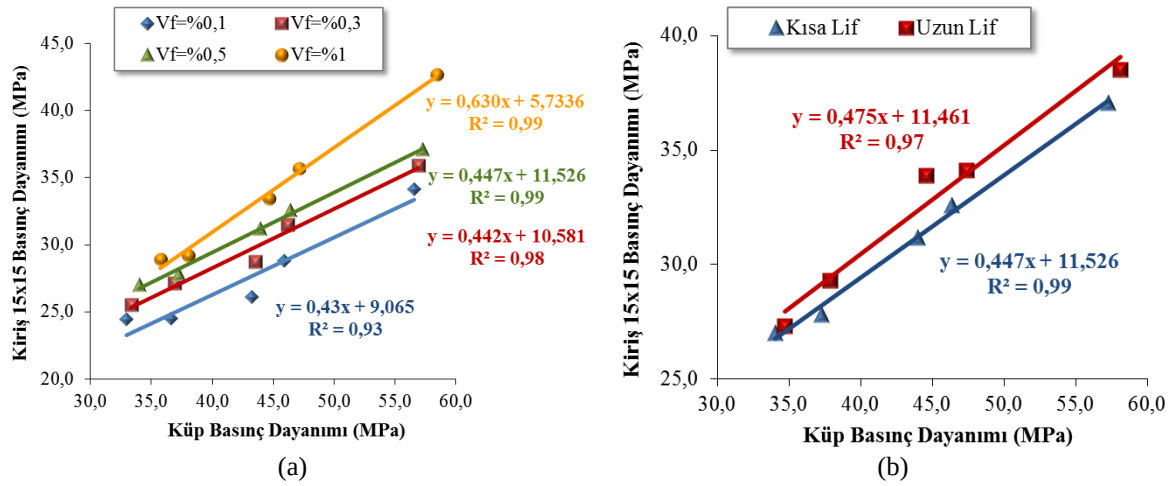
Şekil 5.43. (a) Kiriş basınç dayanımının V_f ile değişimi, (b) lif boyunun kiriş basıncı üzerindeki etkisi

Kiriş numuneleri üzerinde yapılan basınç testleri ile küp dayanımlarını karşılaştırmak amacıyla bu değişkenler arasındaki doğrusal ilişki incelenmiş ve yüksek korelasyonlar elde edilmiştir (Şekil 5.44).



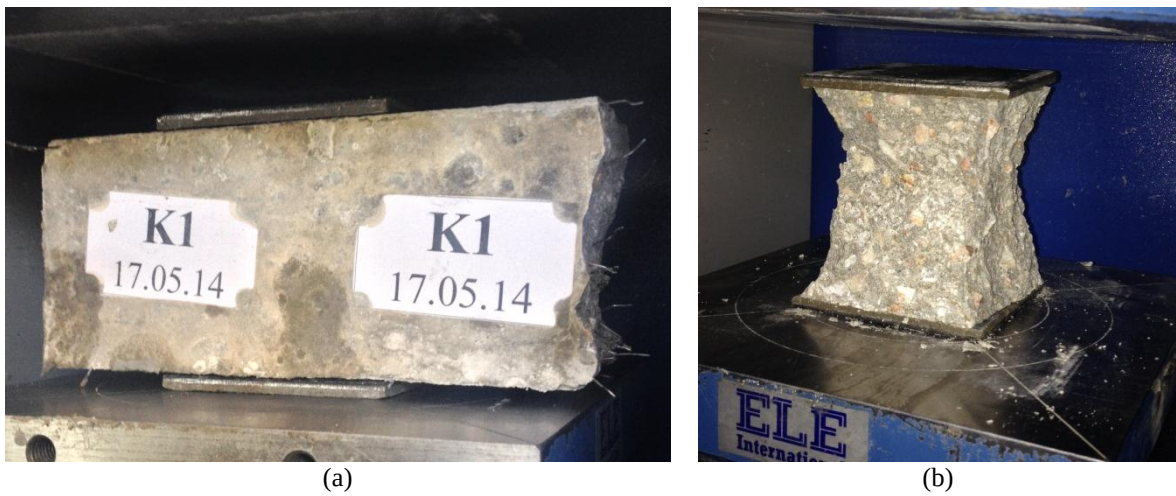
Şekil 5.44. Birincil ÇLDB ve referansları için basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Bu deneylerin ikincil serileri ise tek tek karşılaştırıldığında bile iki basınç dayanımı için aralarında bulunan doğrusal ilişki oldukça kuvvetlidir (Şekil 5.45).



Şekil 5.45. (a) Değişen V_f oranına göre ve (b) değişen lif tipine göre kiriş ile küp basınç dayanımları arasındaki ilişkiler

Buna göre gerek referans gerek ÇLDB'lerin iki tip basınç değeri, bu doğrusal ilişkiler yardımı ile birbirlerine dönüştürülebilir. Hatta basınç dayanımının belirlenmesinde küp numuneler yerine eğilme deneylerinden arta kalan kiriş numuneleri kullanılabilir. Bu şekilde yapılacak deneyler için iki ayrı numune üretmek yerine tek numune ile hem eğilme hem de basınç dayanımı elde edilebilir. Üstelik bu sayede küp numunelerinin üretimine gerek kalmayacağından üretim maliyeti de düşürülebilir. Kiriş parçaları kullanılarak yapılan basınç deneylerinde dikkat edilmesi gereken en önemli husus ise basınca maruz bırakılacak bölgenin eğilme deneyi sırasında zarar görmemiş bölge olmasıdır. Aksi takdirde çatlamış kesitin basınç dayanımı diğer numunelere kıyasla düşük çıkacaktır.



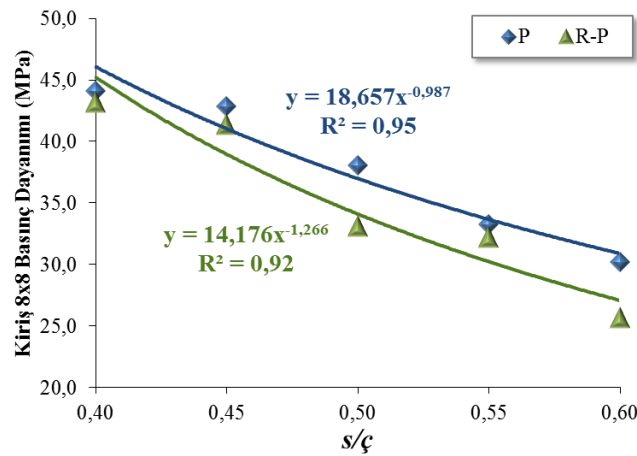
Şekil 5.46. (a) Küçük kiriş parçası kullanılarak yapılan basınç deneyi (8x8) (b) deney sonucunda ortaya çıkan kırılma şekli

Daha önce de bahsedildiği gibi eğilme deneyleri iki farklı kiriş numunesi kullanılarak incelenmiştir. 15x15 cm kesitli yarım kiriş numuneleri ile 8x8 cm kesitli yarım kiriş numuneleri karşılaştırılmıştır. Dolayısıyla bu küçük kiriş numunelerin de eğilme deneyinden artakalan parçaları, 8x8 cm'lik metal plakalar arasında sıkıştırılarak basınç dayanımları tespit edilmiştir (Şekil 5.46). Sadece *P* serisi için üretilen küçük kiriş parçalarının basınç dayanımları Tablo 5.9'da görülmektedir.

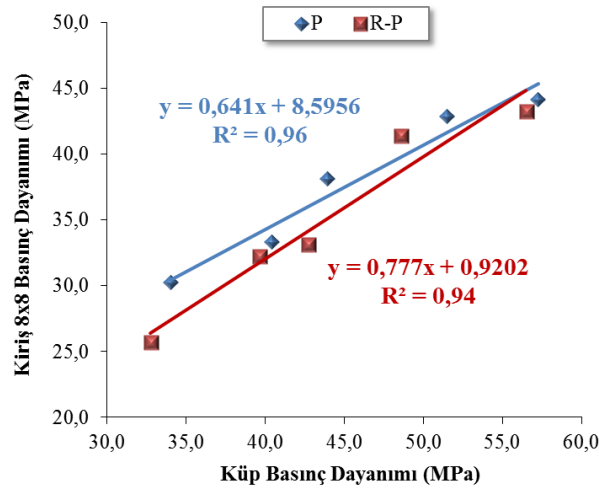
Tablo 5.9. Küçük kiriş parçalarının basınç dayanımları

Seri Adı	Küçük Kiriş Parçası 8x8 Basınç Dayanımı (MPa)	
	Referans	$V_f = \%0,5$ Kısa Lifli
P1	43,3	44,1
P2	41,4	42,9
P3	33,1	38,1
P4	32,2	33,3
P5	25,7	30,2

Şekil 5.47'de ise küçük kiriş basınç dayanımlarının değişimleri görülmektedir. Bu dayanımların da küp basınç dayanımları ile arasındaki doğrusal ilişki incelenmiş ve ortaya çıkan sonuçlarda güçlü korelasyonlara rastlanmıştır (Şekil 5.48). Bu sonuçların da büyük kirişlerde olduğu gibi önemli olduğu düşünülmektedir. Çünkü basınç dayanımı tayininde küp numune üretimine gerek kalmadığı gibi, bu yarım kiriş numunesinin de boyutlarını çelik lif boyunun elverdiği ölçüde düşürmenin de mümkün olabildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.47. *P* serisinin küçük kiriş basınç dayanımları



Şekil 5.48. ÇLDB ve referansları için küçük kiriş ve küp basınç dayanımlarının karşılaştırılması

5.2.3. Yarma Dayanımı

Yarı gevrek bir malzeme olsa da normal betonun çekme dayanımı yapıların statik ve betonarme tasarımında hesaplarda ihmal edilen bir parametredir. Oysa önceki bölümlerde açıklandığı gibi ÇLDB söz konusu olduğunda önem kazanan çekme dayanımı, bu çalışmada yarma deneyi ile incelenmiş ve çelik liflerin yarma dayanımı üzerindeki olumlu etkisi bu sayede gözlemlenmiştir. Tablo 5.10’da standart küp numuneleri ile yapılan yarma deneyi sonuçları verilmiştir. Şekil 5.49’da yarma deneyi sonucunda kırılmış bir küp numunesi görülmektedir.

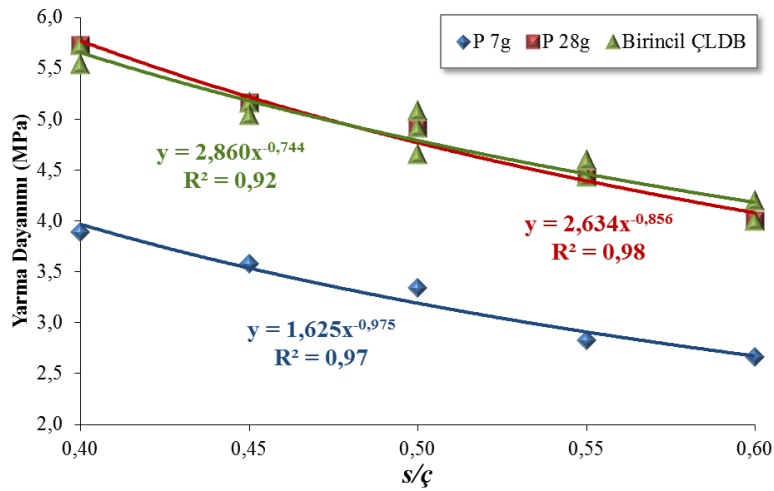
Tablo 5.10. Referans ve ÇLDB’lerin yarma dayanımları

Seri Adı	Yarma Dayanımı (f_{st}) (MPa)							
	Birincil				İkincil			
	Referans		$V_f=0,5$ Kısa Lifli		$V_f=0,1$ Kısa Lifli	$V_f=0,3$ Kısa Lifli	$V_f=1$ Kısa Lifli	$V_f=0,5$ Uzun Lifli
	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün
P1	3,8	5,5	3,9	5,7	5,5	5,5	6,3	6,1
P2	3,5	5,0	3,6	5,2	-	-	-	-
P3	3,3	4,7	3,3	4,9	4,8	4,8	5,5	5,2
P4	2,8	4,3	2,8	4,4	-	-	-	-
P5	2,5	3,9	2,7	4,0	4,0	4,0	4,4	4,2
A1	-	5,0	-	5,1	5,0	5,0	5,6	5,4
A2	-	4,5	-	4,6	-	-	-	-
A3	-	4,1	-	4,2	4,1	4,2	4,6	4,5
K1	-	5,3	-	5,5	-	-	-	-
K2	-	4,8	-	5,0	-	-	-	-
K3	-	4,3	-	4,7	-	-	-	-

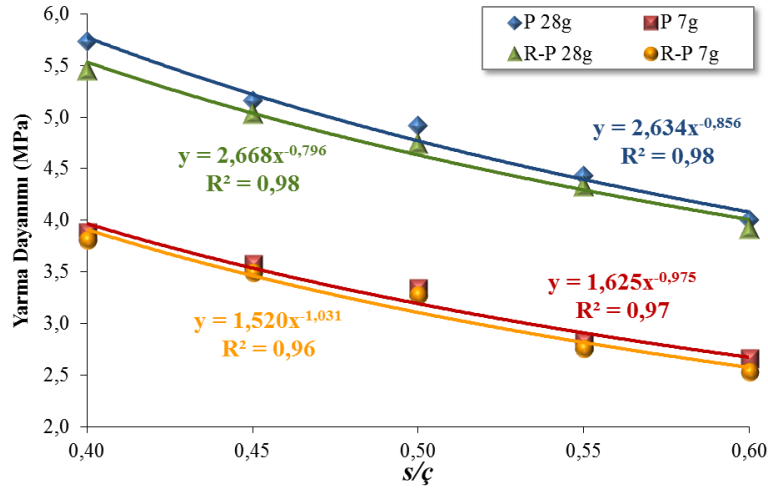


Şekil 5.49. Yarma deneyi sonucunda kırılan numune

Şekil 5.50’de birincil ÇLDB serilerinin 7 ve 28 günlük yarma dayanımları görülmektedir. Şekil 5.51’de ise birincil *P* serilerinin yarma dayanımlarının referanslarına göre değişimleri verilmiştir. Çelik lif katkısı ile yarma dayanımı hem 7 hem de 28 günlük beton yaşı için bir miktar artış göstermiştir.

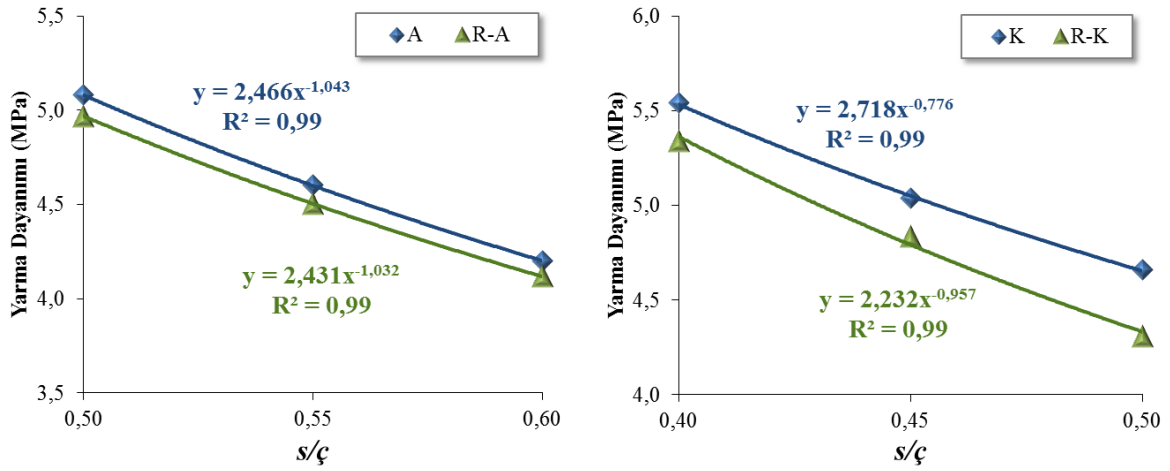


Şekil 5.50. Birincil ÇLDB serilerinin 7 ve 28 günlük yarma dayanımlarının değişimi



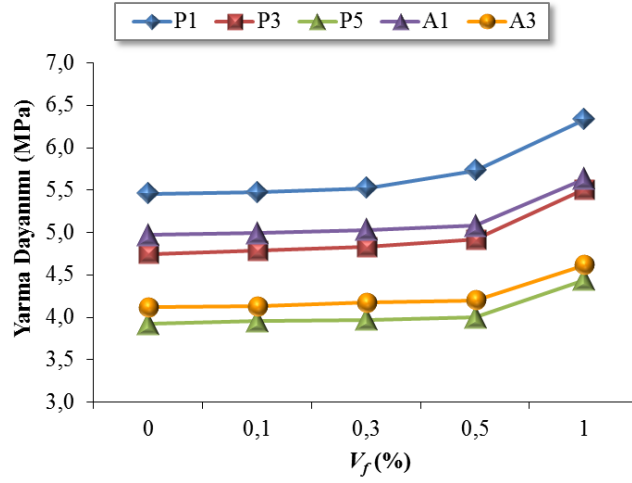
Şekil 5.51. P serisi için yarma dayanımlarının değişimi

Şekil 5.52’de A ve K serileri için elde edilen yarma dayanımı değerleri referansları ile birlikte görülmektedir. Bu seriler için de yarma dayanımı, çelik lif katkısından olumlu etkilenmiştir.

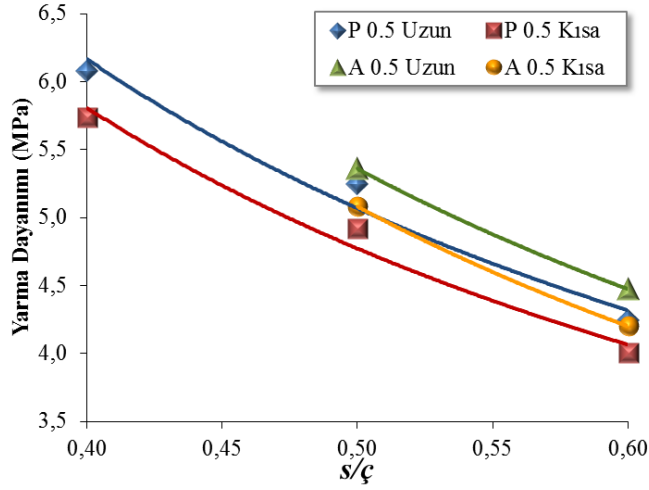


Şekil 5.52. A ve K serileri için yarma dayanımlarının değişimi

Basınç dayanımındaki aksine, V_f oranının artışı ile yarma dayanımı dikkate değer biçimde artmıştır (Şekil 5.53). V_f sabit tutulup lif boyu arttırıldığında ise yarma dayanımının artmaya devam ettiği gözlemlenmiştir (Şekil 5.54). Bu durumda, çelik liflerin betonun basınç dayanımı üzerinde neredeyse etkisiz olmasına rağmen, özellikle %0,5 oranından daha fazla kullanıldığında veya lif boyu arttırıldığında yarma dayanımının daha da arttırılabileceği öngörülebilir.



Şekil 5.53. V_f değişiminin yarma dayanımları üzerindeki etkisi



Şekil 5.54. Lif boyu değişiminin yarma dayanımları üzerindeki etkisi

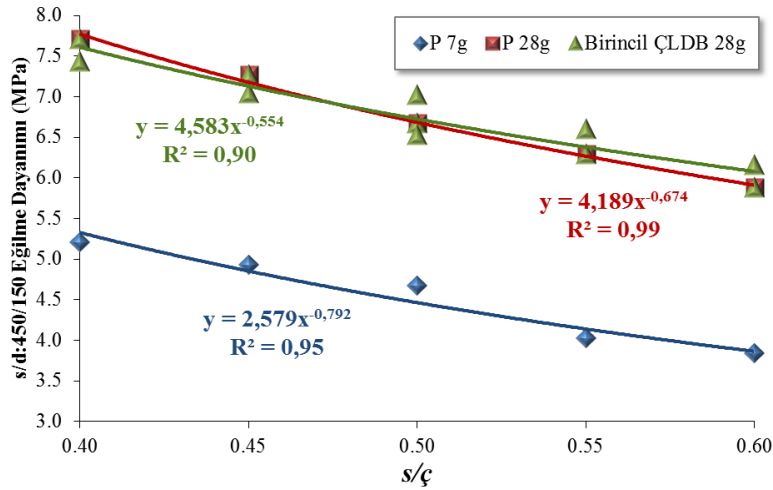
5.2.4. Eğilme Dayanımı

ÇLDB numunelerinin eğilme dayanımlarını belirlemek ve yük-deplasman grafiklerini elde etmek amacıyla dört noktalı eğilme deneyleri, 2500 kN kapasiteli kapalı çevrim kontrollü deplasman hızına duyarlı beton test presini kullanılarak yapılmıştır. Deney düzeneğinin şematik bir gösterimi Şekil 5.55(a)'da verilmiştir. Şekil 5.55(b)'de ise kiriş numunelerinin mesnet ve yükleme noktaları gösterilmiştir.

Daha önce de bahsedildiği gibi eğilme dayanımları iki farklı boyutta kiriş numunesi için tespit edilmiştir. 150x150x500 mm boyutlu kirişler için mesnet açıklığı (s) 450 mm olduğundan, açıklık/genişlik (s/d) oranı 3 olacak şekilde 80x80x300 mm ($s=240$ mm)

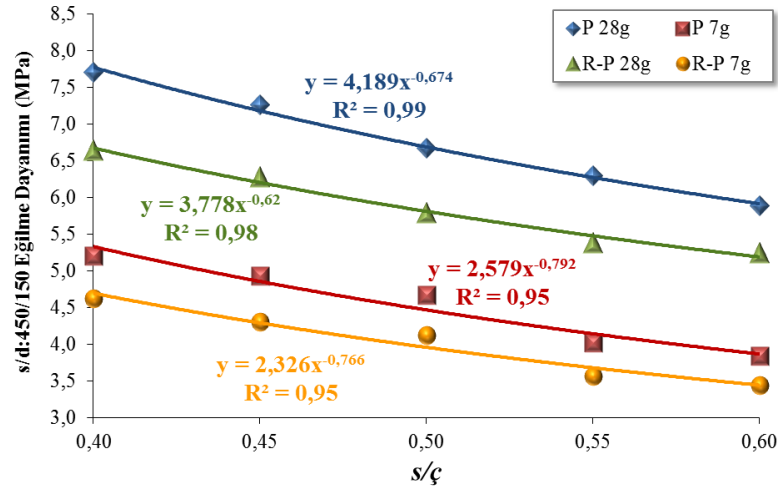
Tablo 5.11. Referans ve ÇLDB'lerin eğilme dayanımları

Seri Adı	Eğilme Dayanımı (f_{flex}) (MPa)							
	Birincil				İkincil			
	Referans		$V_f=0,5$ Kısa Lifli		$V_f=0,1$ Kısa Lifli	$V_f=0,3$ Kısa Lifli	$V_f=1$ Kısa Lifli	$V_f=0,5$ Uzun Lifli
	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün
P1	4,6	6,6	5,2	7,7	6,7	7,0	9,1	8,9
P2	4,3	6,3	4,9	7,3	-	-	-	-
P3	4,1	5,8	4,7	6,7	6,1	6,2	8,4	8,0
P4	3,6	5,4	4,0	6,3	-	-	-	-
P5	3,4	5,2	3,8	5,9	5,5	5,7	7,4	7,0
A1	-	5,9	-	7,0	6,4	6,5	8,6	8,2
A2	-	5,7	-	6,6	-	-	-	-
A3	-	5,4	-	6,2	5,6	5,8	7,6	7,4
K1	-	6,5	-	7,4	-	-	-	-
K2	-	6,1	-	7,0	-	-	-	-
K3	-	5,7	-	6,5	-	-	-	-

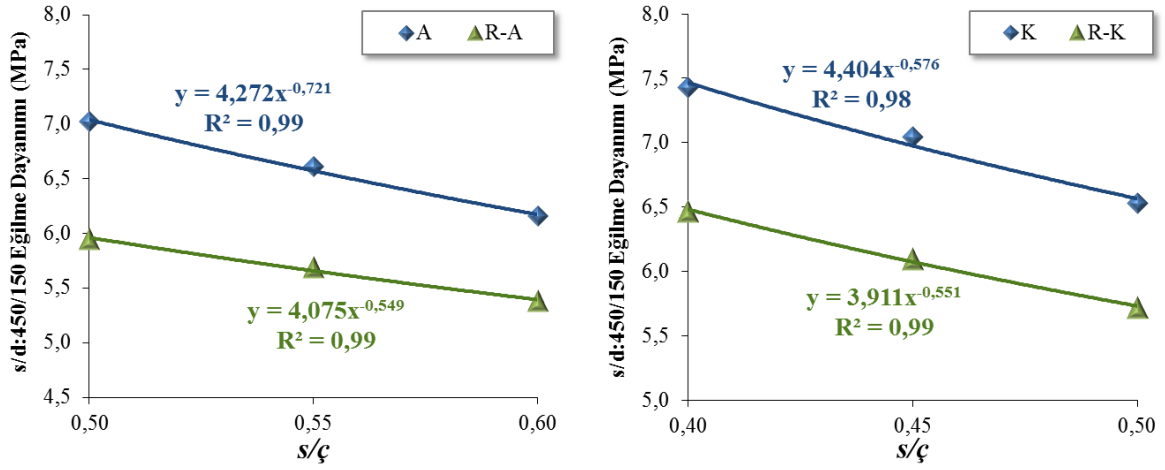


Şekil 5.57. Birincil ÇLDB serilerinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarının değişimi

Şekil 5.58’de *P* serilerine ve Şekil 5.59’da *A* ve *K* serilerine ait referans ve ÇLDB numunelerinin eğilme dayanımları görülmektedir. Buradan anlaşıldığı üzere, çelik lifler eğilme dayanımını yarma ve basınç dayanımlarına kıyasla daha fazla arttırmışlardır. Ayrıca ÇLDB numunelerinin eğilme dayanımlarının diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi s/ϕ oranından da etkilendiği anlaşılmaktadır. Zaten s/ϕ oranı artışının dayanımları olumsuz etkilediği bilinmektedir (Abrams, 1918).



Şekil 5.58. P serisi için eğilme dayanımlarının değişimi



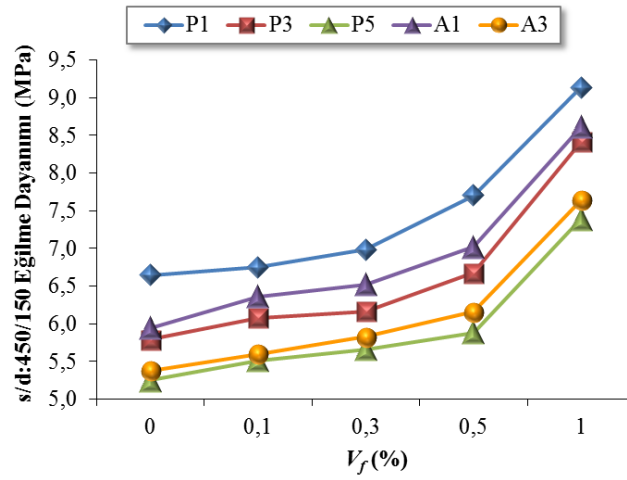
Şekil 5.59. A ve K serileri için eğilme dayanımlarının değişimi



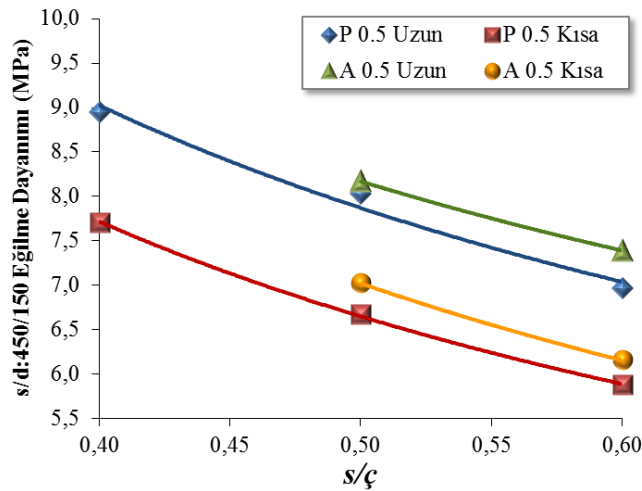
Şekil 5.60. Eğilme deneyi sırasında betondan sıyrılarak çıkan çelik lifler

Şekil 5.60'da eğilme deneyi sırasında betondan sıyrılarak çıkmış çelik lifler görülmektedir. Görüldüğü gibi kancalı olan lifler bu sıyrılma sırasında düzleşerek malzemenin enerji yutmasına ve dayanımının ise gelişmesine katkı sağlamışlardır.

Daha önce bahsedilen, ÇLDB'de çatlak oluşumu ve liflerin bu mekanizmaya olan etkileri göz önünde bulundurulduğunda V_f ve lif boyu değişiminin eğilme dayanımını etkilememesi düşünülemez. Şekil 5.61'de V_f artışı ile artan eğilme dayanımlarını ve Şekil 5.62'de lif boyunun atması ile eğilme dayanımının da artması durumları gözlemlenmektedir.



Şekil 5.61. V_f değişiminin eğilme dayanımları üzerindeki etkisi



Şekil 5.62. Lif boyu değişiminin eğilme dayanımları üzerindeki etkisi

5.2.4.1. Küçük Kiriş Numuneleri Kullanılarak Eğilme Dayanımının Belirlenmesi

Eğilme dayanımlarının daha pratik ve ekonomik yolla belirlenebilmesi için küçük numune boyutları seçebilmek önemlidir. Gerek deney numune ağırlığının düşürülmesi ile iş gücünden, boyutların düşürülmesi ile maliyet ve işçilikten tasarruf edilmesi sebebi ile mümkün olduğu kadar küçük boyutlu kiriş numuneleri ile dayanımları belirlemenin önemli olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada ise ÇLDB için yapılan eğilme deneyleri *P* serisi için mümkün olan en küçük boyutlara sahip kiriş numuneleri kullanılarak da belirlenmiş ve büyük kirişlerden elde edilen dayanım değerleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Kiriş boyutlarının seçiminde TS 10515 (1992), TS EN 12390-5 (2010) ve TS 3284 (1979) standartlarından yararlanılmıştır. TS 10515 (1992) standardında kiriş numunesinin genişlik ve yüksekliği için tavsiye edilen minimum boyut çelik lif boyunun 2 katıdır. Bu sebeple çalışmamızda 80x80 mm kesitli ve 300 mm uzunluğuna sahip kirişler tercih edilmiştir. Dört noktalı eğilme deneyleri bu numuneler üzerinde de yapılmış ve *s/d* oranı 3 olacak şekilde yükleme noktaları ayarlanmıştır. Tablo 5.12’de *P* serileri için hazırlanmış 80x80x300 mm boyutlu kirişlerin eğilme dayanımları verilmiştir.

Tablo 5.12. Küçük kirişlerin eğilme dayanımları

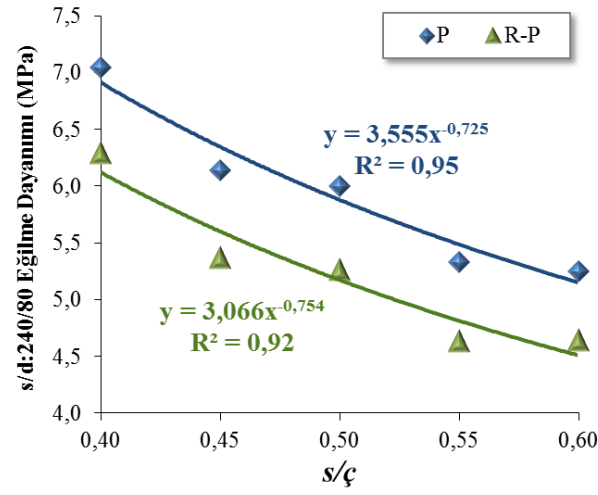
Seri Adı	Küçük Kiriş Parçası Eğilme Dayanımı (MPa)	
	Referans	$V_f = \%0,5$ Kısa Lifli
P1	6,3	7,0
P2	5,4	6,1
P3	5,3	6,0
P4	4,6	5,3
P5	4,6	5,3

Şekil 5.63’de ise küçük bir kiriş numunesinin eğilme deneyi düzeneğindeki resmi görülmektedir. Şekil 5.64’de küçük boyutlu kirişler yardımıyla elde edilen eğilme dayanımları ÇLDB *P* serisi ve referansı için verilmiştir. Görüldüğü gibi burada da çelik lifler eğilme dayanımını olumlu etkilemişlerdir.

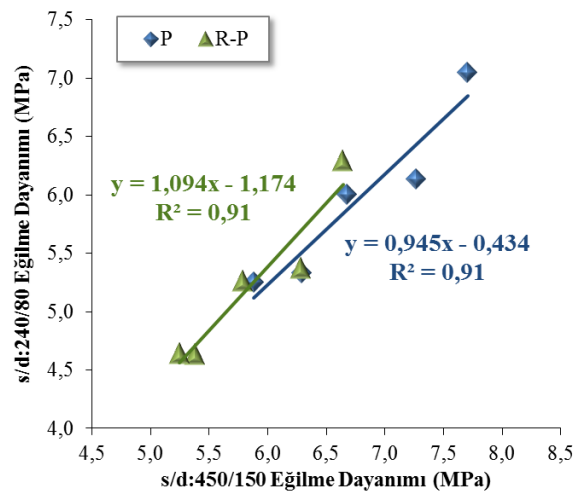
Burada dikkat çeken diğer önemli parametre ise küçük kirişlerin eğilme dayanımlarının büyük kirişlerinkine yakın olarak elde edilmiş olmasıdır. Esas eğilme dayanımlarının büyük kirişlere ait olanlar olduğu düşünülürse, ortalama $\% \pm 12$ oranında bir sapma ile küçük kirişlerin dayanımlarının büyük kirişlerin dayanımlarına yaklaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.63. Küçük kiriş numunesinin eğilme deneyi



Şekil 5.64. Küçük kirişler için eğilme dayanımlarının değişimi

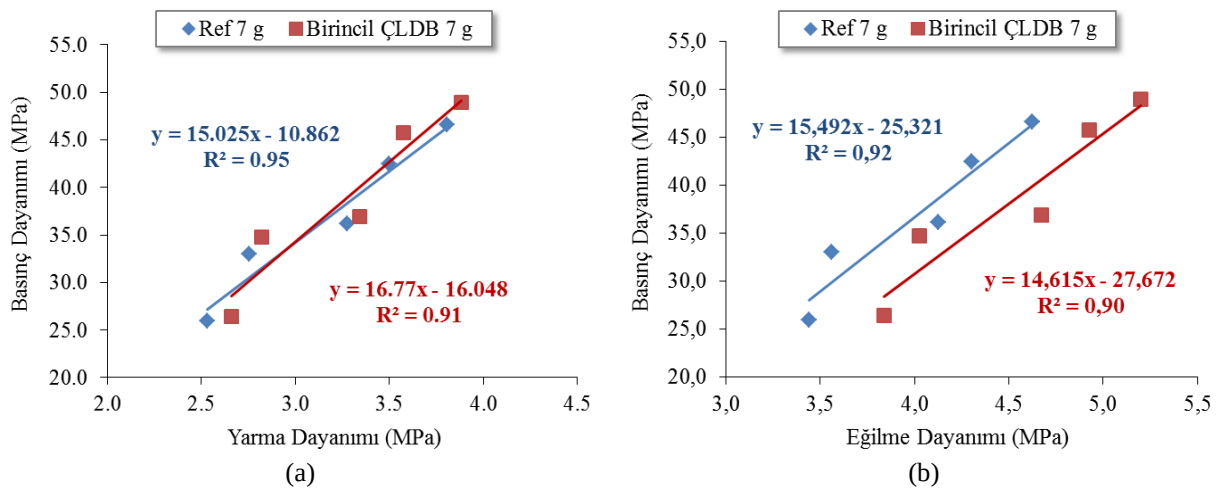


Şekil 5.65. Küçük kirişler ile büyük kirişlerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

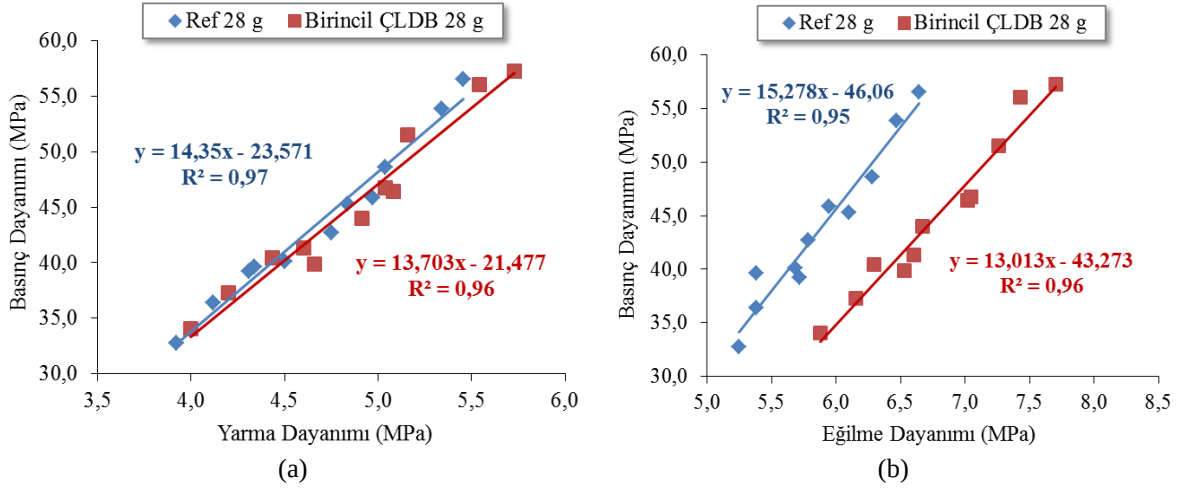
Şekil 5.65’de küçük ve büyük kirişlere ait eğilme dayanımları arasında doğrusal bir ilişki kurulmuş ve yüksek korelasyon değerleri ile bu ilişki ifade edilmiştir. Dolayısıyla lif boyutunun elverdiği kadar kiriş numunesinin boyutlarını küçültmek eğilme dayanımının değişimini etkilememekte ve sonuçları büyük oranlarda yanıltmamaktadır. Öyleyse eğilme dayanımının belirlenmesinde lif uzunluğu da göz önünde bulundurularak, küçük boyutlu kiriş numuneleri tercih edilebilir. Bu durum hem maliyet hem de işçilik açısından avantajlıdır. Bu çalışmada bu küçük kirişler sadece karşılaştırma amaçlı üretilmiş olup esas eğilme dayanımı, büyük kiriş numunelerinden elde edilenler kullanılarak araştırılacaktır.

5.2.5. Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler

Bilindiği gibi, gerek normal betonun gerek ÇLDB’nin mekanik özellikleri arasında matematiksel bir ilişki vardır. Literatürde mekanik özellikler arasındaki bu ilişkiyi ortaya çıkarmaya çalışan çok sayıda çalışma yapılmıştır. Hatta bazı çalışmalarda bu ilişkiler formüller ile ifade edilerek, bu mekanik özelliklerin birbirlerine dönüştürülmeleri öngörülmüştür (Xu ve Shi, 2009; Nataraja vd., 2001; Ramadoss ve Nagamani, 2006; Arıoğlu vd., 2006; Choi ve Yuan, 2005). Her çalışmada malzeme tipleri ve özellikleri değişiklik gösterdiğinden bu ilişkiler de her zaman benzer olmamaktadır. Bu çalışmada da mekanik özellikler arasındaki ilişkiler doğrusal regrasyon analizi ile incelenmiş ve mekanik özellikler arasındaki ilişkileri oldukça yüksek korelasyon değerlerinde ortaya koyan bağıntılar ifade edilmiştir.



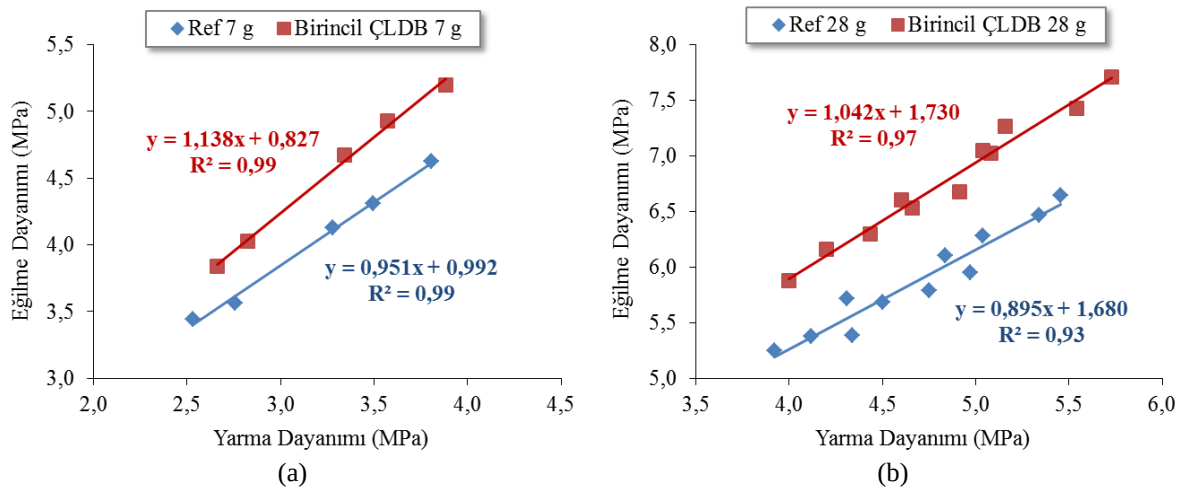
Şekil 5.66. 7 günlük (a) basınç - yarma ile (b) basınç - eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler



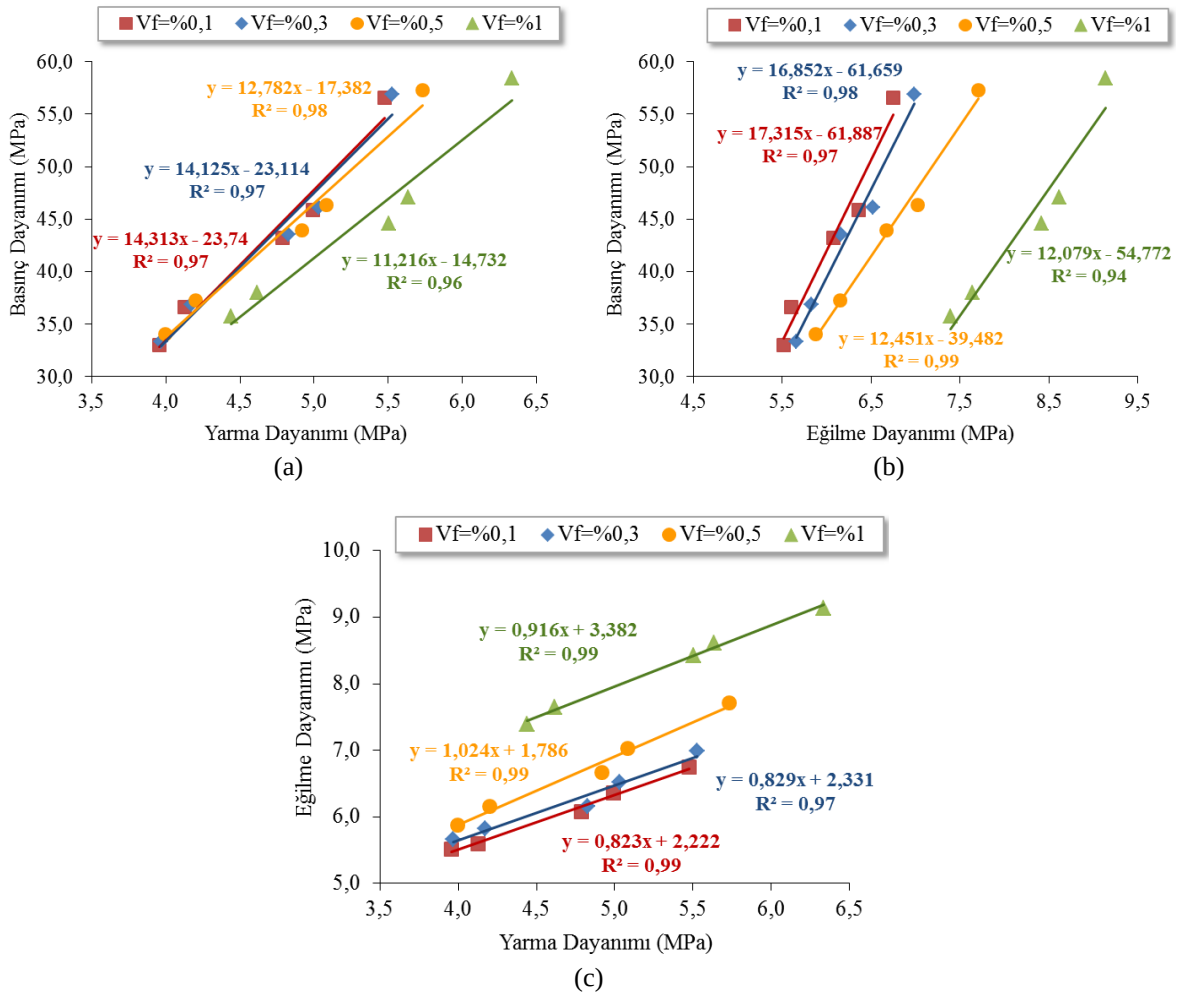
Şekil 5.67. 28 günlük (a) basınç - yarma ile (b) basınç - eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler

Şekil 5.66’da 7 günlük basınç ve yarma dayanımı arasındaki ilişkiler ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler görülmektedir. Şekil 5.67’de ise 28 günlük birincil ÇLDB serilerinin ve referanslarının basınç-yarma ve basınç-eğilme ilişkileri verilmiştir.

Literatürde genel olarak basınç ile diğer mekanik özellikler arasındaki ilişkiler araştırılrsa da eğilme dayanımı ile yarma dayanımı arasında da bir ilişki kurulabileceği bilinmektedir (Xu ve Shi, 2009). Şekil 5.68’de 7 ve 28 günlük eğilme ve yarma dayanımları için ortaya koyulan doğrusal ilişkiler görülmektedir.



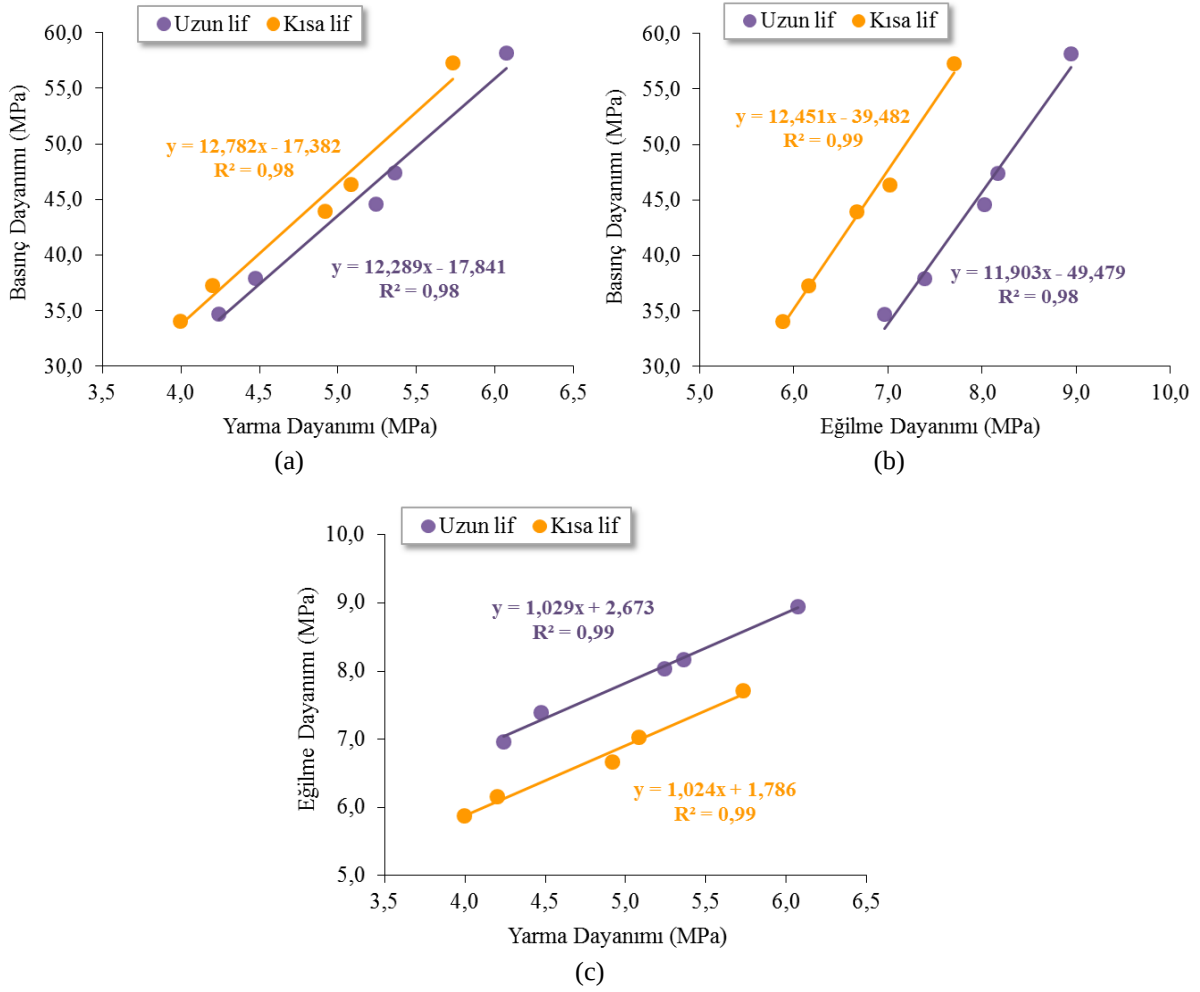
Şekil 5.68. (a) 7 ve (b) 28 günlük eğilme - yarma dayanımları arasındaki ilişkiler



Şekil 5.69. Değişen V_f oranına sahip serilerde (a) basınç - yarma, (b) basınç - eğilme ve (c) eğilme - yarma dayanımları arasındaki ilişkiler

28 günlük ikincil serilerde ise artan lif miktarı ve lif miktarı sabit tutulduğunda değişen lif tipi ile incelenen mekanik özellikler arasındaki ilişkiler her bir seri için kendi içerisinde incelendi. Şekil 5.69 ve 5.70’de bu ilişkiler görülmektedir.

Tüm bu dayanımlar arası ilişki bağıntılarının %90’ın üzerinde bir doğruluk ile birbirine dönüştürülebilmesi ve değişen lif miktarı ile tipi devreye girse bile mekanik özellikler arasında ortaya çıkan doğrusal ilişki, bu çalışma açısından önemli bir sonuçtur.



Şekil 5.70. Lif tipi değiştiğinde (a) basınç - yarma, (b) basınç - eğilme ve (c) eğilme - yarma dayanımları arasındaki ilişkiler

5.2.6. Ultrases Geçiş Hızı

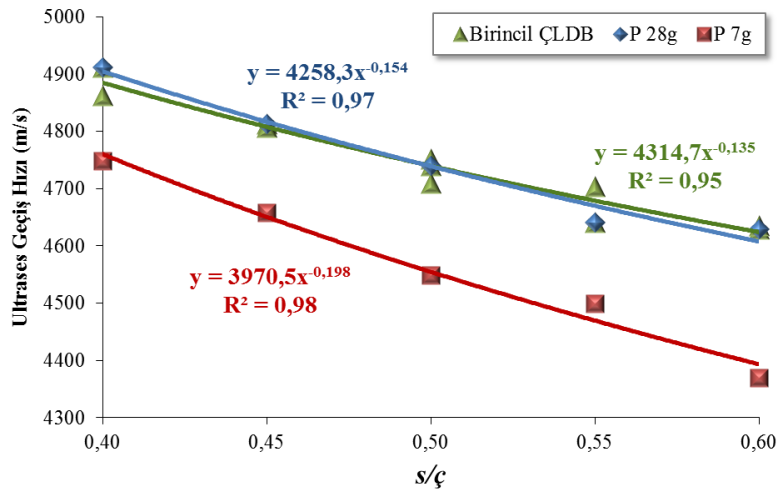
Tablo 5.13’de küp numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri verilmiştir. Numuneler, ultrases hızı ölçümleri yapılmadan 24 saat önce kürden çıkarılmış ve ultrasonik beton test cihazı (PUNDIT) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Ultrases geçiş hızının çelik lif varlığından büyük ölçüde etkilenmediği ve basınç dayanımı ile ilişkili olduğu bilinmektedir (Nataraja vd., 2005; Torrijos vd., 2008). Bu çalışmada da çelik lif varlığı ultrases geçiş hızlarını bir miktar arttırmış olsa da bu artış ihmal edilebilir seviyededir (Tablo 5.13). Şekil 5.71’de 7 ve 28 günlük yaşlara sahip ÇLDB’lerin ultrases geçiş hızı değişimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi beton yaşı arttıkça ultrases geçiş hızları da artış göstermişlerdir. Ayrıca 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri arasındaki fark s/ç oranı arttıkça artmıştır. Nataraja vd. (2005)

yaptıkları çalışmada basınç dayanımı düşük olan numunelerde bu farkın daha da büyüdüğünü göstermişlerdir. Bu çalışmada da s/ζ oranı arttıkça düşen basınç dayanımları göz önünde bulundurulduğunda, ortaya çıkan sonuçlar Nataraja vd. (2005)'nin bulgularına uygunluk göstermektedir. Öyleyse ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasındaki ilişkiyi de irdelemek gerekmektedir.

Tablo 5.13. Referans ve ÇLDB'lerin ultrases geçiş hızı değerleri

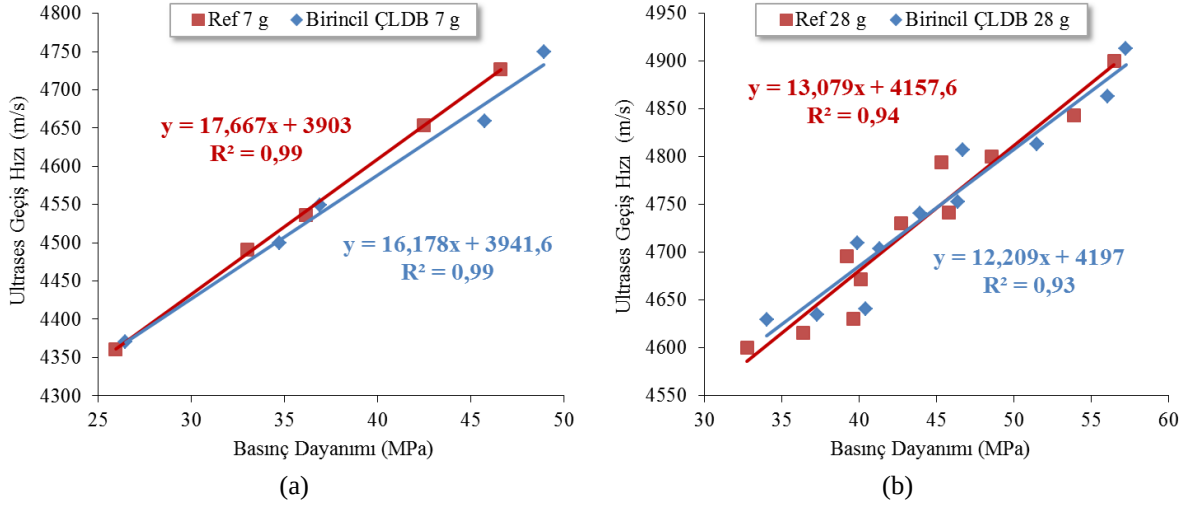
Seri Adı	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)							
	Birincil				İkincil			
	Referans		$V_f=\%0,5$ Kısa Lifli		$V_f=\%0,1$ Kısa Lifli	$V_f=\%0,3$ Kısa Lifli	$V_f=\%1$ Kısa Lifli	$V_f=\%0,5$ Uzun Lifli
	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün
P1	4727	4900	4749	4913	4902	4908	4926	4920
P2	4654	4800	4659	4813	-	-	-	-
P3	4537	4730	4549	4741	4730	4732	4782	4739
P4	4491	4630	4500	4641	-	-	-	-
P5	4360	4600	4370	4630	4594	4606	4650	4659
A1	-	4742	-	4753	4747	4749	4766	4763
A2	-	4672	-	4703	-	-	-	-
A3	-	4616	-	4635	4622	4622	4692	4656
K1	-	4843	-	4863	-	-	-	-
K2	-	4794	-	4807	-	-	-	-
K3	-	4696	-	4710	-	-	-	-



Şekil 5.71. Birincil ÇLDB serilerinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı değişimi

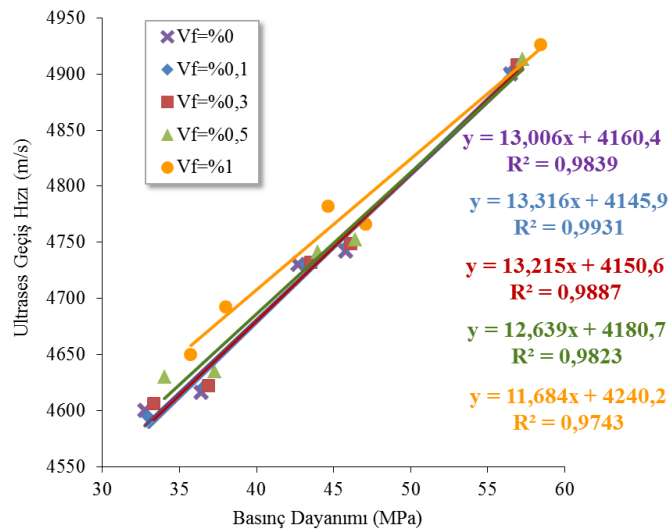
Şekil 5.72'de 7 ve 28 günlük ÇLDB'lerin ve referanslarının ultrases geçiş hızları ve küp basınç dayanımları arasındaki ilişkiler görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi basınç

dayanımları ile ultrases geçiş hızları arasında doğrudan bir ilişki mevcuttur. Ayrıca ÇLDB'lerin grafiği ile referanslarının grafiği neredeyse çakışmaktadır.



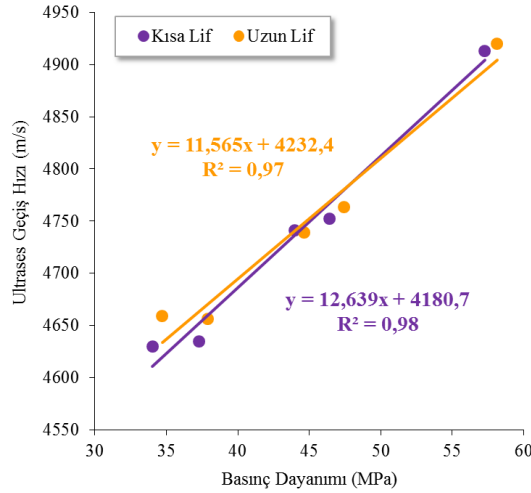
Şekil 5.72. (a) 7 ve (b) 28 günlük betonların ultrases geçiş hızı – basınç dayanımı arasındaki ilişkiler

Birincil serilerde olduğu gibi, V_f ve lif tipinin değiştiği ikincil serilerde de lifler ultrases geçiş hızını ihmal edilebilir seviyelerde etkilemişlerdir. Şekil 5.73'de ikincil serilerin değişen V_f oranı ile ultrases geçiş hızı – basınç dayanımı ilişkileri görülmektedir. Birincil seriler içinden ikincil serilere karşılık gelen serilerin ultrases geçiş hızları da alınarak oluşturulmuş bu şekilde de grafikler neredeyse tamamen çakışmaktadır. V_f değişimi de bu davranış üzerinde neredeyse etkisizdir.



Şekil 5.73. V_f değişiminin ultrases geçiş hızları üzerindeki etkisi

Benzer şekilde V_f sabit tutulduğunda değişen çelik lif boyu da bu ilişki üzerinde etkisizdir (Şekil 5.74).



Şekil 5.74. Lif boyu değişiminin ultrases geçiş hızları üzerindeki etkisi

5.2.7. Çoklu Grafikler Kullanılarak ÇLDB Karışımlarının Ön Tasarımı

Buraya kadar yapılan çalışmalarda ÇLDB'nin agrega, çimento hamuru ve çelik lif açısından farklılık gösteren tipleri incelenmiş ve her birinin mekanik ve taze özellikler üzerindeki etkileri ortaya çıkarılmıştır. Bu tez çalışmasının asıl amacı olan, ÇLDB'nin tasarımı için sunulacak olan grafik yaklaşım ise bu bölümde anlatılacaktır. Sunulacak grafik tabanlı tasarım bu çalışmada yer alan ÇLDB karışımları esas alınarak hazırlanmıştır. Bu sebeple üretim için kullanılan malzemelerin özellikleri ve kalitesi değiştiğinde veya ilave toz malzeme kullanıldığında ÇLDB özelliklerini kesin ve tam olarak tahmin etmek yerine, ön tasarım aşaması için bir fikir verecektir. Öyleyse çalışmada uygulanan bu yaklaşımı “ön tasarım” olarak adlandırmak doğru olacaktır.

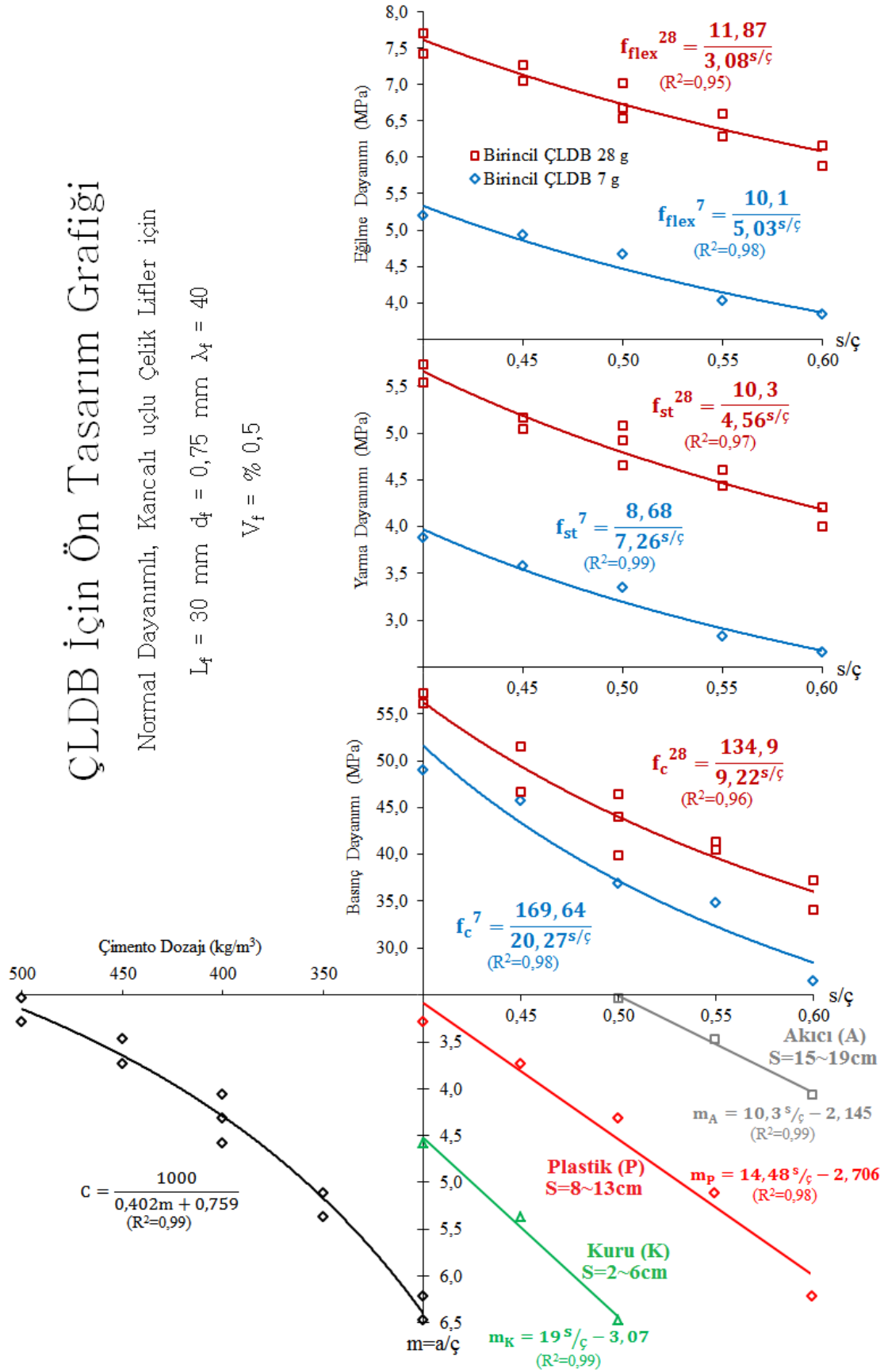
Şekil 5.75’de birincil seriler ile oluşturulan monogram görülmektedir. Bu monogramda üç farklı işlenebilirlik sınıfında toplanabilen ÇLDB karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç, yarma ve eğilme dayanımları tahmin edilebilmektedir. Hem işlenebilirlik özelliklerini hem de mekanik özelliklerini bir arada inceleyen bu monogram literatür ve ÇLDB uygulamaları açısından ihtiyaç duyulan bir ön tasarım yaklaşımı sunmaktadır.

ÇLDB İçin Ön Tasarım Grafiği

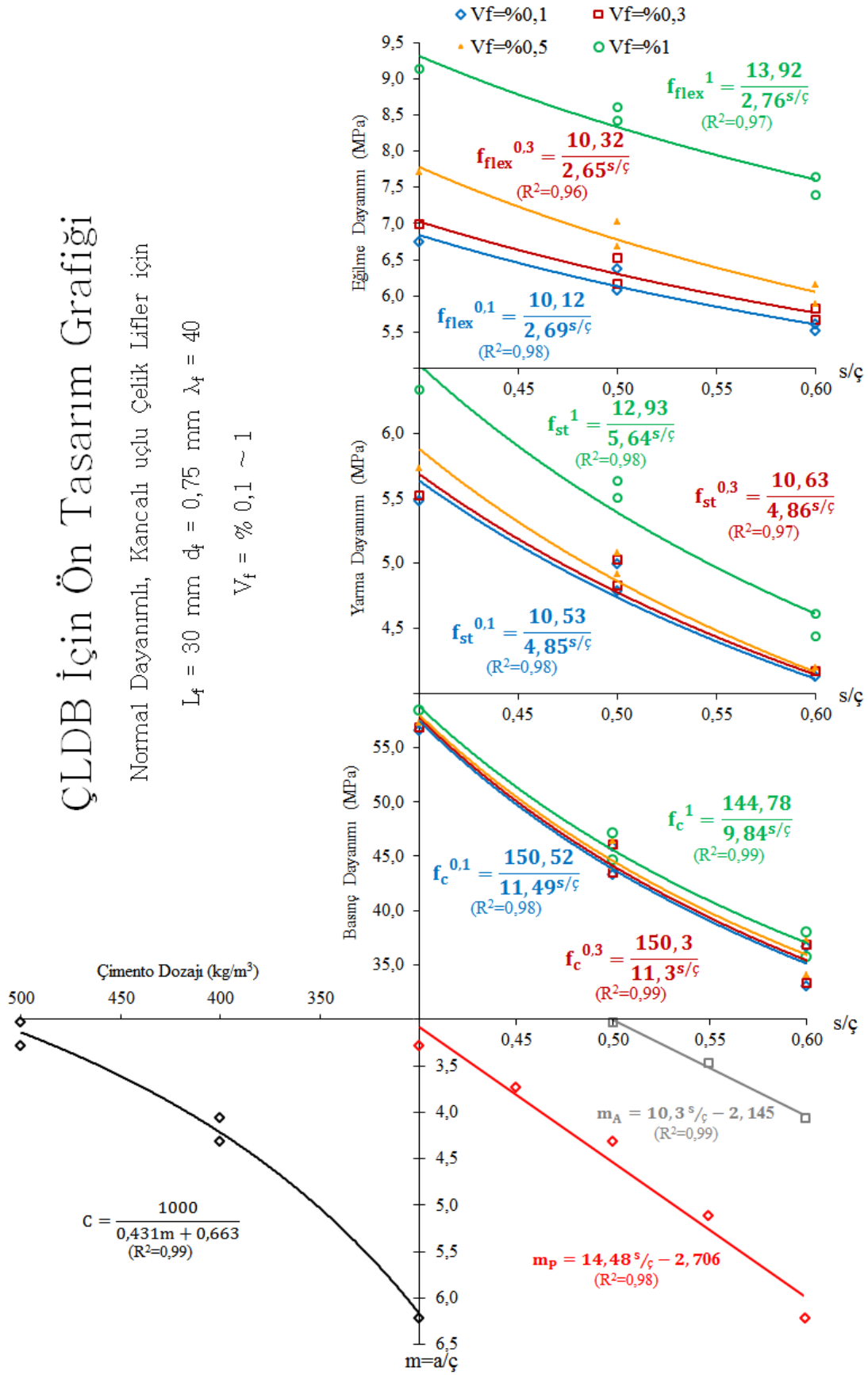
Normal Dayanımlı, Kancalı uçlu Çelik Lifler için

$$L_f = 30 \text{ mm} \quad d_f = 0,75 \text{ mm} \quad \lambda_f = 40$$

$$V_f = \% 0,5$$



Şekil 5.75. Birincil seriler ile hazırlanmış ÇLDB ön tasarım monogramı



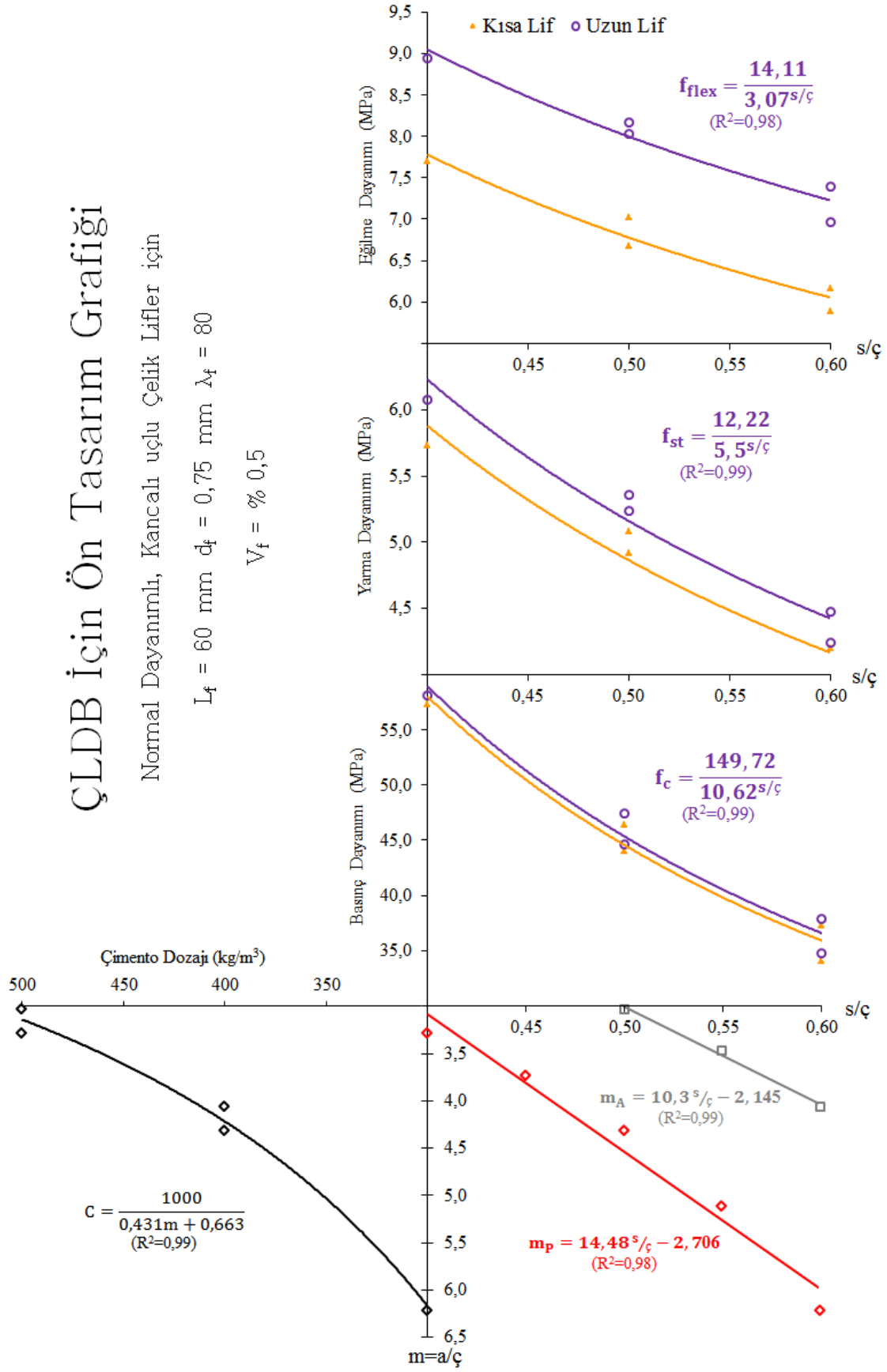
Şekil 5.76. Değişen V_f oranları için ikincil serilerle hazırlanmış ÇLDB ön tasarım monogramı

ÇLDB İçin Ön Tasarım Grafiği

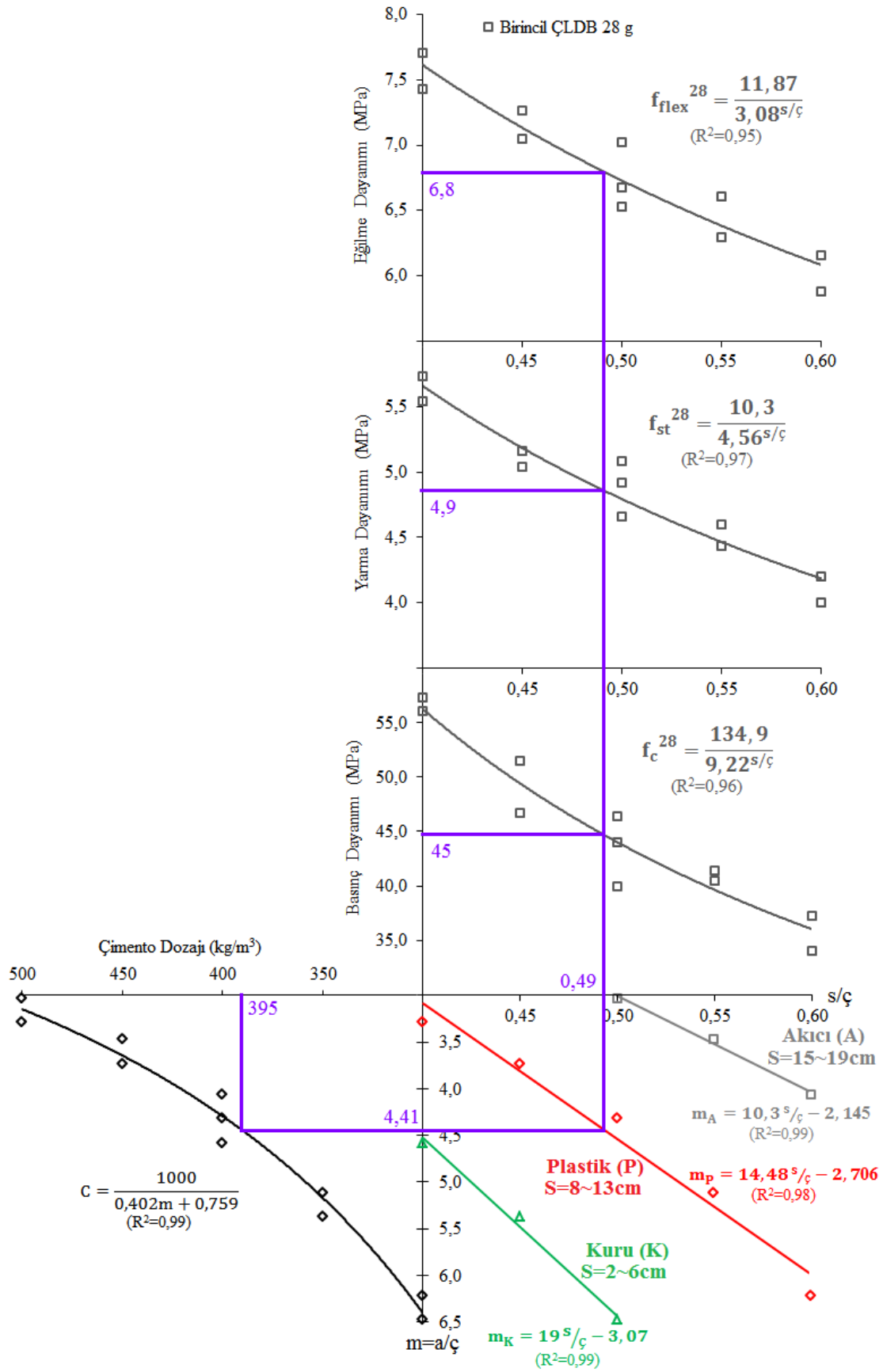
Normal Dayanımlı, Kancalı uçlu Çelik Lifler için

$$L_f = 60 \text{ mm} \quad d_f = 0,75 \text{ mm} \quad \lambda_f = 80$$

$$V_f = \% 0,5$$



Şekil 5.77. Uzun lifler için ikincil serilerle hazırlanmış ÇLDB ön tasarım monogramı



Şekil 5.78. Ön tasarım monogramının kullanımı

Şekil 5.76 ve 5.77’de birincil serilerden bir kaçı ile üretilen farklı ÇLDB’ler için de bu monogramı çoğaltmak mümkün olmuştur. Daha önce bahsedildiği gibi ÇLDB davranışını en az sayıda beton serisi ile ifade edebilmek için seçilen ikincil seriler ile monogram çoğaltılabilmektedir. Şekil 5.76 ve 5.77’de sarı çizgi ile görülen grafik birincil serilerin davranışını ifade etmektedir. İkincil seriler ile bu davranışın grafiği ötelenerek yeni monogramlar üretilmiştir. Üstelik Abrams, Molinari ve Lyse kanunlarında öngörülen ampirik formüllerle de ifade edilen grafikler yüksek korelasyon değerlerine ulaşmışlardır. Bu sayede değişen lif boyutu veya oranı için de bir ön tasarım fikri üretebilecek bir metot ortaya koyulmuştur.

Bu monogramların kullanımına bir örnek olarak Şekil 5.78’deki gösterim incelenebilir. Görüldüğü gibi monogram görsel olarak pratik biçimde kullanılabileceği gibi, verilen formüller yardımıyla da net sonuçlara ulaşılabilir. Şekil 5.78’de 28 günlük birincil seriler ile oluşturulmuş örnek monogram iki şekilde incelenebilir. Birincisi belli bir çimento dozajından yola çıkarak istenilen işlenebilirlik sınıfına göre a/ϕ (agrega/çimento) ve s/ϕ (su/çimento) oranını tahmin ederek, dayanımlar için de yaklaşık değerleri tahmin edilebilir. İkincisi ise hedef bir dayanım değerinden yola çıkarak ÇLDB bileşimini tahmin etmektir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, ortaya çıkan bu değerlerin yeni üretilecek bir ÇLDB için bir ön tasarım hedefi olduğudur. Monogramdan elde edilen sonuçlar, değişen üretim ve kür koşulları ile kullanılan malzeme özelliklerinden etkilenecek değişiklik gösterecektir. Bu sebeple değişen lif tipleri ve miktarları için ayrı monogramlar verilmesi uygun görülmüştür. Değişen lif miktarı veya özellikleri ile değişebilecek ÇLDB özellikleri ise grafiklerin ara noktalarına düşürülerek tahmin edilebilmesi mümkündür.

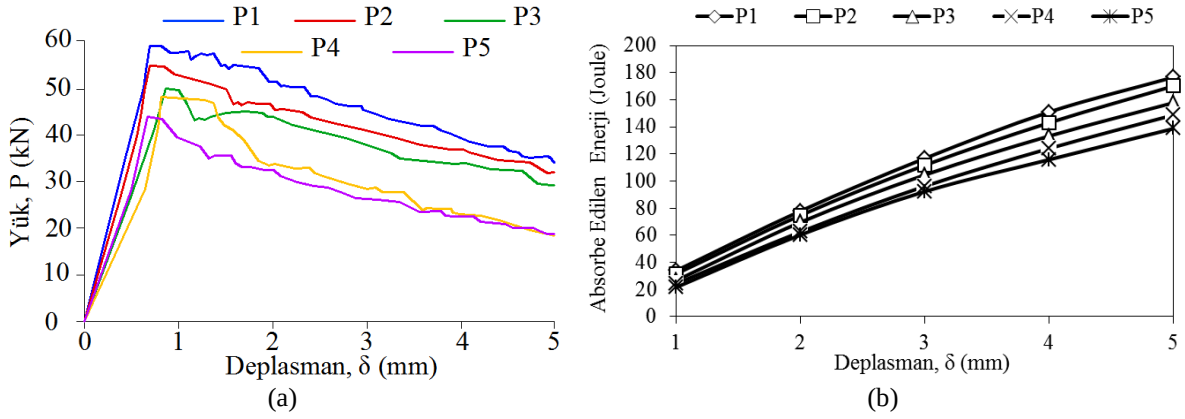
Bu monogramları değişen V_f ve lif tipinde olduğu gibi değişen beton bileşenlerine göre de revize etmek mümkündür. Örneğin bu çalışmada kullanılan agrega tipinden farklı bir agrega için, monogramdaki belirli seriler üretilip özellikleri elde edilerek monogramdaki grafikler bu ÇLDB’lerin ilgili değerlerine doğru düşey ötelenebilir. Hatta bu yolla farklı tip ÇLDB’ler (yüksek dayanımlı, kendiliğinden yerleşen vs.) için bile ön tasarım monogramları üretilerek uygulamada kullanıma sunulabilir.

5.2.8. Tokluk

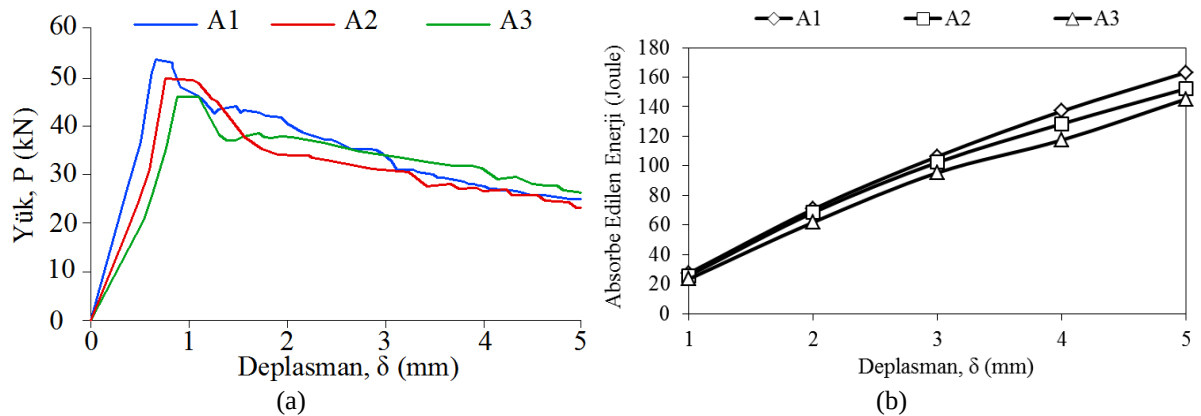
Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi tokluk özelliği, çelik lifler sayesinde deformasyon yapabilme yeteneği kazanan ÇLDB’nin en üstün özelliğidir. Çelik lifler,

dayanımlar üzerinde etkili olmasalar bile tokluğu arttırabilirler. Normal betonun tokluk değeri ÇLDB'nin tokluğunun yanında ihmal edilebilecek seviyelerde kalır. Bu çalışmada her bir numunenin eğilme deneyi sırasında elde edilmiş yük-deplasman grafiğinin altında kalan alan hesaplanarak tokluk değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.79, 5.80 ve 5.81'de birincil P , A ve K serileri için yük-deplasman grafikleri ile absorbe edilen enerji-deplasman değişimleri verilmiştir. Şekillerden anlaşıldığı üzere, deplasman miktarı arttıkça sünek davranış sebebiyle absorbe edilen enerji de artmaktadır. Ayrıca agrega granülometri ve D_{max} değişiminde olduğu gibi, çimento dozajı ve s/ϕ oranının değişimi de ÇLDB'nin absorbe edilen enerji miktarını etkilemektedir.

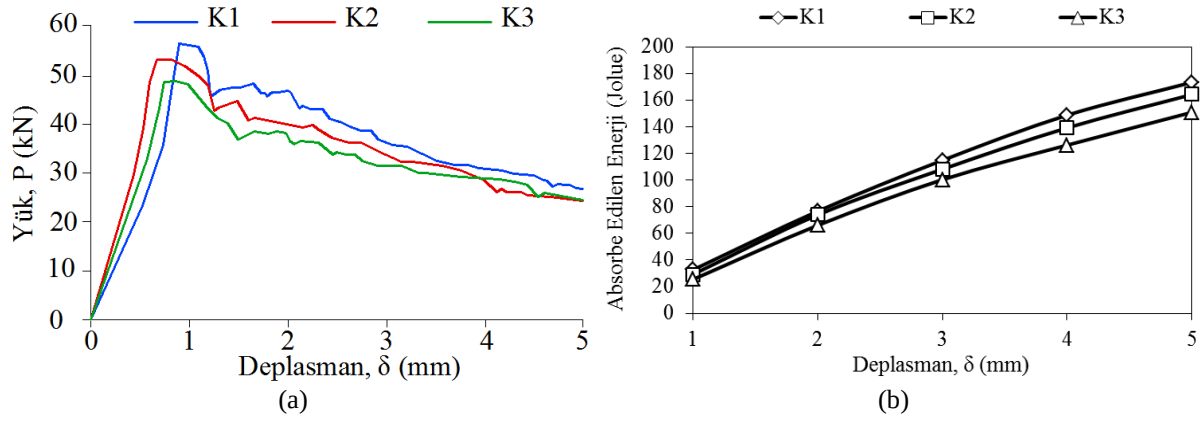
Tablo 5.14'de hem birincil hem de ikincil ÇLDB'lerin $\delta=5$ mm deplasman değeri için toklukları verilmiştir.



Şekil 5.79. P serileri için, (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi



Şekil 5.80. A serileri için, (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi

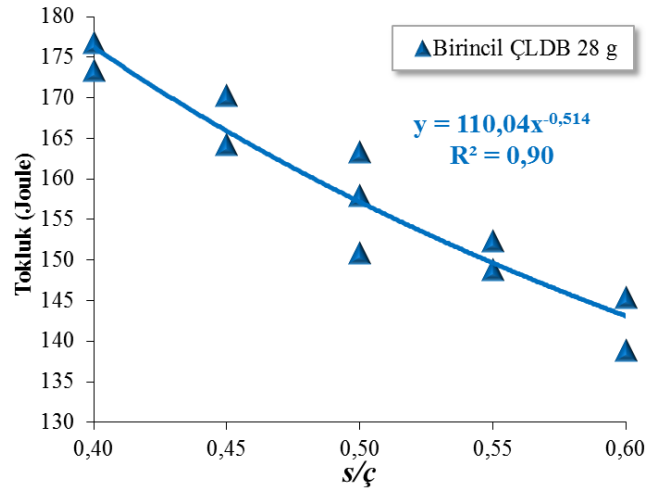


Şekil 5.81. K serileri için, (a) yük-deplasman grafikleri, (b) absorbe edilen enerji-deplasman değişimi

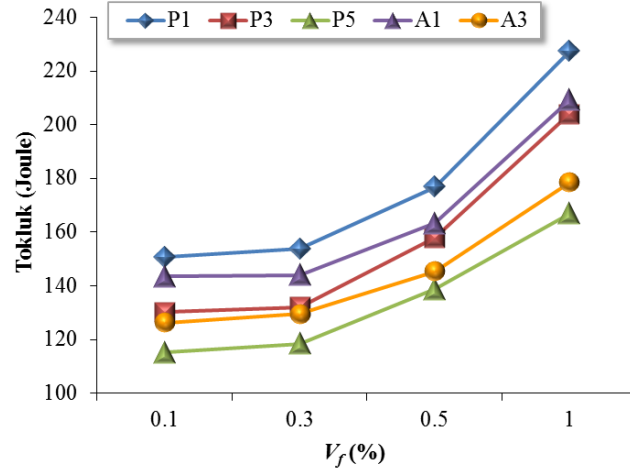
Tablo 5.14. ÇLDB'lerin toklukları

Seri Adı	Tokluk (T) (Joule)				
	Birincil	İkincil			
	$V_f = \%0,5$ Kısa Lifli	$V_f = \%0,1$ Kısa Lifli	$V_f = \%0,3$ Kısa Lifli	$V_f = \%1$ Kısa Lifli	$V_f = \%0,5$ Uzun Lifli
	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün	28 gün
P1	177	151	154	227	243
P2	170	-	-	-	-
P3	158	130	132	204	223
P4	149	-	-	-	-
P5	139	115	118	167	187
A1	163	144	144	209	224
A2	152	-	-	-	-
A3	145	126	130	179	192
K1	173	-	-	-	-
K2	164	-	-	-	-
K3	151	-	-	-	-

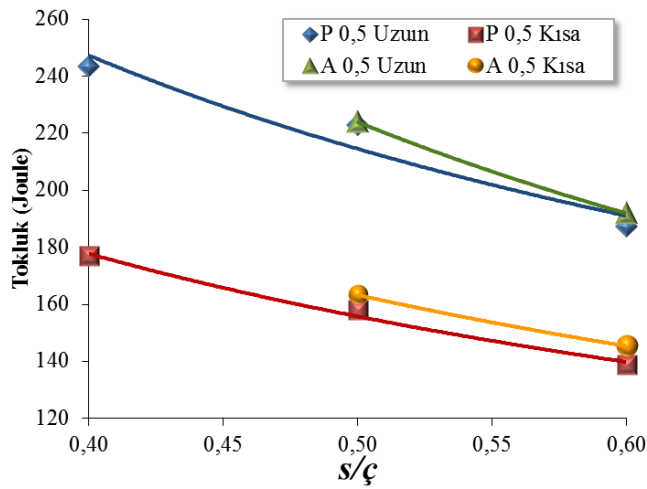
Şekil 5.82'de birincil ÇLDB serilerinin s/ϕ oranı ile tokluk değişimleri verilmiştir. Dayanım değerlerinde olduğu gibi s/ϕ oranı arttıkça tokluk da azalmaktadır. Ayrıca tokluğun çelik lif tipi ve miktarından da etkilendiği bilinmektedir. Şekil 5.83'de artan V_f oranı tokluğun da artmasına sebep olmuştur. Özellikle $\%0,3$ oranından daha fazla çelik lif kullanımı tokluğu dikkate değer biçimde olumlu etkilemiştir.



Şekil 5.82. Birincil ÇLDB serilerinin tokluklarının değişimi



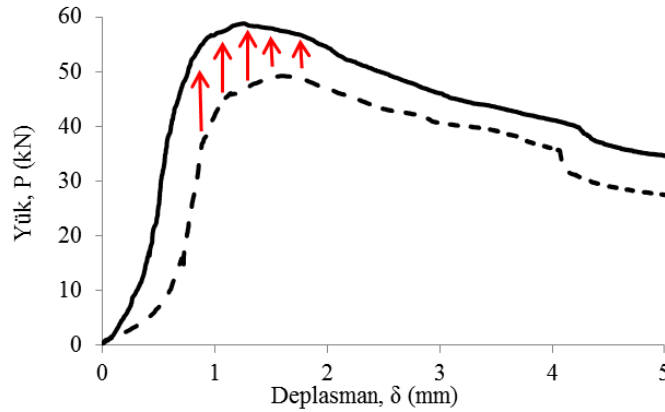
Şekil 5.83. V_f değişiminin tokluk üzerindeki etkisi



Şekil 5.84. Lif boyu değişiminin tokluk üzerindeki etkisi

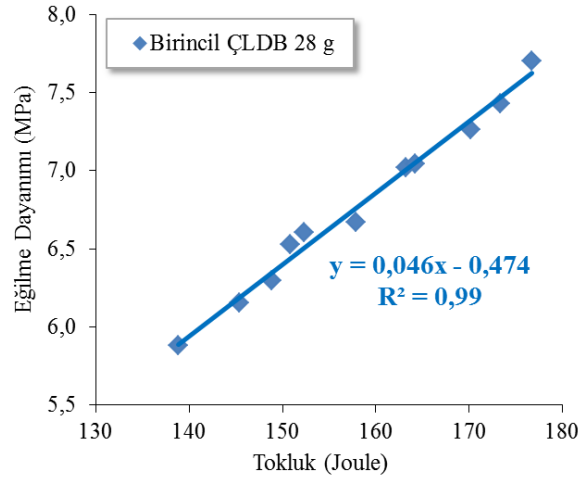
Şekil 5.84’de ise uzun ve kısa lifler karşılaştırılmış ve artan lif boyunun da tokluk üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Tokluk ÇLDB kompozitinin en önemli özelliğidir ve hem beton bileşiminden hem de çelik lif miktarı ve tipinden etkilenmektedir. Lif miktarının $V_f=0,1$ oranından $V_f=0,3$ oranına çıkması tokluğu ortalama %2 arttırırken, bu artış $V_f=0,5$ için ortalama %18 ve $V_f=1$ için ortalama %48 oranındadır. Ayrıca lif miktarı $V_f=0,5$ oranında sabitken kısa çelik lif yerine uzun çelik lif kullanılması da tokluğu ortalama %37 arttırmıştır.

Şekil 5.85’de ÇLDB için tipik bir yük deplasman grafiği örnek olarak verilmiştir. Değişen beton dayanımı ile ÇLDB’nin maksimum eğilme yükünün artışının, grafiğin yükselmesini dolayısı ile tokluğun artmasını sağlayacağı açıktır. Burada en büyük deplasman değeri sınırlandırılmış olduğundan grafiğin altında kalan toplam alan olan tokluk parametresi yüklerin artışına bağlı, doğru orantılı olarak değişir. Öyleyse maksimum eğilme yükü kullanılarak hesaplanan eğilme dayanımı ile tokluk arasında doğrusal bir ilişki kurulabilir.

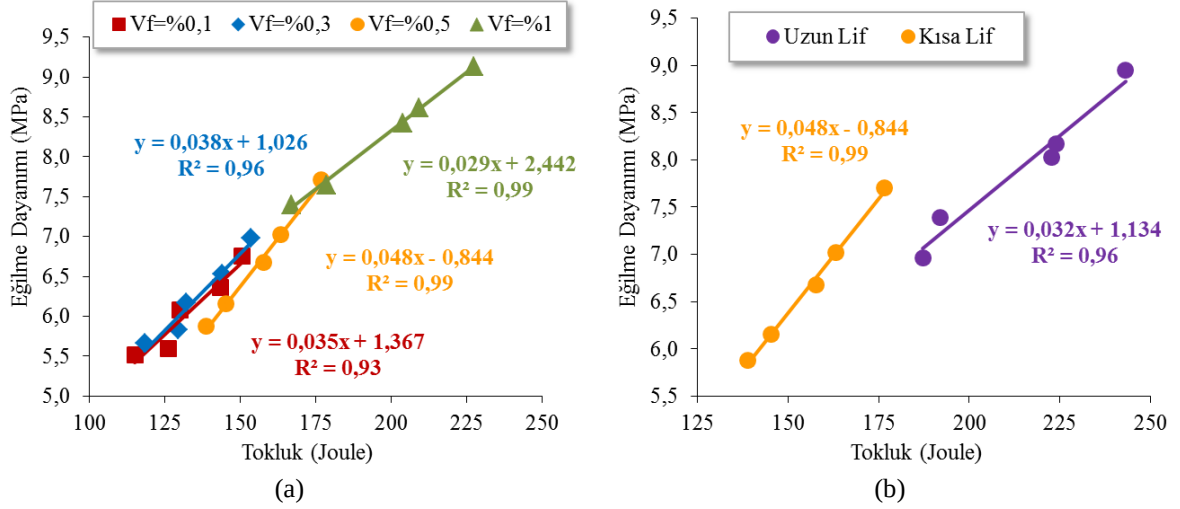


Şekil 5.85. Yük-deplasman grafiği ile tokluğun artması

Şekil 5.86’da birincil ÇLDB serilerinin eğilme dayanımları ve toklukları arasındaki doğrusal ilişki görülmektedir. Hatta ikincil serilerin bile eğilme dayanımı ve toklukları arasında yüksek korelasyonlara sahip doğrusal ilişkiler ortaya çıkarmak mümkündür (Şekil 5.87).



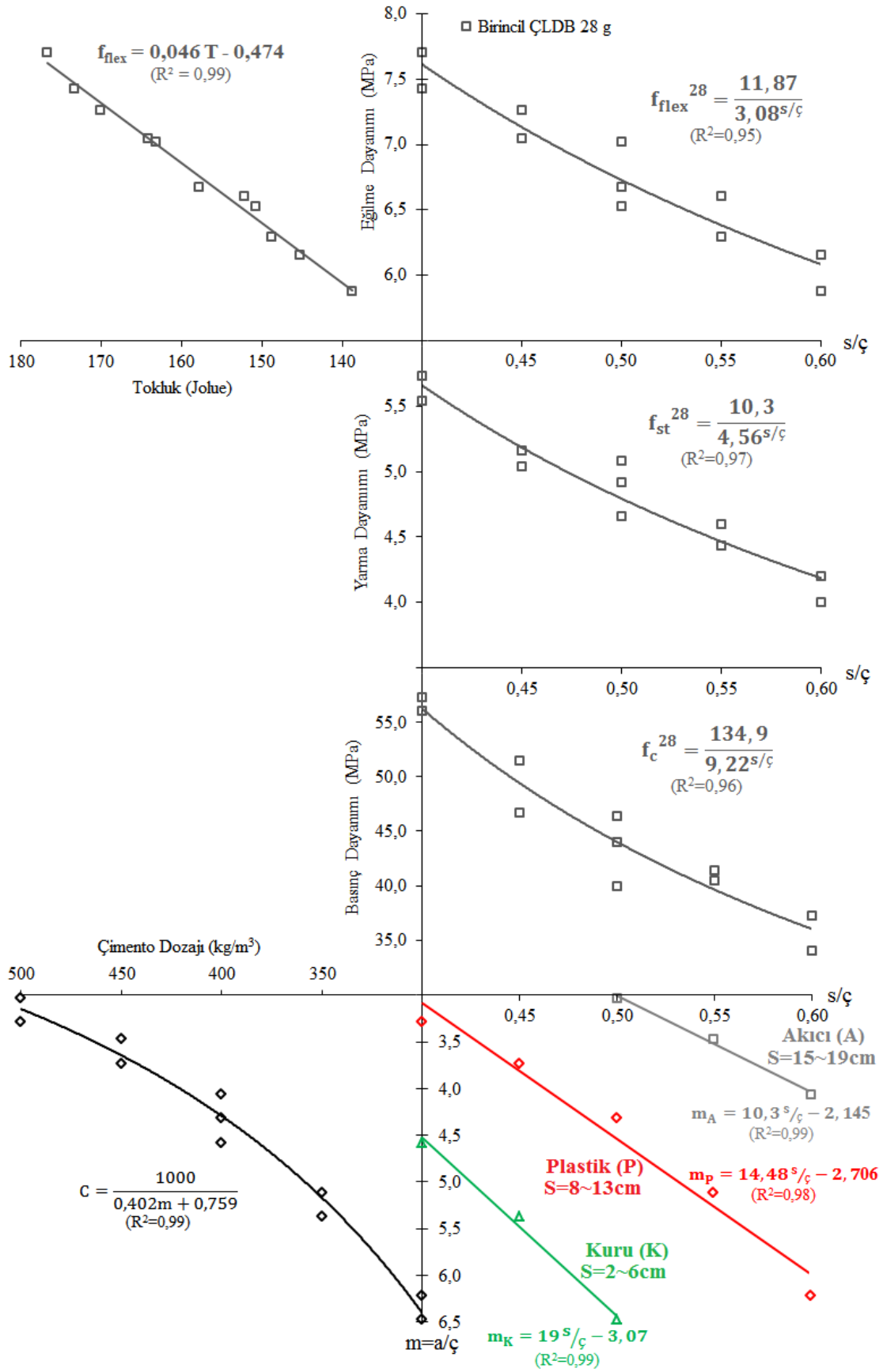
Şekil 5.86. Eğilme dayanımı ve tokluk arasındaki ilişki



Şekil 5.87. (a) değişen V_f oranlarına göre, (b) değişen lif tipine göre eğilme dayanımı-tokluk ilişkisi

Eğilme dayanımı ile tokluk ilişkisi bu çalışmanın grafik tasarım kısmı için de önemlidir. Çünkü bu kadar yüksek doğruluğa sahip bağıntılar ile monogramdan eğilme dayanımı tahmin edilebildiği gibi tokluk değeri de tahmin edilebilir. Hatta bu eğilme - tokluk ilişkisi 28 günlük birincil serilerin ön tasarım grafiği ile Şekil 5.88’de olduğu gibi birleştirilebilir.

Tokluğun bu şekilde tahmin edilebilecek olması önemli bir sonuçtur. Çünkü tokluk ölçümleri, genel eğilme dayanımı deney cihazlarının yanında özel ve nitelikli cihaz ve ekipmanlara ihtiyaç duyar. Üstelik deney sonunda tokluk değerini elde edebilmek için yük-deplasman grafiğinin altında kalan alan hesap edilmelidir. Fakat böylesine pratik bir yöntem ile tokluk değeri tahmin edilebilir.



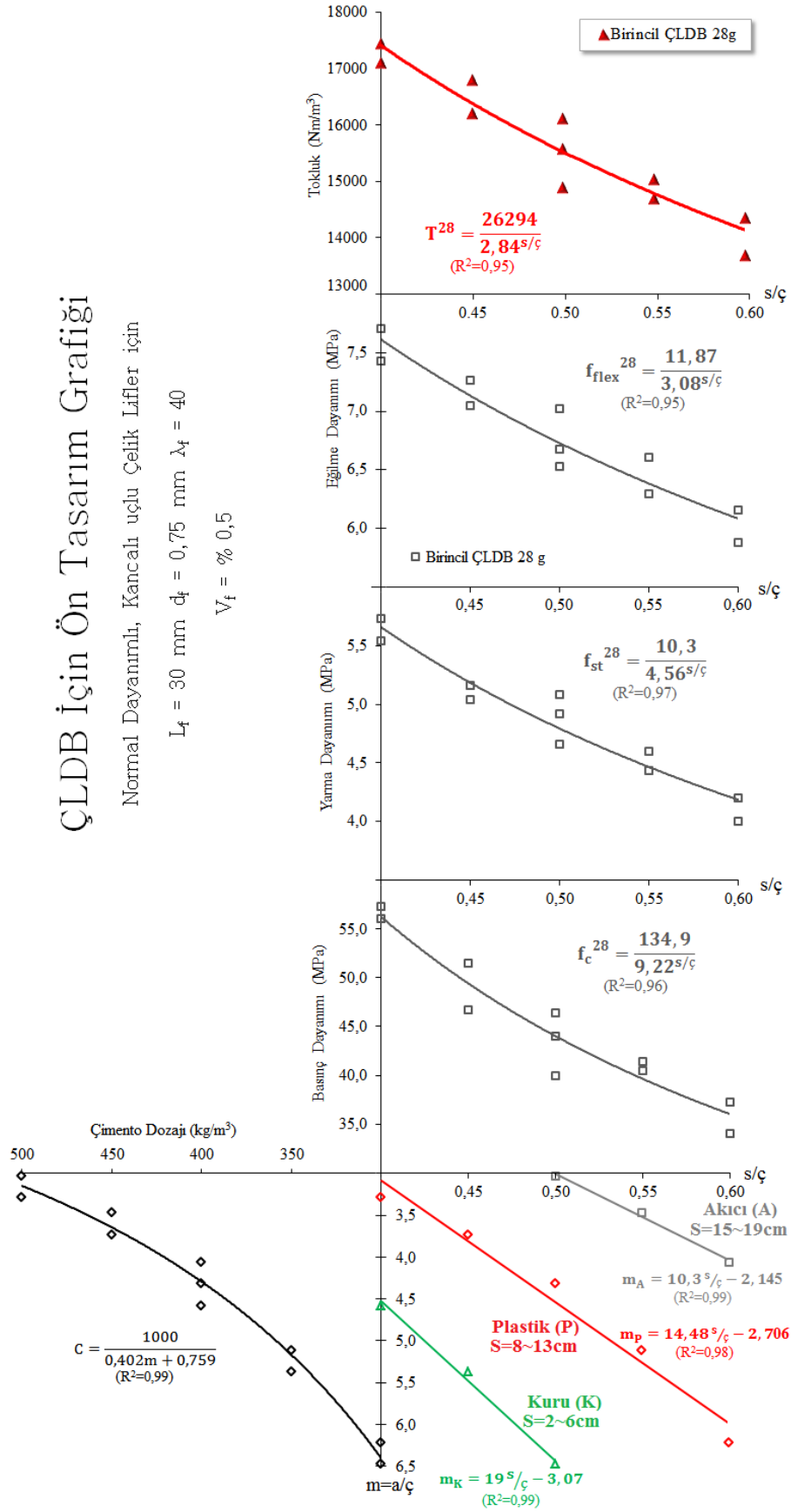
Şekil 5.88. 28 günlük birincil ÇLDB'ler için tokluk dahil ön tasarım monogramı

ÇLDB İçin Ön Tasarım Grafiği

Normal Dayanımlı, Kancalı uçlu Çelik Lifler için

$L_f = 30 \text{ mm}$ $d_f = 0,75 \text{ mm}$ $\lambda_f = 40$

$V_f = \% 0,5$



Şekil 5.89. Farklı bir düzende 28 günlük birincil ÇLDB'ler için tokluk dahil ön tasarım monogramı

Başka bir yaklaşım ile ÇLDB'nin tokluk özelliği, Abrams Kanununa benzer şekilde ifade edilerek Şekil 5.88 yerine, Şekil 5.89'daki gibi gösterilebilir. Burada tokluk değerleri, numune boyutunun etkisini kaldırmak için numune hacmine bölünerek birim hacim başına düşen tokluk olarak verilmiştir. Numune hacmi, kesit alanı ile mesnetler arası açıklık mesafesinin çarpımı olarak hesaplanmıştır. Böylece monogramda numune boyutu değişiminin etkisi elimine edilmeye çalışılmıştır. Bilindiği gibi, liflerin etrafını saran beton matrisin dayanımı ile çelik liflerin betondan sıyrılmaya karşı göstereceği direnç doğru orantılıdır. Önceki bölümlerde çelik lifleri saran beton matrisin dayanımının artışının, yeterince lif kullanılmış ise tokluğu arttırdığından bahsedilmişti (Altun vd., 2007; Kurihara vd., 2000). Dolayısı ile tokluğunun s/ζ oranına karşı değişiminin, beton dayanımındaki değişimler ile benzer olması tesadüf değildir. Öyleyse birim hacim için, ÇLDB'nin tokluğu bu çalışmada, Abrams Kanunundan yola çıkılarak denklem (5.1)'deki gibi ifade edilebilir.

$$T = \frac{26294}{2,84^{s/\zeta}} \quad (5.1)$$

Bu ifadedeki tokluk, $\delta=5$ mm için ÇLDB'nin yük-deplasman grafiğinin altında kalan toplam alandır. Denklem (5.1), 150/150/500 mm boyutlu kiriş numuneleri için geçerli olup, bu çalışmada %95 doğruluk ile tokluk değerini ifade edebilmeyi başarmıştır.

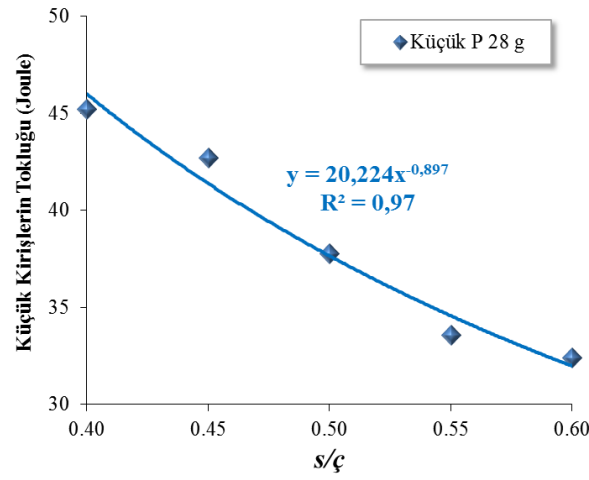
5.2.8.1. Küçük Kiriş Numuneleri Kullanılarak Tokluğun Belirlenmesi

150x150x500 mm boyutlu büyük kirişler ile belirlenen tokluk değerlerinden sonra bunlarla karşılaştırılmak üzere 80x80x300 mm boyutlu küçük kirişlerin de toklukları hesaplanmıştır. Tablo 5.15'de P serisi için üretilen küçük kirişlerin $\delta=5$ mm deplasman değerindeki 28 günlük toklukları görülmektedir.

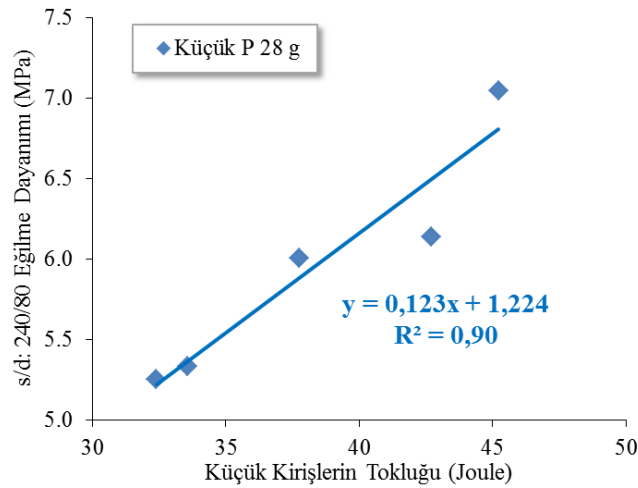
Tablo 5.15. Küçük kirişlerin eğilme toklukları

Seri Adı	Küçük Kirişlerin Tokluğu (Joule)
	$V_f=\%0,5$ Kısa Lifli
P1	45
P2	43
P3	38
P4	34
P5	32

Küçük kirişler ile büyük kirişlerin eğilme dayanımları arasındaki farkın küçük olduğundan bahsedilmişti. Bu dayanım farkı çok büyük olmamasına rağmen, tokluk değerinde bu durum değişmiş ve kirişlerin boyut değişimi tokluğun daha düşük çıkmasına sebep olmuştur. Küçük kirişlerin $\delta=5$ mm için tokluk değerleri, büyük kirişlerin tokluk değerlerinin yaklaşık %24'ü civarındadır. Yine de büyük kirişlerde olduğu gibi s/ζ oranı arttıkça küçük kirişlerin tokluk değerleri azalmış (Şekil 5.90) ve kendi eğilme dayanımları ile toklukları arasında da doğrusal bir ilişki görülmüştür (Şekil 5.91).



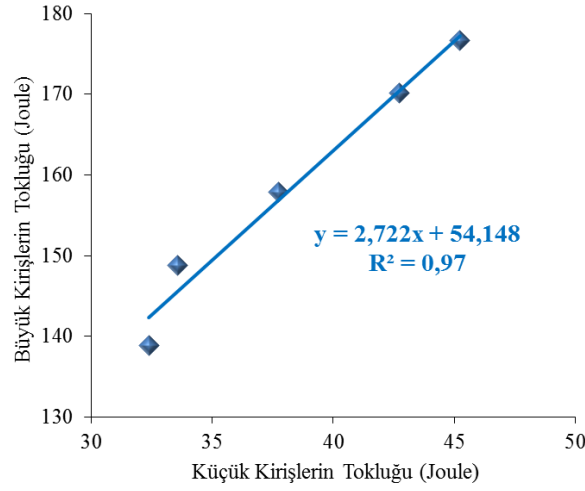
Şekil 5.90. Küçük kirişlerin tokluklarının değişimi



Şekil 5.91. Küçük kirişlerin eğilme dayanımları ile toklukları arasındaki ilişki

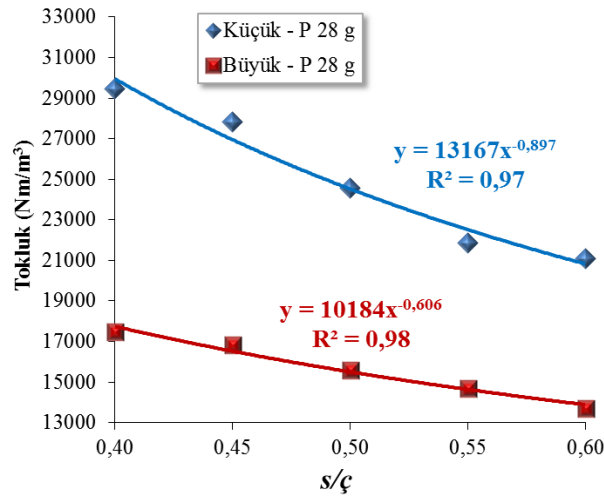
Öyleyse bu küçük kirişlerin toklukları ile büyük kirişlerin toklukları arasında doğrusal bir ilişki de ortaya çıkarılabilir (Şekil 5.92). Böyle bir doğrusal ilişkiden söz edilebiliyorsa,

tokluk değişimini incelemek üzere kiriş boyutları lif boyunun elverdiği ölçülerde azaltılabilir.

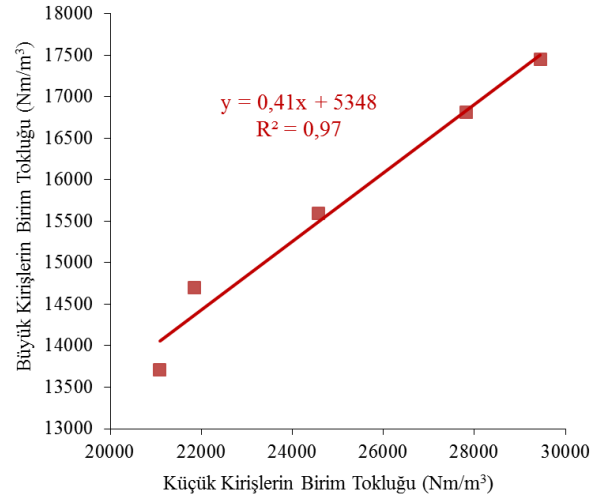


Şekil 5.92. Büyük kirişler ile küçük kirişlerin toklukları arasındaki ilişki

Küçük ve büyük kiriş numunelerinin tokluklarını numune hacimlerine bölerek birim hacim başına düşen tokluk olarak hesapladığımızda ise iki kiriş numunesi için oluşan değer farkı azalmaktadır. Şekil 5.93’de büyük ve küçük kirişlerin birim tokluklarının s/ζ oranına göre değişimi görülmektedir. Şekil 5.94’de ise küçük ve büyük kirişler için hesaplanan birim tokluklar arasındaki doğrusal ilişki verilmiştir.



Şekil 5.93. Büyük kirişler ile küçük kirişlerin birim tokluklarının değişimi



Şekil 5.94. Büyük kirişler ile küçük kirişlerin birim toklukları arasındaki ilişki

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, ÇLDB'nin gerek taze gerek normal betona kıyasla üstün sertleşmiş özelliklerini her yönüyle araştırmayı amaçlamış ve iki aşamada yürütülen araştırmalar başarı ile sonlandırılmıştır. ÇLDB malzemesi, bileşim parametrelerinden yola çıkarak agrega, çimento hamuru matrisi ve çelik lif bazında deneysel olarak incelenmiştir. İlk olarak literatürde ihtiyaç duyulduğu düşünülen çimento dozajı ve s/ϕ oranı sabitken agrega granülometrisinin ve D_{max} değişimin ÇLDB özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve daha sonra bu çalışmanın esas hedefini oluşturan ÇLDB için ön tasarım yaklaşımına geçilmiştir. ÇLDB'nin ön tasarımına grafik yaklaşım için üretilen beton serilerinde iki grup oluşturulmuştur. Bunların ilki (birincil seriler) çimento dozajı ve s/ϕ oranı bakımından farklılık gösteren beton serilerinden oluşmakta ve grafik yaklaşım için bir taban oluşturmaktadır. ikincisi (ikincil seriler), ilk seriler içinden seçilen bazı karışımlarla değişen V_f oranı ve lif tipi gibi parametrelerin incelenmesine olanak tanımıştır. Bu sayede grafik yaklaşım değişen lif oranı ve tipi için çoğaltılabilmektedir. Aşağıda tüm çalışmanın iki aşamasının da sonuçları sunulmuş ve ileride yapılabilecek çalışmalara önerilerde bulunulmuştur.

Tez çalışmasının deneysel verilerinin analizleri sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Çalışmanın ilk aşamasında incelenen granülometri değişiminde $V_f=1\%$ oranında 80/60 tipinde çelik lif kullanılmıştır. Bu çelik lif varlığında ilk olarak işlenebilirliğin oldukça azaldığı gözlemlenmiştir.
- İşlenebilirliğin belirlenebilmesi için yapılan Slump ve Ve-Be testleri yapılmış, çelik lif katılması ile çoğu sıfıra düşen çökme değerlerine karşılık Ve-Be süreleri daha değişken değerler almışlardır. Burada Ve-Be testinin ÇLDB işlenebilirliğini ölçmek için Slump testinden daha uygun olduğu söylenebilir.
- Granülometri değişimi de işlenebilirliği gerek ÇLDB gerekse referans betonları için oldukça etkilemiştir. En ince granülometri olan C ve en iri granülometri olan A, iki D_{max} değeri (16 ve 31,5 mm) için de ÇLDB'de en düşük işlenebilirlik performansını sergilemişlerdir.
- D_{max} artışı işlenebilirliği olumsuz etkilemiştir.

- Ayrıca, incelik modülünün sabit tutulduğu B'' , B ve B' granülometrilerine sahip serilerde, ince agrega oranı arttıkça artan yüzey alanı sebebiyle işlenebilirlik her iki D_{max} değeri için de azalmıştır. Bütün ÇLDB serileri içerisinde B'' granülometrisine sahip (kesikli granülometri) karışımlar, her iki D_{max} değeri için işlenebilirlik açısından en iyi performansı sergilemişlerdir.

- Çalışmanın bu ilk kısmında incelenen basınç, yarma ve eğilme dayanımları da granülometri değişimlerinden dikkate değer biçimde etkilenmişlerdir. Basınç dayanımı üzerinde büyük bir etki göstermeyen çelik lifler, yarma ve eğilme dayanımları üzerinde oldukça olumlu bir etki göstermişlerdir.

- D_{max} 'ın artması ile mekanik özelliklerin de dikkate değer biçimde arttığı gözlemlenmiştir.

- Granülometrilere ise iki farklı kombinasyon olarak incelenmiştir. A , AB , B ve C granülometrilerine sahip betonlarda mekanik özellikler, gerek referans gerek ÇLDB'ler için her iki D_{max} değerinde A 'dan C 'ye doğru artış göstermişlerdir.

- İncelik modülünün sabit tutulduğu B'' , B ve B' granülometrilerine sahip betonlarda ise B'' 'den B' 'ye doğru mekanik özellikler, gerek referans gerek ÇLDB'ler için her iki D_{max} değerinde de azalmıştır. Burada agregalar arası boşlukların çimento hamuru tarafından yeterli şekilde doldurulamaması sonucunda oluşan boşlukların da mekanik özellikleri etkilediği düşünülmektedir.

- Bunlara ek olarak incelenen tokluk değerlerinde ise granülometri ve D_{max} değişiminin etkili olduğu görülmüştür. D_{max} artışının tokluk üzerindeki arttırıcı etkisi ile birlikte, daha ince yapıları granülometrilerin de tokluğu olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Gerek tokluk gerek diğer mekanik özellikler açısından da en iyi performansı B'' granülometrisine sahip betonlar göstermişlerdir.

- Çalışmanın bu ilk kısmının sonunda, çimento dozajı ve $s/\ç$ oranı sabit tutularak, granülometri ve D_{max} değişimi ile hem işlenebilirlik hem de mekanik özelliklerin arttırılabilmesinin mümkün olduğu söylenebilir. Ayrıca doğru granülometri seçimi ile birim basınç dayanım maliyeti azaltılarak daha ekonomik ÇLDB'ler üretilebilir.

- Tez çalışmasının ikinci kısmı ise birçok açıdan değerlendirilebilir. Öncelikle beton bileşiminin ÇLDB'nin bütün mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu söylenebilir.

- Öte yandan çelik liflerin etkisi çekme gerilmelerinin etkili olduğu yarma, eğilme dayanımlarında ve tokluklarda ortaya çıkmıştır.
- Çelik lif miktarının veya çelik lif boyunun artırılması ile bu mekanik özellikler dikkate değer biçimde artış göstermişlerdir. Fakat bu durum işlenebilirlik açısından tam tersi olarak yorumlanabilir. Artan lif oranı ve boyu ile işlenebilirlik azalmıştır.
- Çalışmada kullanılan deney numunelerine alternatif olarak ilk önce eğilme dayanımı ve tokluk ölçümlerinde esas araştırmalarda kullanılan büyük kirişlere ek olarak kısa lifler için üretilen küçük boyutlu kiriş numuneleri üretilmiştir. Bu küçük kiriş numunelerinin de dayanım ve toklukları belirlenmiş ve büyük kirişlerin değerleri ile karşılaştırılmıştır. Eğilme dayanımı açısından yaklaşık %12 civarında bir değişiklik gösteren küçük kirişlerin tokluk değerleri büyük kirişlerin tokluk değerlerinin yaklaşık %24'ü civarındadır.
- ÇLDB'lerin tokluk ve eğilme dayanımlarının davranış değişimleri küçük ve büyük kirişlerde neredeyse aynıdır. Üstelik bu iki numunenin özellikleri arasında doğrusal bir bağıntı kurulabilmektedir. Öyleyse lif boyunun imkan verdiği sürece kiriş boyutları küçültülerek üretim süresi, iş gücü ve maliyet açısından fayda sağlanabilir.
- Kiriş farklılığına ek olarak, çalışmada eğilme deneyinde ikiye ayrılan kirişin parçaları üzerinde basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burada da gerek büyük gerek küçük kiriş parçaları ile küp basınç dayanımları arasında doğrusal bağıntılar kurmak mümkün olmuştur.
- Çalışmanın asıl amacını oluşturan ÇLDB tasarımı için geliştirilen grafik tabanlı yaklaşım ise birçok açıdan literatürdeki ihtiyacı karşılamaktadır. Bu uygulama ile hem işlenebilirlik hem de mekanik özellikler bir arada değerlendirilebilmekte ve böylece ÇLDB'nin ön tasarım aşamasında oldukça pratik bir yaklaşım sunmaktadır.
- Mekanik özellikler arasında kurulabilen ilişkiler sayesinde, eğilme dayanımı ve tokluk arasında kurulabilen doğrusal ilişki de bu grafik yaklaşım ile birleştirilerek, ÇLDB'nin tokluk özelliğinin de diğer özellikler ile ilişkilendirilebilmesi sağlanmıştır.
- Sunulan monogramlar hem grafiksel olarak ifade edilmiş hem de formüller ile bu grafikler desteklenmiştir.
- Literatürde ve standartlarda ÇLDB tasarımı için, ÇLDB karışımının özelliklerini iyileştirmek ve işlenebilir beton elde edebilmek üzere tavsiyeler verilmektedir. Bu çalışmada bu tavsiye ve kurallar da dikkate alınarak farklı tip ÇLDB karışımları üretilmiş ve ön tasarım için üç farklı monogram sunulmuştur.

- Burada amaç LDB retiminde belirli tasarım esasları da dikkate alınarak üretilen LDB'lerin n tasarımına bir fikir verebilmektir. Monogramlar, karışimlardan özellikleri tahmin etmek ve belirli özellikler için karışim oranlarını tahmin etmek gibi iki yönlü kullanılabileğinden uygulama açısından oldukça pratik bir yaklaşımdır.

- Değışen LDB türleri için (rneğın yüksek dayanımlı ya da kendiliğinden yerleşen LDB gibi) ise monogramın, belirli noktalarda tekrar test edilerek grafiklerin düşey ötelenmesi veya daha geniş aralıkta çizdirilmesi ile bu farklı tür LDB'ler için de kullanılabilecektir.

- Sonuçta bu monogramların kullanımı ile deneme yanılma karışımı sayısı oldukça azalacak ve istenilen özelliklerdeki LDB'yi bulmak kolaylaşacaktır. Dolayısıyla LDB tasarımı sürecinde sarf edilen enerji, zaman ve masraflardan tasarruf edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **A 820**, 2004. Specification for steel fibers for fiber-reinforced concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 01.04. USA.
- [2] **Abaza, O.A. and Hussein, Z.S.**, 2014. Flexural behavior of flat-end steel-fiber-reinforced concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, **26**, 5.
- [3] **Abbas, S., Soliman, A.M. and Nehdi, M.L.**, 2014. Mechanical performance of reinforced concrete and steel fiber-reinforced concrete precast tunnel lining segments: a case study, *ACI Materials Journal*, **111**, 501-510.
- [4] **Abdul-Ahad, R.B. and Aziz, O.Q.**, 1999. Flexural strength of reinforced concrete T-beams with steel fibers, *Cement & Concrete Composites*, **21**, 263-268.
- [5] **Abrams, D.A.** 1918. Design of concrete mixtures, *Lewis Institute Bulletin*.
- [6] **Abrishambaf, A., Barros, J.A.O. and Cunha, V.M.C.F.**, 2013. Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels, *Cement and Concrete Research*, **51**, 57–66.
- [7] **Achilleos, C., Hadjimitsis, D., Neocleous, K., Pilakoutas, K., Neophytou, P.O. and Kallis, S.**, 2011. Proportioning of steel fibre reinforced concrete mixes for pavement construction and their impact on environment and cost, *Sustainability*, **3**, 965-983.
- [8] **ACI 544.1R-96**, 2002. State-of-the-art report on fiber reinforced, *American Concrete Institute*, USA.
- [9] **ACI 544.3R-93**, 1998. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete, *American Concrete Institute*, USA.
- [10] **ACI 544.4R-88**, 1999. Design considerations for steel fiber reinforced concrete, *American Concrete Institute*, USA.
- [11] **ACI 544.5R-10**, 2010. Report on the physical properties and durability of fiber-reinforced concrete, *American Concrete Institute*, USA.
- [12] **Açıkgenç, M., Alyamaç, K.E. ve Ulucan, Z.Ç.**, 2012. Çelik lifli betonların karışım dizaynı için çoklu grafik önerisi, *İnşaat Mühendisliği'nde 100. Yıl Teknik Kongresi*, YTÜ, İstanbul, 22-24 Kasım.
- [13] **Açıkgenç, M., Alyamaç, K.E. and Ulucan, Z.Ç.**, 2013. Fresh and hardened properties of steel fiber reinforced concrete produced with fibers of different lengths and diameters, *2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering*, BCCCE, Epoka University, Tirana (Albania), 23-25 May.

- [14] **Açıkgenç, M., Ulaş, M. and Alyamaç, K.E.**, 2015. Using an artificial neural network to predict mix compositions of steel fiber-reinforced concrete, *Arabian Journal for Science and Engineering*, **40**, 407–419.
- [15] **Almansa, E.M. and Canovas, M.F.**, 1997. Mix design of steel fiber reinforced concrete, *Materiales De Construcción*, **47**, 11-26.
- [16] **Altoubat, S.A., Roesler, J.R., Lange, D.A. and Rieder, K.A.**, 2008. Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers, *Construction and Building Materials*, **22**, 384–393.
- [17] **Alexander, M. and Mindess, S.**, 2005. *Aggregates in Concrete*. Taylor & Francis Group, London.
- [18] **Aliabdo, A.A.E., Abd_Elmoaty, A.E.M. and Hamdy, M.**, 2013. Effect of internal short fibers, steel reinforcement, and surface layer on impact and penetration resistance of concrete, *Alexandria Engineering Journal*, **52**, 407–417.
- [19] **Altun, F., Haktanır, T. and Arı, K.**, 2007. Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams, *Construction and Building Materials*, **21**, 654–661.
- [20] **Alwan, J.M., Naaman, A.E. and Guerrero, P.**, 1999. Effect of mechanical damping on the pullout response of hooked steel fibres embedded in cementitious matrices, *Concrete Science and Engineering*, **1**, 15-25.
- [21] **Alyamaç, K.E.**, 2008. Kendiliğinden yerleşen betonun lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesi, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [22] **Alyamaç, K.E. and İnce, R.**, 2009. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders, *Construction and Building Materials*, **23**, 1201–1210.
- [23] **Anderson, T.L.**, 1991. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. CRC Press.
- [24] **Arıoğlu, N., Girgin, Z.C. and Arıoğlu, E.**, 2006. Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion, *ACI Materials Journal*, **103**, 18-24.
- [25] **Aslani, F. and Nejadi, S.**, 2013. Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress–strain curve, and energy dissipated under compression, *Composites: Part B*, **53**, 121–133.
- [26] **Atiş, C.D. and Karahan, O.**, 2009. Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete, *Construction and Building Materials*, **23**, 392–399.

- [27] **Balaguru, P. and Ramakrishnan, V.**, 1986. Freeze-thaw durability of fiber reinforced concrete, *ACI JOURNAL, Proceedings*, **83**, 374-382.
- [28] **Balaguru, P. and Ramakrishnan, V.**, 1988. Properties of fiber reinforced concrete: workability behavior under long term loading and air-void characteristics, *ACI Materials Journal*, **85**, 189-196.
- [29] **Balaguru, P.N. and Shah, S.P.**, 1992. Fiber-Reinforced Cement Composites. Mc Graw-Hill International Editions, New York.
- [30] **Ball, C.G., Grimm, A.C. and Melville, T.**, 1972. Portland cement compositions reinforced with non-round filaments, *United States Patent Office*, No: 3650785 dated 21.3.1972.
- [31] **Banthia, N. and Sappakittipakorn, M.**, 2007. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cement and Concrete Research*, **37**, 1366–1372.
- [32] **Bartos, P.J.M. and Duris, M.**, 1994. Inclined tensile-strength of steel fibers in a cement-based composite, *Composites*, **25**, 945-952.
- [33] **Bayramov, F., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A.**, 2004. Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method, *Cement & Concrete Composites*, **26**, 665–675.
- [34] **Beddar, M., Belgaraâ, L. and Ayadat, T.**, 2004. Optimising of steel fiber reinforced concrete mix design, *Journal of Civil Engineering Research and Practice*, **1**, 67-75.
- [35] **Bentur, A., Diamond, S. and Mindess, S.**, 1985(a). Cracking processes in steel fiber reinforced cement paste, *Cement and Concrete Research*, **15**, 331–42.
- [36] **Bentur, A., Mindess, S. and Diamond, S.**, 1985(b). Pull out processes in steel fibre reinforced cement, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, **7**, 29–38.
- [37] **Bentur, A. and Mindess, S.**, 2005. Fibre Reinforced Cementitious Composites. Elsevier Science Publishing, New York.
- [38] **Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M. and Amziane, S.**, 2012. Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, **27**, 6–14.
- [39] **Brandt, A.M.**, 2008. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Composite Structures*, **86**, 3–9.
- [40] **ASTM C 1018**, 1997. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (Using beam with third-point loading)

(Withdrawn 2006), *ASTM International*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

- [41] **Caggiano, A., Cremona, M., Faella, C., Lima, C. and Martinelli, E.**, 2012. Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers, *Construction and Building Materials*, **37**, 832–840.
- [42] **Camps, G., Turatsinze, A., Sellier, A., Escadeillas, G. and Bourbon, X.**, 2008. Steel-fibre-reinforcement and hydration coupled effects on concrete tensile behaviour, *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 5207–5216.
- [43] **Cachim, P.B., Figueiras, J.A. and Pereira, P.A.A.**, 2002. Fatigue behaviour of fiber-reinforced concrete in compression, *Cement and Concrete Composites*, **24**, 211-217.
- [44] **Chalioris, C.E.**, 2013. Analytical approach for the evaluation of minimum fibre factor required for steel fibrous concrete beams under combined shear and flexure, *Construction and Building Materials*, **43**, 317–336.
- [45] **Chalioris, C.E. and Sfiri, E.F.**, 2011. Shear performance of steel fibrous concrete beams, *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering*, **14**, 2064–2068.
- [46] **Chenkui, H. and Guofan, Z.**, 1995. Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate, *Cement and Concrete Composites*, **17**, 199-206.
- [47] **Cheyrezy, M., Maret, V. and Frouin, L.**, 1995. Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete), *Cement and Concrete Research*, **25**, 1491-1500.
- [48] **Choi, K.K., Taha, M.M.R., Park, H.G. and Maji, A.K.**, 2007. Punching shear strength of interior concrete slab–column connections reinforced with steel fibers, *Cement and Concrete Composites*, **29**, 409–420.
- [49] **Choi, O.C. and Lee, C.**, 2003. Flexural performance of ring-type steel fiber-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, **33**, 841–849.
- [50] **Choi, Y. and Yuan, R.L.**, 2005. Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC, *Cement and Concrete Research*, **35**, 1587– 1591.
- [51] **Cook, J. and Gordon, J.E.**, 1964. A mechanism for the control of crack propagation in all brittle systems, *Proceedings of the Royal Society*, **282A**, 508–520.
- [52] **Çelik, T. and Marar, K.**, 1996. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, **26**, 1121-1130.

- [53] **Dawood, E.T. and Ramli, M.**, 2011. Contribution of hybrid fibers on the hybrid fibers on the properties of high strength concrete having high workability, *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering*, **14**, 814–820.
- [54] **de Figueiredo, A.D., Nunes, N.L. and Tanesi, J.**, 2000. Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete, *5th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, RILEM, Lyon, France, 13-15 September, s. 103-118.
- [55] **Ding, Y. and Kusterle, W.**, 2000. Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age, *Cement and Concrete Research*, **30**, 1573-1579.
- [56] **Ding, Y., You, Z. and Jalali, S.**, 2011. The composite effect of steel fibres and stirrups on the shear behaviour of beams using self-consolidating concrete, *Engineering Structures*, **33**, 107–117.
- [57] **Ding, Y., Zhang, F., Torgal, F. and Zhang, Y.**, 2012. Shear behaviour of steel fibre reinforced self-consolidating concrete beams based on the modified compression field theory, *Composite Structures*, **94**, 2440–2449.
- [58] **Dixon, J. and Mayfield, B.**, 1971. Concrete reinforced with fibrous wire, *Journal of the Concrete Society*, **5**, 73-76.
- [59] **Dvorkin, L., Dvorkin, O., Zhitkovsky, V. and Ribakov, Y.**, 2011. A method for optimal design of steel fiber reinforced concrete composition, *Materials and Design*, **32**, 3254–3262.
- [60] **Edgington, J., Hannant, D.J. and Williams, R.I.T.**, 1974. Steel Fibre Reinforced Concrete, in *Fibre reinforced materials*, pp. 112-128, The Construction Press, Lancaster, England.
- [61] **Eren, Ö. and Marar, K.**, 2009. Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete, *Construction and Building Materials*, **23**, 981–988.
- [62] **Erdoğan, S.T. ve Erdoğan, T.Y.**, 2007. Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi. ODTÜ yayıncılık, Ankara.
- [63] **Ferrara, L., Park, Y.D. and Shah, S.P.**, 2007. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, **37**, 957–971.
- [64] **Ferrara, L., Park, Y. and Shah, S.**, 2008. Correlation among fresh state behavior, fiber dispersion, and toughness properties of SFRCs. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, **20**, 493–501.
- [65] **Furlan Jr, S. and Bento de Hanai, J.**, 1997. Shear behaviour of fiber reinforced beams. *Cement and Concrete Composites*, **19**, 359-366.

- [66] **Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Alzeebaree, R. and Mermerdaş, K.,** 2013. Effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of the concretes produced with cold bonded fly ash aggregates, *Construction and Building Materials*, **40**, 982–990.
- [67] **Gopalaratnam, V.S. and Gettu, R.,** 1995. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes, *Cement and Concrete Composites*, **17**, 239-254.
- [68] **Grünwald, S.,** 2004. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete, *PhD Thesis*, Delft University of Technology, Netherlands.
- [69] **Güneyisi, E., Gesoğlu, M. and İpek, S.,** 2013. Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes, *Construction and Building Materials*, **47**, 358–365.
- [70] **Hannant, D.J.,** 1978. Fibre Cements and Fibre Concretes. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, United Kingdom.
- [71] **Hao, Y. and Hao, H.,** 2013. Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests, *Construction and Building Materials*, **48**, 521–532.
- [72] **Helene, P.R.L.,** 1987. Contribuição ao estudo do controle e dosagem dos concretos de cimento Portland, *PhD Thesis*, Sao Paulo University, Brazil (in Portuguese).
- [73] **Hoff, G.,** 1987. Durability of Fiber Reinforced Concrete in a Severe Marine Environment, in *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP-105, pp. 997- 1041, American Concrete Institute, Detroit, USA.
- [74] **Horszczaruk, E.K.,** 2009. Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete, *Wear*, **267**, 110–115.
- [75] **Hu, J., Wang, K. and Gaunt, J.A.,** 2013. Behavior and mix design development of concrete made with recycled, *Construction and Building Materials*, **40**, 1184–1192.
- [76] **Hughes, B.P.,** 1981. Experimental test results for flexure and direct tension of fibre cement composites, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, **3**, 13–18.
- [77] **Hughes, B.P. and Fattuhi, N.I.,** 1976. The workability of steel-fibre-reinforced concrete, *Magazine of Concrete Research*, **28**, 157-161.
- [78] **Huo, H.Y., Song, L.S., Sun, L. and Cao, C.J.,** 2013. Basic properties of SFRC designed by the binary superposition mix proportion method, *Applied Mechanics and Materials*, **438-439**, 290-294.

- [79] **Huo, H.Y., Zhao, S.B., Song, L.S. and Song, C.X.**, 2011. Binary Superposition Mix Design Method for SFRC Part II: Flexural Strength and Toughness, *Advanced Materials Research*, **168-170**, 2191-2194.
- [80] **Igarashi, S., Bentur, A. and Mindess, S.**, 1996. The effect of processing on the bond and interfaces in steel fiber reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*, **18**, 313-322.
- [81] **İnce R.**, 1998. Betonarme yapı elemanlarında basınç-kesme kırılmasının ve boyut etkisinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [82] **İnce, R. and Alyamaç, K.E.**, 2008. Determination of fracture parameters of concrete based on water–cement ratio, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, **15**, 14–22.
- [83] **Johnston, C.D.**, 1974. Steel Fibre Reinforced Mortar and Concrete—A Review of Mechanical Properties, in *Fiber Reinforced Concrete, SP-44*, American Concrete Institute, Detroit, USA.
- [84] **Johnston, C.D.**, 1996. Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes, in *Production Methods and Workability of Concrete*, pp. 155-179, Mays and Cleland, E&FN Spon, London, UK.
- [85] **Johnston, C.D.**, 2001. Fiber-Reinforced Cements and Concretes. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- [86] **Johnston, C.D. and Gray, R.J.**, 1978. Uniaxial Tension Testing of Steel Fibre Reinforced Cementitious Composites, *International Symposium on Testing and Test Methods of Fibre-Cement Composites*, RILEM, Sheffield, South Yorkshire, England, April, s. 451-461.
- [87] **Kamal, M.M., Safan, M.A., Etman, Z.A. and Salama, R.A.**, 2014. Behavior and strength of beams cast with ultra high strength concrete containing different types of fibers, *HBRC Journal*, **10**, 55–63.
- [88] **Kang, S.H., Kim, J.J., Kim, D.J. and Chung, Y.S.**, 2013. Effect of sand grain size and sand-to-cement ratio on the interfacial bond strength of steel fibers embedded in mortars, *Construction and Building Materials*, **47**, 1421–1430.
- [89] **Kang, S.T., Cho, H.W., Lee, J.H. and Kim, D.J.**, 2012. Improvement in tensile performance of steel fiber reinforced high strength concrete: influence of fiber shape and sand to aggregate ratio, *6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, Politecnico Milano, Italy, 08-12 July, s. 3258-3263.
- [90] **Kang, S.T., Lee, B.Y., Kim, J.K. and Kim, Y.Y.**, 2011. The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced

ultra high strength concrete, *Construction and Building Materials*, **25**, 2450–2457.

- [91] **Kang, S.T., Lee, Y., Park, Y.D. and Kim, J.K.**, 2010. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber, *Composite Structures*, **92**, 61–71.
- [92] **Kar, N.J. and Pal, A.K.**, 1972. Strength of Fiber Reinforced Concrete, *Journal of the Structural Division, Proceedings, ASCE*, **98**, 1053-1068.
- [93] **Karihaloo, B.L. and Ghanbari, A.**, 2012. Mix proportioning of self-compacting high- and ultra-high-performance concretes with and without steel fibres, *Magazine of Concrete Research*, **64**, 1089-1100.
- [94] **Katzer, J.**, 2006. Steel fibers and steel fiber reinforced concrete in civil engineering, *The Pacific Journal of Science and Technology*, **7**, 53-58.
- [95] **Kayali, O., Haque, M.N. and Zhu, B.**, 1999. Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash, *Cement and Concrete Research*, **29**, 1835-1840.
- [96] **Khaloo, A.R. ve Afshari, M.**, 2005. Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs, *Cement and Concrete Composites*, **27**, 141–149.
- [97] **Kim, D.J., Naaman, A.E. and El-Tawil, S.**, 2008. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, **30**, 917–928.
- [98] **Kim, J.J., Kim, D.J., Kang, S.T. and Lee, J.H.**, 2012. Influence of sand to coarse aggregate ratio on the interfacial bond strength of steel fibers in concrete for nuclear power plant, *Nuclear Engineering and Design*, **252**, 1– 10.
- [99] **Kim, J.J., Park, G.J., Kim, D.J., Moon, J.H. and Lee, J.H.**, 2014. High-rate tensile behavior of steel fiber-reinforced concrete for nuclear power plants, *Nuclear Engineering and Design*, **266**, 43– 54.
- [100] **Kim, T., Tae, S. and Roh, S.**, 2013. Assessment of the CO₂ emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **25**, 729–741.
- [101] **Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ. and Şahin, Y.**, 2008. Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes, *Construction and Building Materials*, **22**, 1874–1880.
- [102] **Köksal, F., İlki, A. and Taşdemir, M.A.**, 2013. Optimum mix design of steel-fibre-reinforced concrete plates, *Arabian Journal for Science and Engineering*, **38**, 2971-2983.

- [103] **Köksal, F., Şahin, Y., Gencil, O. and Yiğit, İ.**, 2013. Fracture energy-based optimisation of steel fibre reinforced concretes, *Engineering Fracture Mechanics*, **107**, 29–37.
- [104] **Kurihara, N., Kunieda, M., Kamada, T., Uchida, Y. and Rokugo, K.**, 2000. Tension softening diagrams and evaluation of properties of steel fiber reinforced concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, **65**, 235-245.
- [105] **Lankard, D.R.**, 1984. Properties, applications: slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON), *Concrete International: Design & Construction*, **61**, 44-47.
- [106] **Lau, A. and Anson, M.**, 2006. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, **36**, 1698–1707.
- [107] **Lawler, J.S., Wilhelm, T., Zampini, D. and Shah, S.P.**, 2003. Fracture processes of hybrid fiber reinforced mortar, *Materials and Structures*, **36**, 197-208.
- [108] **Lee, S.C., Cho, J.Y. and Vecchio, F.J.**, 2011. Diverse embedment model for steel fiber-reinforced concrete in tension: model development, *ACI Materials Journal*, **108**, 516-525.
- [109] **Li, V.C. and Maalej, M.**, 1996(a). Toughening in cement based composites. Part I: cement, mortar, and concrete, *Cement and Concrete Composites*, **18**, 223-237.
- [110] **Li, V.C. and Maalej, M.**, 1996(b). Toughening in cement based composites. Part II: fiber reinforced cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, **18**, 239-249.
- [111] **Li, V.C. and Matsumoto, T.**, 1998. Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation, *Cement and Concrete Composites*, **20**, 339-351.
- [112] **Lim, D.H. and Oh, B.H.**, 1999. Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, **21**, 937–944.
- [113] **Lim, T.Y., Paramasivam, P. and Lee, S.L.**, 1987. Analytical model for tensile behavior of steel-fiber concrete, *Journal of American Concrete Institute*, **84**, 286-298.
- [114] **Lin, Y., Karadelis, J.N. and Xu, Y.**, 2013. A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays, *Construction and Building Materials*, **48**, 333–341.
- [115] **Longini, R.L., Romualdi, J.P. ve Stelson, T.E.** 1970. Concrete construction and roadways, United States Patent Office, No: 3500728 dated 17.3.1970.

- [116] **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.
- [117] **Lu, X. and Hsu, C.T.T.**, 2006. Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression, *Cement and Concrete Research*, **36**, 1679–1685.
- [118] **Lyse, I.**, 1932. Test on consistence and strength of concrete having constant water content, *ASTM Proc*, **32**, 629–36.
- [119] **Maidl, B.R.**, 1995. Steel Fibre Reinforced Concrete. Ernst & Sohn.
- [120] **Mangat, P.S. and Azari, M.M.**, 1998. Shrinkage of steel fibre reinforced cement composites, *Matériaux et Construction (RILEM)*, **21**, 63-71.
- [121] **Massicotte, B., Degrange, G. and Dzeletovic, N.**, 2000. Mix design for SFRC bridge deck construction, *5th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, RILEM, Lyon, France, 13-15 September, s. 119-128.
- [122] **Meda, A., Minelli, F. and Plizzari, G.A.**, 2012. Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete, *Composites: Part B*, **43**, 2930–2937.
- [123] **Meddah, M.S., Zitouni, S. and Belâabes, S.**, 2010. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete, *Construction and Building Materials*, **24**, 505–512.
- [124] **Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M.**, 2006. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. McGraw-Hill, New York.
- [125] **Miao, C., Mu, R., Tian, Q. and Sun, W.**, 2002. Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fiber reinforcement, *Cement and Concrete Research*, **32**, 31–34.
- [126] **Mindess, S.S. and Young, J.F.**, 1981. Concrete. Prentice-Hall International, UK.
- [127] **Mohammadi, Y., Singh, S.P. and Kaushik S.K.**, 2008. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, *Construction and Building Materials*, **22**, 956–965.
- [128] **Monteiro, P.J.M., Helene, P.R.L. and Kang, S.H.**, 1993. Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy, *Materials and Structures*, **26**, 443–52.
- [129] **Morris, A.D. and Garret, G.G.**, 1981. A comparative study of the static and fatigue behaviour of plain and steel fibre reinforced mortar in compression and direct tension, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, **3**, 73-91.

- [130] **Morse, D.C. and Williamson, G.R.**, 1977. Corrosion behavior of steel fibrous concrete, *Construction Engineering Research Laboratory, Report No. CERL-TR-M-217*, Champaign, USA.
- [131] **Naaman, A.E.**, 1985. Fiber reinforcement for concrete, *Concrete International: Design and Construction*, **7**, 21-25.
- [132] **Naaman, A.E.**, 1992. SIFCON: Tailored Properties for Structural Performance, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. E & FN Spon, London.
- [133] **Naaman, A.E.**, 2003. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1**, 241-252.
- [134] **Naaman, A.E. and Hammoud, H.**, 1998. Fatigue characteristics of high performance fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, **20**, 353-363.
- [135] **Nanni, A.**, 1988. Abrasion resistance of roller compacted concrete, *ACI Materials Journal*, **86**, 559-565.
- [136] **Narasimhan, H. and Chew, M.Y.L.**, 2009. Integration of durability with structural design: An optimal life cycle cost based design procedure for reinforced concrete structures, *Construction and Building Materials*, **23**, 918–929.
- [137] **Nataraja, M.C., Dhang, N. and Gupta, A.P.**, 1999. Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, *Cement and Concrete Composites*, **21**, 383-390.
- [138] **Nataraja, M.C., Dhang, N. and Gupta, A.P.**, 2000. Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach, *Cement and Concrete Research*, **30**, 593-597.
- [139] **Nataraja, M.C., Dhang, N. and Gupta, A.P.**, 2001. Splitting tensile strength of SFRC, *Indian Concrete Journal*, **75**, 287–90.
- [140] **Nataraja, M.C., Nagaraj, T.S. and Basavaraja, S.B.**, 2005. Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance, *Cement and Concrete Research*, **35**, 2350 – 2359.
- [141] **Neville, A.M.**, 1991. Properties of Concrete. Pitman, London.
- [142] **Nguyen-Minh, L., Rovnák, M., Tran-Ngoc, T. and Le-Phuoc, T.**, 2012. Punching shear resistance of post-tensioned steel fiber reinforced concrete flat plates, *Engineering Structures*, **45**, 324–337.
- [143] **Nia, A.A., Hedayatian, M., Nili, M. and Sabet, V.A.**, 2012. An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact

resistance in fiber-reinforced concrete, *International Journal of Impact Engineering*, **46**, 62-73.

- [144] **Nili, M. and Afroughsabet, V.**, 2010. Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *International Journal of Impact Engineering*, **37**, 879-886.
- [145] **Niu, D., Jiang, L., Bai, M. and Miao, Y.**, 2013. Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition, *Materials and Design*, **44**, 267–273.
- [146] **Okay, F. and Engin, S.**, 2012. Torsional behavior of steel fiber reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, **28**, 269–275.
- [147] **Olivito, R.S. and Zuccarello, F.A.**, 2010. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete, *Composites: Part B*, **41**, 246–255.
- [148] **Özyurt, N., Mason, T.O. and Shah, S.P.**, 2007. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs, *Cement and Concrete Composites*, **29**, 70–79.
- [149] **Pajak, M. and Ponikiewski, T.**, 2013. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers, *Construction and Building Materials*, **47**, 397–408.
- [150] **Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S. and Koh, K.T.**, 2012. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, **34**, 172–184.
- [151] **Parvez, A. and Foster, S.**, 2014. Fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete beams, *Journal of Structural Engineering*, Just Released, 8.
- [152] **Pereira de Oliveira, L.A., Castro Gomes, J.P., Bernardo, L.F.A. and Ramos, M.M.M.**, 2013. Evaluation of dry mortar ratio as mix design parameter for steel fibre reinforced self compacting concrete, *Construction and Building Materials*, **40**, 642–649.
- [153] **Perumal, R.**, 2015. Correlation of compressive strength and other engineering properties of high-performance steel fiber–reinforced concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, **27**, 8.
- [154] **Pigeon, M. and Cantin, R.**, 1998. Flexural properties of steel fiber-reinforced concretes at low temperatures, *Cement and Concrete Composites*, **20**, 365-375.
- [155] **Radhika, K.L., Kumar, P.R., Rao, S.V., Rao, M.V.K. and Manikanta, K.**, 2012. Mix design methodology for fibrous self compacting concrete based on compressible packing model (CPM), *Cement Wapno Beton*, **17**, 310-+.

- [156] **Ramadoss, P. and Nagamani, K.**, 2006. Investigation on the tensile strength of high performance fiber reinforced concrete using statistical methods, *Computers and Concrete*, **3**, 389-400.
- [157] **Raju, N.K., Basavarajaiah, B.S. and Rao, K.J.**, 1977. Compressive strength and bearing strength of steel fiber reinforced concrete, *Indian Concrete Journal*, **51**, 183-188.
- [158] **Robins, P.J. and Calderwood, R.W.**, 1978. Explosive testing of fibre-reinforced concrete, *Concrete (London)*, **12**, 26-28.
- [159] **Rodrigues, J.P.C., Laím, L. and Correia, A.M.**, 2010. Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire, *Composite Structures*, **92**, 1263-1268.
- [160] **Romualdi, J.P.**, 1969. Two-phase concrete and steel material, *United States Patent Office*, No: 3429094 dated 25.2.1969.
- [161] **Romualdi, J.P. and Batson, G.B.**, 1963. Mechanics of crack arrest in concrete, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, **89**, 147-168.
- [162] **Romualdi, J.P. and Mandel, J.A.**, 1964. Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed closely spaced short lengths of wire reinforcement, *ACI Journal, Proceedings*, **61**, 657-671.
- [163] **RILEM Technical Committee**, 1977. 31st Meeting of RILEM Permanent Committee Budapest Report, Materials and Structures (RILEM), 5-9 September, 11(61), pp. 65-68, RILEM Publications SARL.
- [164] **Schrader, E.K. and Munch, A.V.**, 1976. Fibrous concrete repair of cavitation damage, *ASCE, Proceedings*, **102**, 385-399.
- [165] **Schupack, M.**, 1986. Durability of SFRC Exposed to Severe Environments, Steel Fiber Concrete. Elsevier Applied Science Publishers, Ltd., pp. 479-496.
- [166] **Shah, S.P.**, 1991. Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes?, *ACI Material Journal*, **88**, 595-602.
- [167] **Shah, S.P. and Naaman A.E.**, 1976. Mechanical properties of glass and steel fibre reinforced mortar, *ACI Journal*, **73**, 50-53.
- [168] **Shah, S.P. and Rangan, B.V.**, 1970. Ductility of concrete reinforced with stirrups, fibers and compression reinforcement, *Journal, Structural Division, ASCE*, **96**, 1167-1184.
- [169] **Shah, S.P. and Rangan, B.V.**, 1971. Fiber Reinforced Concrete Properties, *ACI Journal, Proceedings*, **68**, 126-135.
- [170] **Shah, S.P. and Skarendahl, A.**, 1985. Steel Fiber Concrete. Elsevier Applied Science Publishers, London, UK.

- [171] **Shah, S.P., Stroeven, P., Dalhuisen, D. and Van Stekelenburg, P.**, 1978. Complete stress-strain curves for steel fibre reinforced concrete in uniaxial tension and compression, in *Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites*, *RILEM Symposium*, pp. 399-408, Construction Press, Lancaster.
- [172] **Shakhmenko, G., Krasnikovs, A. and Khabaz, A.**, 2009. Concrete matrix properties influence on fibre reinforced concrete mechanical behaviour, *5th International Conference Fibre Concrete Technology, Design, Application*, Prague, Czech Republic, September 17-18, s. 231-236
- [173] **Sideris, K.K., Manita, P. and Chaniotakis, E.**, 2009. Performance of thermally damaged fibre reinforced concretes, *Construction and Building Materials*, **23**, 1232–1239.
- [174] **Sirijaroonchai, K., El-Tawil, S. and Parra-Montesinos G.**, 2010. Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading, *Cement and Concrete Composites*, **32**, 62–72.
- [175] **Song, P.S., Hwang, S. and Sheu, B.C.**, 2004. Statistical evaluation for impact resistance of steel-fibre-reinforced concretes, *Magazine of Concrete Research*, **56**, 437–442.
- [176] **Soulioti, D.V., Barkoula, N.M., Paipetis, A. and Matikas, T.E.**, 2011. Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel-fibre reinforced concrete, *Strain*, **47**, e535–e541.
- [177] **Soutsos, M.N., Le, T.T. and Lampropoulos, A.P.**, 2012. Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres, *Construction and Building Materials*, **36**, 704–710.
- [178] **Söylev, T.A.**, 2011. The effect of fibers on the variation of bond between steel reinforcement and concrete with casting position, *Construction and Building Materials*, **25**, 1736–1746.
- [179] **Stroeven, P. and Shah, S.P.**, 1978. Use of radiography-image analysis for steel fibre reinforced concrete, in *Testing and Test Methods for Fibre Cement Composites*, pp. 275–288, ed. R.N.Swamy. Proc. RILEM Conf., The Construction Press, UK.
- [180] **Suaris, W. and Shah, S.P.**, 1984. Test method for impact resistance of fiber reinforced concrete, *Fiber Reinforced Concrete: International Symposium, SP-81*, American Concrete Institute, Detroit, s. 247-260.
- [181] **Swamy, R.N.**, 1975. Fibre reinforcement of cement and concrete, *Materials and Structures*, **8**, 235-254.

- [182] **Swamy, R.N. and Mangat, P.S.**, 1974. Influence of fibre-aggregate interaction on some properties of steel fibre reinforced concrete, *Materials and Structures*, **7**, 307-314.
- [183] **Şahin, Y. and Köksal, F.**, 2011. The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, **25**, 1801-1806.
- [184] **Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., Şamhal, E. ve Yerlikaya, M.**, 2006. Endüstriyel Zemin Betonları. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul.
- [185] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., İlki, A. ve Yerlikaya, M.**, 2002. Prefabrik elemanlar için çelik tel donatılı betonlar, *Beton Prefabrikasyon*, **63**, 5-12.
- [186] **Taşdemir, M.A., Lydon, F.D. and Barr, B.I.G.**, 1996. The tensile strain capacity of concrete, *Magazine of Concrete Research*, **48**, 211-218.
- [187] **Topçu, İ.B. and Canbaz M.**, 2007. Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, **21**, 1486–1491.
- [188] **Torrijos, M.C., Barragan, B.E. and Zerbino, R.L.**, 2008. Physical–mechanical properties, and mesostructure of plain and fibre reinforced self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, **22**, 1780–1788.
- [189] **Toutanji, H. and Bayasi, Z.**, 1998. Effect of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, **28**, 115-124.
- [190] **Traina, L.A. and Mansour, S.A.**, 1991. Biaxial strength and deformational behaviour of plain and steel fibre concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, 354-362.
- [191] **Tran, T.K. and Kim, D.J.**, 2013. Investigating direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites at high strain rates, *Cement and Concrete Research*, **50**, 62–73.
- [192] **TS 706 EN 12620+A1**, 2009. Beton agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [193] **TS 802**, 2009. Beton karışım tasarımı hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [194] **TS 3284**, 1979. Betonun eğilmede çekme dayanımı tayini deneyi (üçtebir noktalarından yüklenmiş basit kiriş metodu ile), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [195] **TS 3287**, 1979. Betonun eğilmede çekme deneyinden çıkan deney numunesi parçaları üzerinde basınç dayanımı deney metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- [196] **TS 10513**, 1992, Çelik teller - Beton takviyesinde kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [197] **TS 10514**, 1992, Beton-çelik lif takviyeli; çelik teller: betona karıştırma ve kontrol kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [198] **TS 10515**, 1992. Beton-çelik tel takviyeli-eğilme mukavemeti deney metodu. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [199] **TS EN 1008**, 2003. Beton-karma suyu-numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [200] **TS EN 12350-2**, 2010. Beton - taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [201] **TS EN 12350-3**, 2010. Beton - taze beton deneyleri - Bölüm 3: Vebe deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [202] **TS EN 12504-4**, 2004, Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrases geçiş hızının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [203] **TS EN 12390-3**, 2010. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [204] **TS EN 12390-5**, 2010. Beton - sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [205] **TS EN 12390-6**, 2010. Beton - sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [206] **TS EN 197-1**, 2012. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [207] **Turanlı, L., Shomglin, K., Ostertag, C.P. and Monteiro, P.J.M.**, 2001. Reduction in alkali-silica expansion due to steel microfibers, *Cement and Concrete Research*, **31**, 825-827.
- [208] URL-1, <http://www.masterbuilder.co.in/steel-fibre-reinforced-concrete-sfrc-areas-of-application-3/> Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC):Areas of Application. 18 Kasım 2013.
- [209] **Uygunoğlu, T.**, 2011. Effect of fiber type and content on bleeding of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, **25**, 766-772.

- [210] **Vandewalle, L.**, 1993. Vezelversterkt Beton, *Workshop/Studiedag 'Speciale Betonsoorten en Toepassingen*, Katholieke Universiteit Leuven (Leuven Üniversitesi), Departement Burgerlijke Bouwkunde (İnşaat Mühendisliği Bölümü), pp. 77-98. (Felemenkçe)
- [211] **Vijayalakshmi, M., Sekar, A.S.S. and Ganesh Prabhu, G.**, 2013. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste, *Construction and Building Materials*, **46**, 1-7.
- [212] **Wang, H.T. and Wang, L.C.**, 2013. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, **38**, 1146–1151.
- [213] **Williamson, G.R.**, 1965. The Use of Fibrous Reinforced Concrete in Structures Exposed to Explosives Hazards, *U.S. Army Ohio River Division Laboratories, Miscellaneous Paper No. 5-5*, USA.
- [214] **Williamson, G.R.**, 1974. The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete, in *Fiber Reinforced Concrete, SP- 44*, pp. 195-207, American Concrete Institute, Detroit, USA.
- [215] **Xu, Z., Hao, H. and Li, H.N.**, 2012. Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres, *Materials and Design*, **42**, 72–88.
- [216] **Xu, B.W. and Shi, H.S.**, 2009. Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, **23**, 3468-3474.
- [217] **Yalçın, M.**, 2009. Çelik lif donatılı betonların performansına dayalı tasarımı ve optimizasyonu, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [218] **Yalçın, M., Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Gökalg, I. and Yerlikaya, M.**, 2011. Optimum design of conventional sfrcs and their performance classes, *6th International Conference Fibre Concrete on Technology, Design, Application (FC 2011)*, Czech Techn Univ, Prague, Czech Republic, September 08-09, s. 463-474.
- [219] **Yan, Z., Zhu, H. and Ju, J.W.**, 2013. Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures, *Construction and Building Materials*, **38**, 610–618.
- [220] **Yang, S.L., Millard, S.G., Soutsos, M.N., Barnett, S.J. and Le, T.T.**, 2009. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), *Construction and Building Materials*, **23**, 2291–2298.

- [221] **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.
- [222] **Yin, W.S. and Hsu, T.C.**, 1990. Uni-and-bi axial compressive fatigue of fibre concrete, *Materials Engineering Congress*, ASCE, Denver, August 13- 15, s. 1173-1181.
- [223] **Zhang, J. and Li, V.C.**, 2004. Simulation of crack propagation in fiber-reinforced concrete by fracture mechanics, *Cement and Concrete Research*, **34**, 333-339.
- [224] **Zhang, J., Stang, H. and Li, V.C.**, 2001. Crack bridging model for fibre reinforced concrete under fatigue tension, *International Journal of Fatigue*, **23**, 655–670.
- [225] **Zhao, S.B., Huo, H.Y., Song, C.X. and Song, L.S.**, 2011. Binary Superposition Mix Design Method for SFRC Part I: Principle and Evaluation, *Advanced Materials Research*, **168-170**, 2186-2190.
- [226] **Zollo, R.F.**, 1997. Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development, *Cement and Concrete Composites*, **19**, 107-122.

ÖZGEÇMİŞ

Merve AÇIKGENÇ, 1985 yılında Ankara’da doğdu. İlk ve orta öğretimini Ankara Kamil Ocak İlköğretim Okulu ve Elazığ Mezre Orta Okulu’nda tamamlayıp, 2002 yılında Elazığ Balakgazi Lisesi’nden mezun oldu. 2003-2007 yılları arasında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimi aldı. Daha sonra 2007-2009 yılları arasında aynı bölümde Yapı Malzemesi alanında yüksek lisans eğitimi tamamladı. 2009 yılının Kasım ayında Fırat Üniversitesi’nde Araştırma Görevlisi olarak atandı ve 2010 yılının Şubat ayında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim dalında doktora eğitimine başladı. Doktora eğitimi süresince Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Biriminin desteklemiş olduğu iki projede görev alarak bu projeleri başarı ile tamamladı. Yazar, halen Fırat Üniversitesi’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta ve bilimsel araştırmalarına devam etmektedir.