

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN PERFORMANSA DAYALI
TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

**DOKTORA TEZİ
Muhsin YALÇIN**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

MART 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN PERFORMANSA DAYALI
TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

**DOKTORA TEZİ
Muhsin YALÇIN
(501992412)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Şubat 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Mart 2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Saim AKYÜZ (İTÜ)
Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL (İTÜ)
Prof. Dr. Turan ÖZTURAN (BÜ)
Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY (MSÜ)**

MART 2009

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam boyunca değerli bilgileri ve tecrübeleri ile beni destekleyen ve bana her konuda yardımcı olan değerli danışman hocamlarım Sayın Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR ve Sayın Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Akademik kariyerime başlamama vesile olan ve bu süre içinde destek ve yardımlarını gördüğüm değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa TUNCAN ve Sayın Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a en samimi teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımda kullanılan malzemeleri temin eden Akçansa Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş., Betonsa Teknoloji Merkezi'ne ve çelik lifleri temin eden BEKSA Çelik Kord Sanayi Teknik Müdürü Sayın İnşaat Mühendisi Mehmet YERLİKAYA'ya teşekkür ederim.

Deneysel çalışma kapsamında üretimler Akçansa Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş.'nin Betonsa Teknoloji Merkezi'nde ve üretilen betonlar üzerinde mekanik deneyler İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuvar'ında yapılmıştır. Bu vesile ile laboratuvardaki deneylerimde gece ve gündüz demeden özveri ile yardımcı olan değerli meslektaşım Sayın Araş. Gör. Cengiz Şengül'e ve emeği geçen tüm Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına sonsuz teşekkürler ederim.

Beton üretimlerinde tecrübe ve yardımlarından dolayı Ürün Geliştirme Teknisyeni Sayın Hakan EKİM'e, Ürün Geliştirme Teknisyen Yardımcısı Sayın Gürkan SARMA'ya ve Ürün Kalite Müdürü Sayın İsmail GÖKALP'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Her konuda maddi ve manevi yardımlarını gördüğüm değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Altan ÇETİN'e en samimi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde maddi ve manevi en büyük katkıları olan sevgili babam (rahmetli) ve sevgili annem başta olmak üzere diğer aile fertlerine ve bana her konuda destek olan sevgili eşime de en içten dileklerle şükranlarımı sunuyorum.

Mart 2009

Muhsin YALÇIN
(Yük. İnşaat Müh.)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Tez Çalışmasının Amacı	5
2. ÇELİK LİF DONATILI BETONLAR (ÇLDB).....	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Çelik Lif Donatılı Beton Türleri	9
2.2.1 Geleneksel çelik lif donatılı betonlar	9
2.2.2 Karma çelik lif donatılı betonlar	11
2.2.3 Yüksek performanslı çelik lif donatılı betonlar	20
2.3 Çelik Lif Donatılı Betonların Performansına Etki Eden Faktörler	25
2.3.1 Karışım özellikleri ve deney yönünün etkisi	25
2.3.2 Matris bileşiminin etkisi	28
2.3.3 Çelik lif özelliklerinin etkisi	28
2.3.3.1 Çelik lif türü ve tipi	29
2.3.3.2 Çelik lif hacmi	31
2.3.3.3 Çelik lif uzunluğu, çapı ve narinliği	33
2.3.3.4 Çelik lif yönlenmesi	34
2.4 Çelik Lif Donatılı Betonların Üstünlükleri ve Uygulama Alanları.....	34
2.5 Çelik Lif Donatılı Betonların Yapısal Uygulamalarda Kullanılması	36
2.6 Çelik Lif Donatılı Betonların Özellikleri	38
2.6.1 Çelik lif donatılı taze betonların özellikleri	39
2.6.2 Çelik lif donatılı betonların mekanik özellikleri	40
2.6.2.1 Basınç dayanımı ve elastisite modülü	42
2.6.2.2 Çekme dayanımı	44
2.6.2.3 Eğilme dayanımı	49
2.6.2.4 Enerji yutma kapasitesi (tokluk)	52
2.6.2.5 Darbe ve yorulma dayanımı	56
2.6.2.6 Büzülme (rötre) davranışı	57
3. ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN PERFORMANSA DAYALI TASARIMI	59
3.1 Performansa Dayalı Tasarım.....	59
3.2 Performansa Dayalı Tasarım Parametrelerini Tanımlayan Yöntemler.....	60
3.2.1 Almanya beton birliği yöntemi (ABBY)	61
3.2.2 ASTM standardı (ASTM C 1018)	62
3.2.3 Japon standardı (JSCE-SF4)	63
3.2.4 Norveç yöntemi (NBP No.7)	67
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	69
4.1 Deneysel Çalışmanın Kapsamı	69
4.2 Deneysel Çalışma Programı.....	69

4.3 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	70
4.3.1 Çimento	70
4.3.2 Agrega	71
4.3.3 Çelik lif.....	73
4.3.4 Kimyasal katkı.....	74
4.3.5 Mineral katkı	74
4.4 Beton Karışımlarının Özellikleri ve Numunelerin Üretimi.....	75
4.5 Numunelerin Deneylere Hazırlanması	77
4.6 Beton Deneyleri.....	77
4.6.1 Taze beton deneyleri	77
4.6.1.1 Taze birim ağırlık deneyi	77
4.6.1.2 Çökme deneyi	78
4.6.2 Sertleşmiş beton deneyleri.....	78
4.6.2.1 Basınç dayanımı deneyi	78
4.6.2.2 Elastisite modülü deneyi	81
4.6.2.3 Yarmada çekme dayanımı deneyi	81
4.6.2.4 Dört noktalı kiriş eğilme deneyi	82
5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	85
5.1 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	85
5.1.1 Basınç deneyi	85
5.1.2 Elastisite modülü deneyi	88
5.1.3 Yarmada çekme deneyi	90
5.1.4 Dört noktalı kiriş eğilme deneyi.....	94
5.1.4.1 Yük-sehim eğrileri	94
5.1.4.2 Tokluk-sehim eğrileri	100
5.1.4.3 İlk çatlak yükü	105
5.1.4.4 Eğilme dayanımı	108
5.1.4.5 Özgül kırılma enerjisi	111
5.2 Performans Parametreleri (Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, Tokluk) Sonuçları.....	115
5.2.1 Almanya beton birliği yöntemine (ABBY) göre.....	115
5.2.1.1 Kullanılabilirlik sınır durumu (KSD) için eşdeğer eğilme çekme dayanımı	115
5.2.1.2 Taşıma gücü sınır durumu (KSD) için eşdeğer eğilme çekme dayanımı	118
5.2.2 ASTM standardına (ASTM C 1018) göre.....	122
5.2.3 Japon standardına (JSCE-SF4) göre.....	123
5.3 Çelik Lif Donatılı Betonların Performans Sınıfı Sonuçları.....	126
5.3.1 Almanya beton birliği yöntemine (ABBY) göre.....	126
5.3.2 ASTM standardına (ASTM C 1018) göre.....	128
6. DENEYSEL SONUÇLARIN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU	129
6.1 Optimizasyonun Amacı ve Kapsamı	129
6.2 Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYE)	129
6.3 Çok Amaçlı Optimizasyon	135
6.3.1 Arzu edilebilirlik (desirability) yöntemi.....	135
6.4 Regresyon Analizi ve Sonuçları	137
6.5 ÇLDB'lerin Optimum Karışım Tasarımı ve Sonuçları.....	141
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	153
KAYNAKLAR.....	159
EKLER.....	171

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
ABB	: Almanya Beton Birliği (DBV)
ABBY	: Almanya Beton Birliği Yöntemi
ASTM	: American Society of Testing Materials
CMOD	: Çatlak Ağzı Açıklık Yerdeğiştirmesi
ÇLDB	: Çelik Lif (Tel) Donatılı Beton (SFRC)
DSP	: Lifle Donatılmış Küçük Boyutta Malzemelerle Yoğunlaştırılmış Çimento Esaslı Kompozit
GLDB	: Geleneksel Lif Donatılı Beton (FRC)
GÇLDB	: Geleneksel Çelik Lif Donatılı Beton
JSCE-SF4	: Japan Society of Civil Engineering-Steel Fiber 4
KLDB	: Karma Lif Donatılı Beton
KSD	: Kullanılabilirlik Sınır Durumu (ULS)
LDB	: Lif Donatılı Beton
LVDT	: Linear Variable Differential Transducer
MDF	: Macro-Defect-Free
RILEM	: International Union of Laboratories and Expert in Construction Materials, Systems and Structures
SIFCON	: Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Beton
SIMCON	: Bulamaç Enjekte Edilmiş Hasır Lif (Sürekli) Donatılı Beton
SD	: Silis Dumanı
TS	: Türk Standartları
TSD	: Taşıma Gücü Sınır Durumu (SLS)
TYT	: Tepki Yüzeyi Yöntemi
YPÇLDB	: Yüksek Performanslı Çelik Lif Donatılı Beton
YPLDB	: Yüksek Performanslı Lif Donatılı Beton (HPFRC)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çelik lif donatılı beton için tipik bileşim oranlarının değişimi	32
Çizelge 3.1 : ÇLDB'ler için ABBY'ye göre şekil değiştirme bölgeleri.....	61
Çizelge 3.2 : ÇLDB'lerin kalıcı dayanım faktörlerine göre sınıflandırması.....	65
Çizelge 3.3 : Kalıcı eğilme gerilmesi için gereksinimler ve tokluk sınıfları.....	67
Çizelge 3.4 : Çizelge 3.3'de verilen tokluk sınıfları (2,3) için eğilme dayanımları	67
Çizelge 3.5 : Çizelge 3.3'de verilen tokluk sınıfları (2,3) için lif hacimleri	67
Çizelge 4.1 : Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	71
Çizelge 4.2 : Çimentonun kimyasal özellikleri ve karmaşık bileşikleri	71
Çizelge 4.3 : Agregaların bazı fiziksel ve özellikleri ve karışım oranları	73
Çizelge 4.4 : Çelik liflerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri	74
Çizelge 4.5 : Kimyasal katkı türü ve miktarları	74
Çizelge 4.6 : Silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler	75
Çizelge 4.7 : Her bir deney için üretilen numune boyutları ve sayıları.....	77
Çizelge 4.8 : Karışımlardaki malzeme miktarları ve taze beton özellikleri	79
Çizelge 5.1 : ÇLDB numunelere ait basınç, elastisite modülü ve yarma çekme deneyi sonuçları.....	93
Çizelge 5.2 : ÇLDB numunelere ait ilk çatlak yükü ve tokluk sonuçları.....	108
Çizelge 5.3 : ÇLDB kırış numunelere ait eğilme dayanımı ve özgül kırılma enerjisi sonuçları.....	112
Çizelge 5.4 : ÇLDB kırış numunelere ait kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumlarına göre eşdeğer eğilme çekme dayanımı sonuçları	121
Çizelge 5.5 : ÇLDB'lerin ASTM C 1018'e göre tokluk indisleri ve kalıcı dayanım faktörleri	123
Çizelge 5.6 : Japon standardına göre tokluk ve eşdeğer eğilme çekme dayanımı sonuçları	126
Çizelge 5.7 : ÇLDB'lerin ABBY'ye göre performans sınıfları	127
Çizelge 5.8 : ÇLDB'lerin ASTM C 1018 Standardı'na göre sınıfları	128
Çizelge 6.1 : L/d=80 olan çelik lifli karışımlara ait deney noktaları (1.Grup).....	134
Çizelge 6.2 : S/Ç=0,55 olan çelik lifli karışımlara ait deney noktaları (2.Grup) ...	134
Çizelge 6.3 : Karma çelik lifli karışımlara ait deney noktaları (3.Grup).....	135
Çizelge 6.4 : Regresyon Modelleri	138
Çizelge 6.5 : Modellere ait çoklu korelasyon katsayıları	139
Çizelge 6.6 : Çelik lif donatılı karışımlara ait maliyetler	142
Çizelge 6.7 : Faktörler ve tepkilere ait alt ve üst sınır değerleri.....	144
Çizelge 6.8 : L/d=80 olan çelik lifli karışımlara ait optimum karışım çözümleri (1. Grup)	145
Çizelge 6.9 : S/Ç=0,55 olan çelik lifli karışımlara ait optimum karışım çözümleri (2. Grup)	148
Çizelge 6.10 : Karma çelik lifli karışımların optimum karışım çözümleri (3.Grup)	150

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Geleneksel lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı	10
Şekil 2.2 : Betonda çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi.....	13
Şekil 2.3 : Kırılma sürecinde mikro ve makro liflerin etkisi	14
Şekil 2.4 : Yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı	20
Şekil 2.5 : Eğilmeye tabi tutulan yalın beton, LDB ve YPÇLDB'nin (SIFCON) gerilme-şekil değiştirme davranışı	21
Şekil 2.6 : YPÇLDB, lif donatılı beton (LDB) ve yalın betonun tipik çekme gerilme-şekil değiştirme davranışı	22
Şekil 2.7 : SIFCON ve LDB'nin tipik basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri	23
Şekil 2.8 : Döküm yönüne göre lif yerleşimi ve deney yönü	27
Şekil 2.9 : Yük-sehim eğrisine silis dumanı eklenmesinin etkisi.....	28
Şekil 2.10 : (a). Betonda genellikle kullanılan çelik liflerin tipik profilleri. (b). Bazı araştırmalarda kullanılmış dairesel ve eliptik lifler.....	30
Şekil 2.11 : Yük-sehim eğrisine farklı çelik lif tiplerinin etkisi.....	31
Şekil 2.12 : Yük-sehim eğrisine farklı çelik lif hacminin etkisi.....	32
Şekil 2.13 : Çelik lif donatılı betonların bazı uygulama alanları.....	36
Şekil 2.14 : Betonun işlenebilirliğinde lif narinliğinin etkisi	39
Şekil 2.15 : Basınç altında yalın beton ve ÇLDB'nin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı	42
Şekil 2.16 : ÇLDB'nin gerilme-şekil değiştirme eğrisine lif hacminin etkisi	43
Şekil 2.17 : Tek eksenli çekme davranışına çelik liflerin etkisi.....	45
Şekil 2.18 : Lif donatılı betonda lineer davranışın sapma	46
Şekil 2.19 : Tek eksenli çekme altında şekil değiştirme sertleşmesi gösteren lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı	47
Şekil 2.20 : ÇLDB'nin çatlak sonrası tek eksenli çekme davranışının iki teorik tipi	48
Şekil 2.21 : ÇLDB'nin tipik yük-sehim eğrisi	49
Şekil 2.22 : Eğilmeye yalın beton kesitinde şekil değiştirme uygunluğu ve kuvvet dengesi.....	51
Şekil 2.23 : Eğilmeye lifle donatılmış beton kesitinde şekil değiştirme uygunluğu ve kuvvet dengesi.....	51
Şekil 2.24 : Tokluğun tanımı	52
Şekil 3.1 : ABBY'ye göre tanımlanan şekil değiştirme bölgeleri ve yutulan enerjiler	62
Şekil 3.2 : ASTM C 1018'e göre standart eğilme deney düzeneği	63
Şekil 3.3 : ASTM C 1018'e göre tipik yük-sehim eğrisi üzerindeki tanımlamalar.....	63
Şekil 3.4 : Tam elasto-plastik malzemenin yük-sehim eğrisi.....	64

Şekil 3.5 : JSCE-SF4 yöntemine göre tipik yük-sehim eğrisi.	66
Şekil 4.1 : Deneysel programın şematik gösterimi	70
Şekil 4.2 : Karışım agregasının tane boyutu dağılımı eğrisi ve $d_{maks.}=31,5$ için karışım agregasına ait sınır eğrileri	72
Şekil 4.3 : Uçları kancalı tip çelik lif ve özellikleri	73
Şekil 4.4 : Çelik lifli taze beton karışımı.....	76
Şekil 4.5 : Kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi ile dört noktalı kiriş eğilme deney sistemi.....	82
Şekil 4.6 : Kiriş eğilme numunelerinin deney yerleşim düzeni.....	83
Şekil 5.1 : Çelik lif (ND, $L/d=80$) hacim oranının farklı S/Ç oranındaki numunelerin silindir basınç dayanımına etkisi	85
Şekil 5.2 : $S/Ç=0,55$ olan karışımlarda çelik lif (ND) narinliğinin ve hacim oranının silindir basınç dayanımına etkisi.....	86
Şekil 5.3 : Farklı S/Ç oranındaki karışımlarda, çelik liflerin farklı hacim oranlarında karma olarak kullanılmasının silindir basınç dayanımına etkisi.....	87
Şekil 5.4 : $S/Ç=0,44$ olan karışımlara yüksek dayanımlı çelik liflerin ($L/d=80$) karma olarak artan hacim oranlarında eklenmesinin silindir basınç dayanımı-şekil değiştirme eğrisine etkisi	87
Şekil 5.5 : Farklı S/Ç oranındaki karışımlara çelik liflerin karma olarak ($V_f=%0,73$) eklenmesinin silindir basınç dayanımı-şekil değiştirme eğrisine etkisi.....	88
Şekil 5.6 : Normal dayanımlı çelik lif (ND, $L/d=80$) hacim oranının farklı S/Ç oranındaki numunelerin basınç elastisite modülüne etkisi.....	89
Şekil 5.7 : $S/Ç=0,55$ olan numunelerde normal dayanımlı çelik lif (ND) narinliği ve hacim oranının elastisite modülüne etkisi	89
Şekil 5.8 : Yüksek dayanımlı karma çelik lif (YD, $L/d=80$) hacim oranının farklı S/Ç oranındaki numunelerin elastisite modülüne etkisi	90
Şekil 5.9 : Normal dayanımlı çelik lif (ND, $L/d=80$) hacim oranının farklı S/Ç oranındaki numunelerin yarmada çekme dayanımına çelik lif hacminin etkisi.....	91
Şekil 5.10 : $S/Ç=0,55$ olan numunelerde normal dayanımlı çelik lif (ND) narinliği ve hacim oranının yarmada çekme dayanımına etkisi	91
Şekil 5.11 : Yüksek dayanımlı karma çelik lif (YD, $L/d=80$) hacim oranının farklı S/Ç oranındaki numunelerin yarma çekme dayanımına etkisi	92
Şekil 5.12 : $S/Ç=0,45$ olan farklı lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük- sehim eğrileri	94
Şekil 5.13 : $S/Ç=0,65$ olan farklı lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük- sehim eğrileri	95
Şekil 5.14 : $S/Ç=0,55$ ve $L/d=80$ olan farklı lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	96
Şekil 5.15 : $S/Ç=0,55$ ve $L/d=65$ olan farklı çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	96
Şekil 5.16 : $S/Ç=0,55$ ve $L/d=55$ olan farklı çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	97
Şekil 5.17 : $S/Ç=0,32$ ve $L/d=80$ olan farklı karma çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	98
Şekil 5.18 : $S/Ç=0,44$ ve $L/d=80$ olan farklı karma çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	99

Şekil 5.19 : S/Ç=0,75 ve L/d=80 olan farklı karma çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	99
Şekil 5.20 : S/Ç=0,45 ve L/d=80 olan ÇLDB kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif (ND) hacim oranının etkisi	101
Şekil 5.21 : S/Ç=0,65 ve L/d=80 olan ÇLDB kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif (ND) hacim oranının etkisi.....	102
Şekil 5.22 : S/Ç=0,55 ve L/d=80 olan kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi	102
Şekil 5.23 : S/Ç=0,55 ve L/d=65 olan kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi	103
Şekil 5.24 : S/Ç=0,55 ve L/d=55 olan kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi	103
Şekil 5.25 : S/Ç=0,32 ve L/d=80 olan karma çelik lifli kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi	104
Şekil 5.26 : S/Ç=0,44 ve L/d=80 olan karma çelik lifli kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi	104
Şekil 5.27 : S/Ç=0,75 ve L/d=80 olan karma çelik lifli kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi	105
Şekil 5.28 : Farklı S/Ç oranlarında ve L/d=80 olan çelik lifli kiriş numunelerin ilk çatlak yükü değerine çelik lif hacim oranının etkisi	106
Şekil 5.29 : S/Ç=0,55 olan kiriş numunelerin ilk çatlak yükü değerine çelik lif narinliği ve hacim oranının etkisi.....	107
Şekil 5.30 : Farklı S/Ç oranındaki karma çelik lifli kiriş numunelerin, ilk çatlak yükü değerine çelik lif hacim oranının etkisi	107
Şekil 5.31 : Farklı S/Ç oranındaki karışımların eğilme dayanımına çelik lif hacminin etkisi	109
Şekil 5.32 : S/Ç=0,55 olan numunelerde çelik lif narinliği ve hacim oranının eğilme dayanımına etkisi	110
Şekil 5.33 : Farklı S/Ç oranındaki karma çelik lifli numunelerde, çelik lif hacim oranının eğilme dayanımına etkisi... ..	111
Şekil 5.34 : Farklı S/Ç oranındaki numunelerin özgül kırılma enerjisine çelik lif (L/d=80) hacminin etkisi	113
Şekil 5.35 : S/Ç=0,55 olan numunelerde çelik lif narinliği ve hacim oranının özgül kırılma enerjisine etkisi	114
Şekil 5.36 : Farklı S/Ç oranlı karma çelik lifli numunelerde, çelik lif hacim oranının özgül kırılma enerjisine etkisi.....	114
Şekil 5.37 : KSD için eşdeğer eğilme dayanımına, S/Ç oranı ve çelik lif (L/d=80) hacim oranının etkisi.....	116
Şekil 5.38 : KSD için eşdeğer eğilme dayanımına çelik lif narinliği ve hacim oranının etkisi.....	117
Şekil 5.39 : KSD için eşdeğer eğilme dayanımına, S/Ç oranı ve karma çelik lif hacim oranının etkisi.....	118
Şekil 5.40 : TSD için eşdeğer eğilme dayanımına, S/Ç oranı ve çelik lif hacim oranının etkisi.....	118
Şekil 5.41 : TSD için eşdeğer eğilme dayanımına, çelik lif narinliği ve hacim oranının etkisi.....	120
Şekil 5.42 : TSD için eşdeğer eğilme dayanımına, S/Ç ve çelik lif hacim oranının etkisi.....	120
Şekil 5.43 : JSCE Standardına göre eşdeğer eğilme dayanımına, S/Ç ve çelik lif hacim oranının etkisi.....	124

Şekil 5.44 : JSCE standardına göre eşdeğer eğilme dayanımına çelik lif narinliği ve hacim oranı ile değişimi.....	124
Şekil 5.45 : JSCE standardına göre eşdeğer eğilme dayanımına S/Ç oranı ve çelik lif narinliğinin etkisi.....	125
Şekil 6.1 : Deney veri noktaları	133
Şekil 6.2 : L/d=80 olan çelik lifli karışımlar için deneysel ve modelle bulunan sonuçlar.....	139
Şekil 6.3 : S/Ç=0,55 olan farklı narinlikte çelik liflerin kullanıldığı karışımlar için deneysel ve modelle bulunan sonuçlar	139
Şekil 6.4 : Karma çelik lifli karışımlar için deneysel ve modelle bulunan sonuçlar.....	140
Şekil 6.5 : L/d=80 çelik lifli karışımların eşdeğer eğilme çekme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri	140
Şekil 6.6 : S/Ç=0,55 olan farklı narinlikte çelik lifli karışımların eşdeğer eğilme çekme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri	141
Şekil 6.7 : Karma çelik lifli karışımların eşdeğer eğilme çekme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri	141
Şekil 6.8 : L/d=80 olan çelik lifli karışımlar için çok amaçlı optimizasyona ait tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü	147
Şekil 6.9 : S/Ç=0,55 olan farklı narinlikteki çelik lifli karışımlar için tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü	149
Şekil 6.10 : Karma çelik lifli karışımların çok amaçlı optimizasyon sonucunu gösteren tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü.....	151
Şekil A.1 : Tekli ve karma olarak kullanılan farklı tip çelik lifler	172
Şekil B.1 : Başlık yapılmış silindir numuneler.....	173
Şekil B.2 : Yükleme yüzeyi işaretlenmiş disk numuneler.....	173
Şekil B.3 : Yükleme noktaları işaretlenmiş kiriş numuneler.....	174
Şekil C.1 : Yük kontrollü silindir basınç deneyi (1. ve 2. Grup).....	175
Şekil C.2 : Yük kontrollü küp basınç deneyi.....	175
Şekil C.3 : Elastisite modülü aparatı ve deneyi (1. ve 2. Grup)	176
Şekil C.3a : Elastisite modülü aparatı	176
Şekil C.3b : Elastisite modülü deneyi	176
Şekil C.4 : Şekil değiştirme kontrollü silindir basınç ve elastisite modülü deneyi (3.Grup).....	177
Şekil C.4a : Kapalı çevrimli deplasman kontrollü basınç deney cihazında kullanılan silindir numune ve deformasyon ölçümü için aparatlar	177
Şekil C.4b : Silindir basınç ve elastisite modülü deneyi	177
Şekil C.5 : Disk yarma çekme numunesi yerleşim düzeni ve deneyi.....	177
Şekil C.5a : Disk yarma çekme deneyi	177
Şekil C.5b : Disk yarma çekme numunesi yerleşim düzeni ve deney sonrası	177
Şekil C.6 : Kapalı çevrimli deplasman kontrollü kiriş eğilme deney sistemi.....	179
Şekil C.6a : Kapalı çevrimli deplasman kontrollü yükleme cihazında kiriş eğilme deney sistemi	179
Şekil C.6b : Kiriş numunesinin yerleşim düzeni ve eğilme deneyi	179
Şekil C.6c : Eğilme etkisindeki kiriş numunesinin deney düzeni	180
Şekil C.6d : Eğilmeye tabi tutulan kiriş numunesinin deney düzeni.....	180
Şekil D.1 : Normal dayanımlı çelik lif hacim oranının farklı S/Ç oranındaki küp numunelerin basınç dayanımına etkisi (L/d=80).....	181
Şekil D.2 : S/Ç=0,55 olan karışımlarda normal dayanımlı çelik lif narinliğinin ve hacim oranının küp basınç dayanımına etkisi.....	181

Şekil D.3 : Farklı S/Ç oranındaki karışımlarda yüksek dayanımlı çelik liflerin farklı lif hacim oranlarında karma olarak kullanılmasının küp basınç dayanımına etkisi	182
Şekil E.1 : Farklı matris dayanımındaki karışımlara aynı oranda yüksek dayanımlı karma çelik lif ($V_f=\%0,27$) eklenmesinin silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrisine etkisi	183
Şekil E.2 : S/Ç=0,32 olan karışımlara yüksek dayanımlı karma çelik liflerin artan hacim oranlarında eklenmesinin silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrisine etkisi ($L/d=80$).....	183
Şekil E.3 : S/Ç=0,75 olan karışımlara yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak artan hacim oranlarında eklenmesinin silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrisine etkisi ($L/d=80$).....	184
Şekil F.1 : S/Ç=0,65 olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	185
Şekil F.2 : S/Ç=0,65, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,19$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	185
Şekil F.3 : S/Ç=0,65, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,32$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	186
Şekil F.4 : S/Ç=0,65, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,45$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	186
Şekil F.5 : S/Ç=0,65, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,58$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	187
Şekil F.6 : S/Ç=0,45 olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	187
Şekil F.7 : S/Ç=0,45, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,19$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	188
Şekil F.8 : S/Ç=0,45, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,32$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	188
Şekil F.9 : S/Ç=0,45 ve $V_f=\%0,45$ olan kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	189
Şekil F.10 : S/Ç=0,45, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,58$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	189
Şekil F.11 : S/Ç=0,55 olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	190
Şekil F.12 : Aynı matris dayanımında (S/Ç=0,55), normal dayanımlı, $L/d=80$ ve $V_f=\%0,26$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	190
Şekil F.13 : Aynı matris dayanımında (S/Ç=0,55), normal dayanımlı, $L/d=80$ ve $V_f=\%0,38$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	191
Şekil F.14 : Aynı matris dayanımında (S/Ç=0,55), normal dayanımlı, $L/d=80$ ve $V_f=\%0,51$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	191
Şekil F.15 : Aynı matris dayanımında (S/Ç=0,55), normal dayanımlı, $L/d=65$ ve $V_f=\%0,32$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	192
Şekil F.16 : Aynı matris dayanımında (S/Ç=0,55), normal dayanımlı, $L/d=65$ ve $V_f=\%0,45$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	192
Şekil F.17 : Aynı matris dayanımında (S/Ç=0,55), normal dayanımlı, $L/d=65$ ve $V_f=\%0,58$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	193

Şekil F.18 : Aynı matris dayanımında ($S/C=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=55$ ve $V_f=0,38$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	193
Şekil F.19 : Aynı matris dayanımında ($S/C=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=55$ ve $V_f=0,51$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	194
Şekil F.20 : Aynı matris dayanımında ($S/C=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=55$ ve $V_f=0,64$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	194
Şekil F.21 : $S/C=0,32$ olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	195
Şekil F.22 : $S/C=0,32$ ve $V_f=0,27$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	195
Şekil F.23 : $S/C=0,32$ ve $V_f=0,50$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	196
Şekil F.24 : $S/C=0,32$ ve $V_f=0,73$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	196
Şekil F.25 : $S/C=0,44$ olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	197
Şekil F.26 : $S/C=0,44$ ve $V_f=0,27$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	197
Şekil F.27 : $S/C=0,44$ ve $V_f=0,50$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	198
Şekil F.28 : $S/C=0,44$ ve $V_f=0,73$ olan karma yüksek dayanımlı çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	198
Şekil F.29 : $S/C=0,75$ olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri	199
Şekil F.30 : $S/C=0,75$ ve $V_f=0,27$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	199
Şekil F.31 : $S/C=0,75$ ve $V_f=0,50$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	200
Şekil F.32 : $S/C=0,75$ ve $V_f=0,73$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.....	200
Şekil G.1 : ÇLDB’lerde liflerin çatlak kontrol ve köprüleme etkisinin şematik gösterimi	201
Şekil G.2 : ÇLDB’lerde liflerin çatlak kontrol ve köprüleme etkisi.....	202
Şekil G.3 : Yüksek matris dayanımlı ÇLDB’lerde lif kopması.....	203
Şekil G.4 : Düşük matris dayanımlı karma lifli ÇLDB’lerde lif sıyrılması.....	204

SEMBOL LİSTESİ

L/d	: Lif uzunluğu/lif çapı (narinlik)
σ_{PC}	: Çatlak sonrası en büyük gerilme
ϵ_{pc}	: Çatlak sonrası en büyük gerilmedeki şekil değiştirme
σ_{cc}	: İlk çatlak gerilmesi
ϵ_{cc}	: İlk çatlak gerilmesindeki şekil değiştirme
V_f	: Lif hacmi
$V_{f,kr}$: Kritik lif hacmi
C_F	: Kompaksiyon faktörü
$V_{f,kr}$: Kritik lif hacmi
ϵ_{os}	: Yalın betonun serbest büzülmesi
μ	: Sürtünme katsayısı
I_5, I_{10}, I_{20}	: Tokluk indisi
T_b, W_o	: Yük-sehim eğrisi altındaki alan
L_f	: Lif uzunluğu
δ	: Sehim
δ_o	: İlk çatlak sehim
δ_{son}	: Son sehim
δ_m	: Kiriş açıklık ortasındaki sehim
$f_{eş-I}$: Karakteristik eşdeğer eğilme çekme dayanımı (Kullanılabilirlik sınır durumu için, KSD)
$f_{eş-II}$: Karakteristik eşdeğer eğilme çekme dayanımı (Taşıma gücü sınır durumu için, TSD)
P_{cr}, P_o	: İlk çatlak yükü
P_u	: En büyük eğilme çekme yükü
$R_{5,10}, R_{10,20}$: Kalıcı dayanım faktörleri
$M_{maks.}$: En büyük moment
W	: Atalet momenti
$P_{maks.}$: En büyük yük
G_f	: Kırılma enerjisi
E	: Elastisite modülü
$S/Ç$: Su/çimento oranı
h	: Silindir, disk ve kiriş numunelerinin yüksekliği
d	: Silindir ve disk numunelerinin çapı
k	: Kiriş uzunluğu ve açıklığına bağlı bir parametre
δ_{tb}	: Kiriş açıklığının 1/150'sine karşılık gelen sehim
A_{32}, B_{32}, C_{32}	: Agregatane çapı dağılımı sınır eğrileri
ND	: Normal çekme dayanımlı
YD	: Yüksek çekme dayanımlı
a	: Çentik derinliği
m	: Kiriş numunesinin mesnetler arası ağırlığı
U	: Kiriş numune uzunluğu
b	: Kiriş numune genişliği

S	: Kiriş açıklığı
d_{maks}	: En büyük agrega boyutu
f_b	: Silindir, küp basınç dayanımı
ϵ	: Düşey şekil değiştirme
f_y	: Yarma çekme dayanımı
P	: Yük
T	: Tokluk
f_e	: Eğilme dayanımı
e	: İstatiksel hata
Y	: Tepki
f	: Tepkinin fonksiyonu
X_k	: Faktörler (X_1, X_2, \dots, X_k)
k	: Faktör sayısı
n	: Tepki sayısı
d_i	: Her bir tepkinin arzu edilirlilik değeri
D	: Çok amaçlı arzu edilirlilik değeri
R	: Korelasyon katsayısı
r_i	: Her bir tepki için önem seviyesi
Y_i	: Tepki yüzeyi yöntemi ile belirlenen değer
$\min f_i$: Deneysel olarak elde edilen en küçük değer
$\max. f_i$: Deneysel olarak elde edilen en büyük değer
T_i	: Optimizasyonda aranan hedef değer
W_{ti}	: Etki ağırlık düzeyi

ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN PERFORMANSA DAYALI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Gevrek bir malzeme olan geleneksel betonlar çekme dayanımı ve çatlak sonrası yük taşıma kapasitesi bakımından zayıf özelliklere sahiptir. Bu nedenle darbe, çarpma ve deprem gibi dinamik etkiler karşısında kırılma sonrasında betonda ani göçmeler meydana gelmektedir. Betonun bu zayıf özellikleri, çelik donatılar veya öngermeli elemanlarla giderilirken son yıllarda betonda farklı türde lifler kullanılarak bu özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Betonun mekanik özellikleri ve sünekliğini iyileştirmek için yapılan bu çalışmalarda diğer lif türlerine göre farklı tiplerdeki çelik liflerin daha fazla kullanıldığı görülmektedir. Çelik lifler arasında ankraj etkisi nedeniyle uçları kancalı tip liflerin betonun çatlak sonrası gevrek olan davranışının iyileşmesinde daha etkili olduğu gözlenmektedir. Çelik lifin çekme dayanımı, narinliği ve hacim oranının betonun performansı üzerinde önemli etkileri vardır. Bu çalışmada uçları kancalı tip çelik liflerin tekli ve karma olarak kullanılmasının betonun zayıf olan özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Ülkemizde beton tasarımı ve sınıflandırması sadece basınç dayanımı esas alınarak yapılmaktadır. Beton karışım tasarımı, mekanik ve çevresel etkilere göre yapılmadığında betonda normal hizmet ömrü bitmeden durabilite sorunları oluşarak zamanla kırılma ve göçmeler meydana gelebilmektedir. Bu durum, betonun durabilite, tokluk ve eğilme dayanımı gibi istenen performansa göre tasarlanması ve sınıflandırılması gereğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, çelik liflerin betona kazandırdığı yüksek enerji yutma kapasitesi özelliği kullanılarak çelik lif donatılı betonların (ÇLDB) performansa dayalı parametrelere göre karışım tasarımları ve performans sınıflarının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmaları, bazı mekanik özellikler ve performans parametrelerine göre bilgisayar destekli optimizasyon teknikleri kullanılarak en düşük maliyet ve en yüksek performans koşullarında optimum karışım çözümlerinin belirlenmesini içermektedir.

Bu amaç doğrultusunda yapılan çalışma yedi bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, lif donatılı betonlar ile ilgili giriş yapıldıktan sonra çalışmanın amacı belirtilmiştir. İkinci bölümde, çelik lif donatılı betonlar ve mekanik özellikleri ile ilgili yapılan literatür çalışması verilmiştir. Üçüncü bölümde, ÇLDB'nin performansa dayalı tasarımı ve tasarımda kullanılan farklı parametreleri tanımlayan bazı yöntemler sunulmuştur. Dördüncü ve beşinci bölümlerde yapılan deneysel çalışmalar ve değerlendirme sonuçları verilmiştir. Altıncı bölümde deney sonuçlarının modellenmesi ve optimizasyonu hakkında bilgiler ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Son bölümde yapılan çalışmadan elde edilen genel sonuçlar ve öneriler maddeler halinde verilmiştir.

Bu çalışmada, çekme dayanımı 1000-1100 N/mm² arasında olan normal dayanımlı ve 2000-2600 N/mm² arasında olan yüksek dayanımlı uçları kancalı tip çelik liflerin tekli ve karma olarak kullanıldığı üç gruptan oluşan bir deneysel program uygulanmıştır. Her bir gruptaki karışımlara ait özellikler aşağıda verilmiştir.

1.Grup: Aynı tip çelik lifin iki farklı matris dayanımındaki betonların mekanik ve performans (süneklik) özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Normal çekme dayanımına sahip narinliği 80, uzunluğu 60 mm ve çapı 0,75 mm olan çelik lifler, su/çimento (S/Ç) oranı 0,45 ve 0,65 olan iki farklı karışımlara tekli olarak eklenmiştir. Çelik lifler her bir S/Ç oranındaki karışımlara 15 kg/m³ (%0,19), 25 kg/m³ (%0,32), 35 kg/m³ (%0,45) ve 45 kg/m³ (%0,58) hacim oranlarında eklenmiştir. Çimento miktarları, S/Ç oranı 0,45 ve 0,65 için sırasıyla 400 kg/m³ ve 280 kg/m³'tür. Bu grupta, 2 seri yalın ve 8 seri çelik lifli karışımlar olmak üzere toplam 10 seri beton üretilmiştir.

2.Grup: Aynı matris dayanımında farklı narinliğe sahip çelik liflerin betonun mekanik ve performans özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Normal çekme dayanımına sahip narinliği 80, 65, 55, uzunlukları ve çapları sırasıyla 60 mm, 60 mm, 30 mm ve 0,75 mm, 0,90 mm ve 0,55 mm olan çelik lifler, S/Ç oranı 0,55 olan karışımlara tekli olarak eklenmiştir. Narinliği 80 olan lifler; 20 kg/m³ (%0,26), 30 kg/m³ (%0,38) ve 40kg/m³ (%0,51), 65 olan lifler; 25 kg/m³ (%0,32), 35 kg/m³ (%0,45) ve 45 kg/m³ (%0,58), 55 olan lifler; 30 kg/m³ (%0,38), 40 kg/m³ (%0,51) ve 50 kg/m³ (%0,64) hacim oranlarında kullanılmıştır. Çimento miktarı 350 kg/m³'tür. Bu grupta 1 seri yalın ve 9 seri çelik lifli karışımlar olmak üzere 10 seri beton üretilmiştir.

3. Grup: Aynı narinlikte farklı uzunluk ve çaplarda çelik liflerin betonun mekanik ve performans özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Yüksek çekme dayanımına sahip narinliği 80, uzunlukları ve çapları sırasıyla 60 mm, 40 mm, 30 mm ve 0,71 mm, 0,50 mm, 0,38 mm olan çelik lifler 0,32, 0,44 ve 0,75 olmak üzere üç farklı S/Ç oranındaki karışımlara karma olarak eklenmiştir. Aynı narinlikte farklı uzunluk ve çaplarda çelik lifler, her bir S/Ç oranındaki karışımlarda 21 kg/m³ (%0,27), 39 kg/m³ (%0,50) ve 57 kg/m³ (%0,73) toplam hacim oranlarında kullanılmıştır. Toplam hacim oranı 21 kg/m³ (%0,27) için her üç tip çelik lif, 7 kg/m³ (%0,09) hacim oranında, 39 kg/m³ (%0,50) için 13 kg/m³ (%0,16) ve 57 kg/m³ (%0,73) için 19 kg/m³ (%0,24) hacim oranında eklenmiştir. Karışımlardaki çimento (bağlayıcı) miktarları, S/Ç=0,32, S/Ç=0,44 ve S/Ç=0,75 için sırasıyla 570 kg/m³ (513 kg/m³ çimento ve 57 kg/m³ silis dumanı), 450 kg/m³ ve 270 kg/m³'tür. Bu grupta 3 seri yalın 9 seri çelik lifli karışımlar olmak üzere toplam 12 seri beton üretilmiştir.

Her bir gruptaki serilerde, kaba agrega olarak kalker esaslı yoğunlukları 2,60 gr/cm³ olan kırmataş I (4-11mm) ve kırmataş II (8-22 mm), ince agrega olarak yoğunlukları sırayla 2,57 gr/cm³ ve 2,60 gr/cm³ olan doğal kum (0-4 mm) ve kırmataş tozu (0-5 mm) kullanılmıştır. Karışım oranları her bir seride kırmataş I %31±2, kırmataş II %31±2, doğal kum %17±1 ve kırmataş tozu %21±1 olarak sabit tutuldu. Çelik liflerin tekli olarak kullanıldığı karışımlarda 90-130 mm, karma olarak kullanıldığı karışımlarda 100-180 mm arasında çökme değerlerine sahip yalın ve çelik lifli taze karışımlar üretildi. Kimyasal katkı, belirli işlebilirlikte taze karışımlar üretebilmek için artan oranlarda kullanıldı. Üretilen karışımlar, her bir deney için farklı boyuttaki kalıplara döküldükten sonra vibrasyon masası ile sıkıştırılarak yerleştirildi. Kalıplara yerleştirilen beton numuneler yaklaşık 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak 20±2°C sıcaklıkta kirece doygun kür havuzunda 28. güne daha sonra 56. güne kadar laboratuvar ortamında tutuldu.

Çelik liflerin tekli ve karma olarak kullanıldığı ÇLDB'lerin mekanik ve performans özelliklerini belirlemek için basınç, elastisite modülü, yarma çekme ve kırılganlık eğilme deneyleri yapıldı. Standart basınç ve yarma çekme dayanım deneyleri TS EN 12390-3 ve TS EN 12390-6'ya uygun olarak gerçekleştirildi. Kırılganlık numunelerin enerji yutma kapasitesini belirlemek için ASTM C 1018 deney standardına uygun olarak 5 mm sehim değerine kadar deformasyon kontrollü dört noktalı eğilme deneyleri yapıldı.

Deney sonuçlarına bağlı olarak çelik lif narinliği ve hacim oranının genel olarak ÇLDB'lerin basınç dayanımı ve elastisite modülüne etkisi olmadığı belirlendi. Ancak yüksek matris dayanımlı ($S/Ç=0,32$) karma ÇLDB'lerde çelik lif hacim oranının artmasıyla basınç dayanımının arttığı görüldü. Karma ÇLDB'lerde yapılan şekil değiştirme kontrollü basınç deneyleri sonucunda karma liflerin betonun basınç tokluğunu arttırdığı gözlemlendi. ÇLDB'lerin yarma çekme ve eğilme dayanımlarında artan matris dayanımı, lif dayanımı, narinliği ve hacim oranına bağlı olarak artışlar belirlendi. Eğilme dayanımlarında meydana gelen artışın yarma çekme dayanımına göre daha belirgin olduğu görüldü. Bu artışların, çelik liflerin çatlak kontrolü sağlaması ve çatlakların birleşiminde bir köprü rolü oynamasına bağlanabilir. Artan lif hacmiyle yarma ve eğilme dayanımlarında daha fazla artış meydana gelmesi, artan lif sayısı nedeniyle daha etkin çatlak kontrolü ve köprülenmesinin bir sonucudur. ÇLDB'lerin artan matris dayanımı, lif dayanımı, narinliği ve hacim oranına bağlı olarak şekil değiştirme kapasitelerinin artmasıyla yük-sehim eğrilerinde ilk çatlak yükü ve eğri altındaki alanda (tokluk) belirgin iyileşmeler belirlendi. Buna bağlı olarak performans parametreleri olan kullanılabilirlik (KSD) ve taşımacı sınır durumlarına (TSD) göre eşdeğer eğilme çekme dayanımlarında artışlar görüldü. Bu artışların çelik liflerin lif-matris arasındaki aderansa bağlı olarak matris içerisinde sıyrılması veya kopması sürecinde gereken enerjinin artmasına bağlanabilir. Yüksek matris dayanımlarında KSD ve TSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımının daha yüksek olması, lif-matris arasındaki daha güçlü aderans nedeniyle liflerin çekme dayanımlarına ulaştıktan sonra kopması için daha fazla enerji gereksiniminin bir sonucudur. ÇLDB'lerin lif sıyrılma ve kopma mekanizması ile ilk çatlak yükü sonrası şekil değiştirme sertleşmesi ve tepe yükü sonrasında şekil değiştirme yumuşaması göstermesi yüksek performansı çimento esaslı kompozit malzemelerin tipik bir davranış özelliğidir. ÇLDB'ler için basınç dayanımı ve performans parametreleri olan KSD ve TSD'ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımına bağlı olarak performans dayalı karışım tasarımları ve performans sınıfları belirlendi. Böylece belirli bir basınç dayanımı ve enerji yutma kapasitesine sahip sünük betonların performans dayalı tasarım ile elde edilebileceği gösterildi.

Elde edilen deney sonuçlarına bağlı olarak her bir grup çalışma için optimizasyon, Tepki Yüzeyi Yöntemi Faktöriyel Tasarım Metodu ile Design-Expert 6.0.7 programı kullanılarak yapıldı. Matris dayanımı (su/çimento oranı), lif narinliği ve hacim oranı gibi bağımsız değişkenler 'faktör' ve yarma çekme dayanımı, KSD ve TSD'ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımları ve özgül kırılma enerjisi gibi bağımlı değişkenler 'tepki' olarak tanımlanarak çok amaçlı optimizasyon tekniklerinden olan Arzu Edilirlik Metodu ile optimum çözümler belirlendi. Mekanik (yarma çekme dayanımı) ve performans (KSD ve TSD için eşdeğer eğilme dayanımı ve özgül kırılma enerjisi) özelliklerini $S/Ç$ oranı, lif narinliği ve hacim oranına bağlı olarak tahmin edebilen regresyon modelleri verildi. Çelik liflerin eklenmesi ile artan karışım maliyeti gözönüne alınarak en düşük maliyet en yüksek performans koşullarında faktörler için minimum ve tepkiler için maksimum amaç fonksiyonları seçilerek ÇLDB'ler için

optimum ekonomik karışım çözümleri elde edildi. Ayrıca her bir S/Ç oranı ve lif narinliği için aynı optimizasyon koşullarındaki karışım çözümleri elde edildi. Optimizasyon sonucunda matris dayanımı ve lif narinliği arttıkça aynı amaç koşullarını sağlayan çözümlere daha az hacim oranında çelik lif kullanılarak ulaşılabileceği belirlendi.

OPTIMIZATION AND PERFORMANCE BASED DESIGN OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETES

SUMMARY

Since it is a brittle material, traditional concrete has weak characteristics regarding tensile strength and load bearing capacity beyond cracking. This may cause sudden collapse due to the dynamic effects such as impact and earthquake loads. While these weak characteristics are improved with steel reinforcements and pre-stressed elements, in recent years the studies are also performed to improve these characteristics by using different types of fibers. In such studies, in order to improve ductility and mechanical properties of concrete, generally steel fibers are used. Due to anchorage effect, hooked steel fibers are better for the improvement of concrete's ductility beyond rupture. Tensile strength, aspect ratio and amount of steel fiber influence the performance of concrete significantly. In this study, the effects of hooked steel fiber on the performance of concrete is investigated.

In Turkey, concrete mix design and classification is generally based on the compressive strength. However, designing concrete mixture without considering mechanical and environmental effects may cause durability problems during concrete's lifespan. This necessitates concrete to be designed and classified according to the required performance characteristics such as durability, toughness, and flexural strength.

This study consists of the performance based mix design of steel fiber reinforced concrete and experimental studies for determination of performance classes by using the property of high energy absorption capacity achieved by steel fibers. The study also includes the determination of optimum mixtures focused on minimum cost and maximum performance by using relevant softwares according to the performance parameters and some mechanical properties.

The study is divided into 7 main parts. In the first chapter, fiber-reinforced concrete was introduced and the purpose was given. Secondly, the literature survey on the steel-fiber reinforced concrete and mechanical properties were presented. In the third part, the performance based design of steel fiber-reinforced concrete and parameters used were given. In the fourth and fifth sections, the experimental study and results were presented, respectively. In the next part, the modeling and optimization of experimental results were given. In the last section, conclusions and recommendations were marked.

In the experimental study, the program is divided into three groups using single and hybrid forms of the hooked steel fibers having normal tensile strength in the interval of 1000-1100 N/mm² and high tensile strength in the interval of 2000-2600 N/mm². The properties of the mixtures in each group were given below.

1st Group: The effect of same type steel fiber on the mechanical and performance (ductility) properties of concretes having two different matrices strength was investigated. The steel fibers of normal tensile strength having the aspect ratio of 80,

the length of 60 mm and the diameter of 0.75 mm were added in single form to the two different mixtures having the water-cement ratios of 0.45 and 0.65. The amounts of steel fibers were 15 kg/m³ (%0.19), 25 kg/m³ (%0.32), 35 kg/m³ (%0.45) and 45 kg/m³ (%0.58). Cement dosages were selected as 400 kg/m³ and 280 kg/m³ for the water-cement ratios of 0.45 and 0.65, respectively. In this group, ten concrete series including two series of control concrete and eight series of steel fiber-reinforced concretes were produced.

2nd Group: The effect of aspect ratio of steel fibers on the mechanical and performance properties of steel fiber-reinforced concrete was investigated. The steel fibers of normal tensile strength having the aspect ratios of 80, 65, and 55 were utilized. The length of fibers were 60 mm, 60 mm and 30 mm and the diameters of the fibers were 0.75 mm, 0.90 mm and 0.55 mm. The fibers were added in single form to the matrices having a water-cement ratio of 0.55. The amounts of steel fibers having the aspect ratio of 80 were determined as 20 kg/m³ (%0.26), 30 kg/m³ (%0.38) and 40 kg/m³ (%0.51). The amounts for the steel fibers having the aspect ratio of 65 were selected as 25 kg/m³ (%0.32), 35 kg/m³ (%0.45) and 45 kg/m³ (%0.58). The amounts for the steel fibers having the aspect ratio of 55 were used as 30 kg/m³ (%0.38), 40 kg/m³ (%0.51) and 50 kg/m³ (%0.64). The dosage of cement was 350 kg per 1 m³ of concrete. In this group, nine concrete series were produced by using the steel fibers and one control concrete was produced.

3rd Group: The effect of length and diameter of fiber on the mechanical and performance properties of concrete was investigated. The steel fibers of high tensile strength having the aspect ratio of 80 were used. The lengths of the fibers were 60 mm, 40 mm and 30 mm. The diameters of the fibers were 0.71 mm, 0.50 mm and 0.38 mm. These fibers were added in hybrid form to the mixtures having water-cement ratios of 0.32, 0.44 and 0.75. The amounts of steel fibers having same aspect ratio but different length and diameter were selected as 21 kg/m³ (%0.27), 39 kg/m³ (%0.50) and 57 kg/m³ (%0.73) in each mixture. Each type steel fiber was added in the amount of 7 kg/m³ (%0.09) for the total volumetric ratio of 21 kg/m³ (%0.27). For 39 kg/m³ (%0.50), the amounts were 13 kg/m³ (%0.16) and 19 kg/m³ (%0.24), respectively. The cement dosages in the mixtures having the water-cement ratios of 0.32, 0.44 and 0.75 were selected as 570 kg/m³ (513 kg/m³ cement and 57 kg/m³ silica fume), 450 kg/m³ and 270 kg/m³, respectively. In this group, nine concrete series were produced by using steel fibers. Three concrete series were produced as control mixtures. Totally, twelve concrete series were produced for this group.

In all concrete mixtures, calcareous coarse aggregates, fine aggregates and filler of crushed limestone were used. As coarse aggregate, the particle fractions of crushed limestone I and II were 4-11 mm and 8-22 mm, respectively. The density of coarse aggregate was determined as 2.60 gr/cm³. Natural sand and filler of crushed limestone were used as fine aggregate. The particle fractions of natural sand and filler of crushed lime stone were 0-4 mm and 0-5 mm, respectively. The densities of two fine aggregate and filler were 2,57 gr/cm³ and 2,60 gr/cm³, respectively. The amounts of aggregates were selected as %31±2, %31±2, %17±1 and %21±1, for crushed limestone I, crushed limestone II, natural sand, and filler, respectively. The slump values ranged between 90 and 130 mm in the mixtures containing the fibers in single form. However, the slump values varied between 100 and 180 mm in the mixtures produced with the fibers in hybrid form. A super plasticizer was utilized for increasing the workability. Mixtures were cast into the molds and concrete was compacted by means of vibration table. The specimens were demolded after 24 hours

and then water cured at 20 ± 2 °C for 28 days. Then, the specimens were air-cured in laboratory until 56 days age.

The compressive strength, elastic modulus, splitting tensile strength and flexural strength were determined to investigate mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete mixtures. Compressive and splitting tensile strength tests were performed according to the procedures prescribed in TS EN 12390-3 and TS EN 12390-6, respectively. Four-point bending tests were performed on beam specimens in accordance with ASTM C 1018 for investigation of energy absorption capacity.

Test results revealed that the effects of aspect ratio and volumetric ratio on the compressive strength and elasticity modulus of mixtures were not pronounced. However, as the fiber content increased, the compressive strength increased for high matrix strength ($w/c=0.32$) containing steel fibers in hybrid form. Use of steel fibers in hybrid form increased the compressive toughness of concretes. The splitting tensile strength and flexural strength of concrete increased with increase in matrix strength, fiber strength, and aspect ratio, and the increase in flexural strength was more pronounced. This increase can be attributed to the crack control and bridging of the steel fibers. As the fiber content increased, the splitting tensile and flexural strength values increased. This can be related to the crack control and bridging of the steel fibers. As the deformation capacity increased, first crack load increased and significant improvements in toughness were observed in load-deformation curves relating to the increase in matrix strength, fiber strength, aspect ratio and volumetric ratio. It was observed that there was an increase in equivalent flexural strengths relating to the serviceability limit state (SLS) and ultimate limit state (ULS). This increase could be related to the elusion of steel fibers relating to the adherence between fiber and matrix and increasing of the energy during rupture of fiber. For higher matrix strengths, the higher equivalent flexural strength for SLS and ULS can be related to the requirement of higher energy for rupture after reaching the tensile strengths because of more adherence, higher strain hardening after first crack load with elusion of fibers and rupture mechanism of steel fiber reinforced concretes and strain softening after threshold point is a typical behaviour of high performance cement based composite materials. For steel fibre-reinforced concrete mixtures, performance based designs related to the compressive strength and equivalent flexural strength according to the serviceability limit state and ultimate limit state and performance classes were investigated. Consequently, it was shown that ductile concretes having a certain compressive strength and energy absorption capacity could be obtained by performance based design.

Optimization was performed according to Reaction Surface Method Factorial Design Method by using a software named as Design-Expert 6.0.7. Matrix strength (water-cement ratio), fiber aspect ratio and volumetric ratio of fibers were termed as independent variables and they were taken as 'factors'. Splitting tensile strength, equivalent flexural strengths relating to the serviceability limit state and ultimate limit state and specific rupture energy were termed as dependent variables and they were taken as 'responses'. The optimum solutions were investigated by using multi-purpose optimization technique. The regression models predicting the splitting tensile strength and performance properties (equivalent flexural strength and specific rupture energy) according to the water-cement ratio, fiber aspect ratio and volumetric ratio were developed. As content of the steel fibers are increased mixtures, the mixture costs increased. Minimum purpose functions were selected in factors in the conditions of minimum cost and maximum performance. For reactions, maximum

purpose functions were selected and optimum economical mixture designs were obtained for steel fiber-reinforced concretes. Moreover, for each water-cement ratio and fiber aspect ratio, mixture solutions were obtained for optimizations. As a result of optimizations, same purpose solutions could be achieved by using less steel fibers when matrice strength and fiber aspect ratio increased.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Gevrek bir malzeme olan geleneksel betonlar çekme dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı ve çatlak sonrası yük taşıma kapasiteleri bakımından zayıf özelliklere sahiptir. Liflerin betona katılmasıyla betonların bu özelliklerinde belirgin iyileşmeler elde edilmiştir. Bu konuda yapılan ilk önemli çalışma 1963 yılında cam lifi kullanılarak üretilen betonların mekanik özelliklerinin araştırılmasıdır. Daha sonraki çalışmalar ise farklı lif tiplerinin kullanılmasıyla üretilen betonların özelliklerinin araştırılmasıyla devam etmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda beton içerisinde süresiz bir şekilde dağılı olarak bulunan liflerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımını arttırdığını ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde etmeyi mümkün kıldığı ortaya çıkmıştır [1,2]. Lifler kendi çekme dayanımlarına ulaşıncaya kadar beton matrisinde basınç ve çekme yüklerinden dolayı meydana gelecek olan çok sayıdaki kılcal çatlak oluşumunu önlemekte ve azaltmaktadır. Böylece kırılma birim uzaması liflere oranla az olan çimento hamurunda meydana gelebilecek kılcal çatlaklar önlenmektedir.

Betonun heterojen yapısı nedeniyle oluşacak farklı gerilme ve deformasyonları karşılayabilmek, matris fazını güçlendirmek ve çatlama potansiyelini azaltmak, sınırlamak ve dolayısıyla betonun dayanım ve dayanıklılık performansını arttırmak için beton karışımlarında son zamanlarda farklı türde lif malzemeleri kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan liflerden biri olan çelik lifler, beton içinde yüzey ve kenarlarda dahil olmak üzere homojen olarak dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında hidrasyon süreci malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olur. Her yöndeki çekme gerilmelerine çelik lifler karşı koyarak rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önlenmektedir [3].

Lifli betonlarda yük iki faz tarafından taşınmaktadır. Yükün, sürekli fazı meydana getiren matrizen süreksiz dağılı faz olarak adlandırılan ve çekme gerilmelerini karşılayan lif fazına aktarıldığı kabul edilmektedir. Bu yük transferi büyük ölçüde lif ile matris arasındaki aderansa bağlı olmaktadır. Liflerin süreksiz dağılı olmaları ve kuvvet doğrultusuna paralel bulunmamaları ise matris içerisindeki liflerin yük aktarmadaki etkinliklerini azaltmaktadır [4,5].

Geleneksel çelik lif donatılı betonlar (ÇLDB) çimento esaslı kompozit malzemeler olup rasgele yönlü ve üniform dağılı kısa kesilmiş süreksiz çelik liflerden oluşmaktadır. ÇLDB'lerin performansına esas olarak çelik lif tipi, içeriği, narınlığı, çekme dayanımı, beton içindeki lif dağılımı ve matris özellikleri etki etmektedir. Az miktarda çelik lifin betona katılmasıyla yüksek dayanımlı betonlarda görülen gevreklik sorunu en aza indirilebilmektedir. Çelik lifin gevrek matrise eklenmesiyle malzemenin tokluğu, kırılma enerjisi, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, çatlama karşı direnç, beklenmedik şok yüklemelere karşı direnç ve süneklik gibi mekanik ve kırılma özelliklerinde büyük artışlar sağlanmaktadır [6].

Kullanılan en yaygın inşaat malzemesi olan beton, yüksek dayanım, yüksek tokluk ve dürabilite ile birlikte yeterli işlenebilirlik gibi özelliklerle yüksek performansa doğru gelişmektedir. Sertleşmiş betonda çimento, agrega, boşluklar ve farklı boyutlardaki mikro çatlaklar tek lifin iyileştirme etkisini sınırlandırmaktadır. Farklı boyut ve tiplerde karma lifler, farklı boyutlardaki çatlakları önleyerek/geciktirerek yüksek performans özelliklerine ulaşılmasında önemli roller oynayabilir [7]. Karma lifli betonlar, betonda tek tip ve boyutta lif kullanımı yerine birden fazla tip ve boyutta lif kullanılarak üretilen yeni çimento esaslı kompozit malzeme olarak tanımlanabilir [8]. Karma kompozit, diğer bir lifin mevcut özelliklerini daha etkili kullanılabilen bir lifin varlığı nedeniyle dikkat çekici mühendislik özellikleri sunabilir [9].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, lif donatılı betonlarda iki farklı lifin karma olarak kullanılması ile beton özelliklerinde daha fazla iyileşmeler elde edilmiştir. Kısa lifler betonda kullanılan lif sayısını arttırdığı için genellikle çatlakları azaltmak ve dürabiliteyi arttırmak amacıyla eklenmektedir. Mekanik özelliklerin geliştirilmesi amaçlandığında uzun lifler kullanılmaktadır. Liflerin karma olarak eklenmesi,

betonda sinerji etkisi oluşturmakta ve tek lif kullanımı ile elde edilen iyileşme, liflerin karma olarak daha az oranda kullanılması ile elde edilebilmektedir [10].

Karma lifli beton üretiminde amaç; yük altında, farklı yük aşamalarında ve kür yaşlarında betonun farklı bölgelerinde veya ara yüzey bölgelerinde farklı boyutlarda oluşan çatlakların mikro düzeyden başlayarak kontrol edilebilmesidir. Bu amaç doğrultusunda mikro, mezo ve makro düzeydeki çatlakların kontrolü için yine mikro, mezo ve makro düzeyde lifler kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı makro lifler (çelik), büyük çatlakları, zayıf mikro lifler (polipropilen v.b.) ise mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol etmektedir [8].

Günümüz beton teknolojisinde dayanıklılık en az dayanım kadar önem kazanmaktadır. Betonlar tasarlanan hizmet süreleri boyunca çeşitli fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkiler karşısında betonun hizmet süresi içerisinde göstereceği performans, beton dayanıklılığını belirlemektedir. Yapının temel bir malzemesi olan betonun uzun yıllar özelliklerini kaybetmeden, istenmeyen çatlamalara maruz kalmadan yapım amacına uygun olarak hizmete devam etmesi gerekir. Bunu sağlamak içinde betonun hizmet verdiği koşullarda maruz kalacağı mekanik ve çevresel etkilere göre tasarımının yapılması gerekmektedir. Betonun kullanımı, basınç dayanımına nazaran çok düşük çekme dayanımına sahip olması nedeniyle sınırlandırılır. Betonun bu yetersiz dayanımı, genellikle çekme gerilmesini taşımak için betona yerleştirilen çelik çubuklarla veya öngermeli elemanların kullanılması ile giderilmeye çalışılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda betonun sünekliğini ve eğilmede çekme dayanımını iyileştirmek genellikle farklı tiplerde çelik liflerin kullanıldığı ve çelik liflerin betonun özellikle gevrek olan davranışını iyileştirip daha sünek bir yapı kazanmasında daha etkili olduğu görülmektedir [11,12].

Beton teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan yüksek performanslı betonların üretimi ve özelliklerinin geliştirilmesi ile ilgili konularda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu betonlar, artan yüksek dayanımla birlikte üstün dürabiliteye sahiptir. Yüksek dayanıma sahip betonun tek eksenli basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrisi tepe noktasına kadar hemen hemen lineerdir. Bu betonlarda eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktası geçildikten sonra gerilme azalması ani olmakta ve daha gevrek kırılmaktadır. Elastisite modülündeki bağlı

artışın basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olduğu da bilinmektedir. Yüksek dayanımlı/yüksek performanslı betonlar için en yüksek gerilmeye kadar yutulan bağıl enerji daha düşük dayanımlı betonlara göre bağıl olarak düşük, buna karşın en büyük gerilmedeki şekil değiştirme daha yüksektir [13]. Yüksek dayanımlı betonların en önemli üç sakıncası; otojen rötre, yangına karşı düşük direnç ve kırılma sırasında gevrek davranış sergilemeleridir. Günümüzde yukarıdaki sorunlar betonların maruz kalacağı çevresel etkilere göre tasarlanarak aşılabilmekte, istenen performans özellikleri bu betonlara kazandırılarak beklenen optimum çözümler elde edilmektedir. Betonların sünekliğini arttırmak için kullanılacak çelik lif içeriğinin, narinliğinin ve dayanımının betonun performansı üzerinde önemli etkilerinin olduğunu bilmek ve performansa dayalı tasarımları gerçekleştirmek gerekmektedir [14].

Lif içermeyen (yalın) betonların günümüz beton teknolojisinde çevresel etki sınıfları ve dürabiliteye göre tasarımı iki önemli faktör olan su/çimento oranı ve çimento içeriğinin sınırlanması ile sağlanabilmektedir [15]. Çelik liflerin de betonların süneklik, eğilme dayanımı gibi özelliklerini iyileştirmesinde üç önemli etken olan çelik lif dayanımı, narinliği ve hacim yüzdesine bağıl olarak performansa dayalı tasarımın yapılması betonun farklı inşaat yapılarında kullanım alanlarının artmasını sağlayacaktır. Betondaki matris fazının çevresel etki sınıfları ve dürabiliteye göre tasarımı ile ilgili sınırlamalarla birlikte çelik liflerin de beton içerisinde istenilen performansa dayalı tasarımı ve optimizasyonu ile beton yapıların yük taşıma kapasitesi ile birlikte performansa dayalı projelerinin geliştirilmesine imkan sağlaması beklenmektedir. Avrupa da özellikle Almanya'nın öncülüğünde çelik lif donatılı betonların performansa göre tasarımı ile ilgili önemli gelişmeler sağlanmıştır. Özellikle Almanya, Avusturya ve İsviçre'de ÇLDB'lerin performansa dayalı tasarıma göre performans sınıflarının belirlenmesine yönelik çalışmalar halen devam etmektedir.

Betonun çelik liflerle donatılmasından elde edilen esas fayda yapının servis ömrünün uzamasına neden olmasıdır. Çelik lifler betonun mekanik özelliklerini ve sünekliğini belirgin bir şekilde arttırmasının yanında karışım maliyetini de arttırmaktadır. Bu nedenle çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılarak en yüksek mekanik ve performans özellikleri ile birlikte karışım maliyetinin en düşük olduğu optimum tasarımların belirlenmesinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, çelik lif donatılı betonların performansa dayalı tasarımı ile performans sınıflarının belirlenmesi amacıyla farklı matris dayanımındaki (su/çimento oranında) karışımlarda, farklı narinlikte ve hacim oranlarında normal ve yüksek dayanımlı çelik lifler kullanılmıştır. Üretilen ÇLDB'lerin mekanik ve performans (süneklik) özelliklerini belirlemek için basınç, elastisite modülü, yarmada çekme ve kiriş eğilme deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre tekli ve karma ÇLDB'lerin bazı mekanik ve performans özelliklerinin S/Ç oranı, lif narinliği (L/d) ve lif hacim oranı ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri verilmiştir. Farklı yöntemlere göre tekli ve karma ÇLDB'lerin performans parametreleri elde edilmiştir. Almanya Beton Birliği Yöntemi esas alınarak eşdeğer eğilme çekme dayanımına göre tekli ve karma ÇLDB'lerin performansa dayalı tasarımı ve performans sınıfları belirlenmiştir.

ÇLDB'lerin optimizasyonu, Design-Expert 6.0.7 programı kullanılarak en yüksek mekanik ve performans özelliklerini sağlayan en düşük lif narinliği ve hacim oranı amaç koşullarında Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY) Faktöriyel Tasarım Metodu'na göre yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda mekanik ve performans özelliği en yüksek ve daha ekonomik olan ÇLDB karışım tasarımları belirlenmiştir. Ayrıca aynı optimizasyon koşullarında her bir S/Ç oranı ve lif narinliğine göre optimum karışımlar elde edilmiştir. Bu çalışma ile esas olarak ÇLDB'lerin performansa dayalı tasarım ile performans sınıflarının elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu çalışmanın, ÇLDB'lerin yapısal tasarım ve uygulamalarda kullanılmasına yönelik yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1.2 Tez Çalışmasının Amacı

Tez çalışmasının amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Çelik liflerin tekli ve karma olarak kullanılmasının, ÇLDB'nin basınç, elastisite modülü, yarma çekme ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerine ve şekil değiştirme kapasitesi, tokluk gibi performans özelliklerine etkisini belirlemek,
- Tekli ve karma ÇLDB'lerin dört noktalı kiriş eğilme deneyi yöntemi ile kırılma parametrelerini saptamak ve farklı tip çelik liflerin betonun yük-sehim davranışına etkilerini ortaya koymak,

- Tekli ve karma ÇLDB'lerin dört noktalı kiriş eğilme deneyi ile belirlenen yük-sehim eğrileri kullanılarak farklı yöntemlere göre performans (eşdeğer eğilme çekme dayanımı, kalıcı dayanım faktörü, tokluk) parametrelerini belirlemek,
- Farklı yöntemlere göre belirlenen performans parametreleri kullanılarak tekli ve karma ÇLDB'ler için performans dayalı karışım tasarımlarını belirlemek,
- Tekli ve karma ÇLDB'lerin farklı yöntemlere göre belirlenen performans parametreleri (KSD ve TSD'ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımı ve kalıcı dayanım faktörü) ve kullanılarak performans sınıflarını belirlemek,
- Matris dayanımı (S/Ç oranı), lif narinliği ve hacim oranının tekli ve karma çelik lif donatılı betonların mekanik ve performans özelliklerine etkisini ifade eden grafiksel ilişkiler ve regresyon modelleri vermek.
- Bilgisayar destekli optimizasyon teknikleri kullanılarak;
 - a) Yarma çekme dayanımı, özgül kırılma enerjisi ve eşdeğer eğilme dayanımları gibi mekanik ve performans özelliklerinin en büyük,
 - b) Karışım maliyeti, çelik lif narinliği ve hacim oranının en küçük

olduğu koşullarda tekli ve karma ÇLDB'ler için optimum karışım tasarımlarını belirlemektir.

2. ÇELİK LİF DONATILI BETONLAR (ÇLDB)

2.1 Giriş

Geçmişte insanlar üretmiş oldukları malzemelerde ve uygulamalarda günümüzde lif olarak tanımlanan malzemeler kullanmışlardır. Eski Mısır'daki insanların saman, at saçı gibi malzemeleri güneşte pişirilmiş tuğlaların üretiminde, tavan sıvalarında ve bunun gibi bir çok uygulamada kullanmış oldukları bilinmektedir [16]. Doğal liflerin çok eski uygulamalarından ilham alınarak yapay liflerin günümüzdeki betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için yaygın bir şekilde kullanıldığı bilinmektedir. Özellikle betonda kullanılan cam, sentetik, karbon ve çelik lifler bir çok beton özelliklerinin iyileştirilmesinde iyi sonuçlar vermiştir [17].

Yapısal beton diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında en düşük maliyet/dayanım özelliğine sahip olduğundan dolayı hala en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Betonun zayıf olan bazı yapısal özelliklerini iyileştirmek amacıyla, portland çimentosu, kimyasal ve mineral katkılarla birlikte beton karışımına doğrudan giren bir diğer bileşen olarak çelik ve karbon lifler kullanılmaktadır [18].

Çelik lif donatılı beton (ÇLDB) ile ilgili çalışmalar sonucunda bu konuda ilk olarak 1874 yılında patent alınmıştır. Çelik lif donatılı betonlar, II. Dünya savaşında hava alanlarındaki bomba çukurlarının kapatılmasında ve uçak hangarlarının bombalardan korunmasında kullanılmıştır. Bununla birlikte betonda lif donatısı uygulamaları 1960'lı yıllardan sonra başlamıştır. Lifli betonlar ile ilgili 1970'li yıllardan önce karşılaşılmış en önemli problem, karışıma lif katılmasıyla betonun işlenebilirliğinin zayıflaması ve karıştırmanın zorlaşmasıdır. Bu problemler 1970'li yıllarda süper akışkanlaştırıcıların bulunması ile aşılmıştır. Kimyasal katkı teknolojisindeki gelişmeler, lif donatılı beton için yeni araştırmaların önünü açmıştır. Çelik lif donatılı betonların ticari amaçlı kullanımı 1970'li yıllardan sonra özellikle Avrupa, Japonya

ve ABD’de büyük bir hızla artmıştır [19]. Günümüzde halen tasarım ve hesap yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Lifli kompozit malzemenin çatlak sonrası kabiliyeti nedeniyle lif donatılı beton araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Aziznamini ve diğerleri [20] tarafından yüksek dayanımlı betonlarda (YDB) görülen bağ kopma kırılmalarının, çaprazlama donatı mekanizmasının yardımıyla önenebileceği önerilmektedir. Bu nedenle, çaprazlama donatı mekanizması olarak lif donatılı betonun kullanımı, çatlak sonrası çekme dayanımındaki artış nedeniyle bağ performansına katkı sağlamaktadır [20]. Çatlak sonrası dayanım ve süneklik, lif sıyrılması sırasında artan enerji yutması ile sağlanmaktadır. Bu nedenle lif ve yüksek dayanımlı matris arasındaki aderans önemli oranda arttığında, liflerin erken kırılmasını önlemek amacıyla yüksek dayanımlı betonlarda yüksek çekme dayanımlı çelik liflere gereksinim duyulmaktadır [21].

Çelik lif donatılı beton; agrega, çimento ve su gibi temel beton bileşenlerine, mineral ve/veya kimyasal katkılara ilave olarak çelik lif katılması ile elde edilen bir kompozit malzeme olarak tanımlanabilir. Çelik lifler, yalın betonun ve betonarme elemanın özellikle süneklik performansını iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır [22]. Bununla birlikte çelik lifin betona katılmasındaki amaç, çatlak kontrolünü sağlamak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymaktır.

Beton içerisinde süresiz bir şekilde dağılı olarak bulunan çelik liflerin, betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azaltması, şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımlarını arttırması nedeniyle büyük enerji yutma kapasitesine sahip yüksek dayanımlı betonların elde edilmesinde önemli bir yere sahiptir [23,24].

ÇLDB’lerde beton özelliklerini etkileyen en önemli faktörler, lif narinliği (lif uzunluğu/lif çapı, L/d) ve hacim oranıdır. Lif narinliği (L/d), beton üretiminin karışım ve yerleştirme aşamalarını etkilemektedir. Genel olarak betonda, narinliği 50-100 arasında değişen çelik lifler kullanılmaktadır. Lif narinliğinin artmasıyla, betonda liflerin heterojen dağılıma ve topaklanma olasılığı artmaktadır. Aynı zamanda lif hacmi betonun işlenebilirliğini önemli oranda etkilemektedir. Lifli karışımlar için en uygun lif hacim oranı %0,5-%2,5 arasındadır [25].

Çelik lifler betonun mekanik özelliklerini belirgin bir biçimde arttırmasıyla birlikte maliyetini de arttırmaktadır. Çelik lifin kullanılmasıyla artan maliyet, geleneksel hasır donatının montajı ve yerleştirilmesi için gereken maliyetten sağlanan kazanç ile dengelenebilir. Bunun yanında çelik lif kullanılması ile yapı elemanının boyutlarındaki azalma nedeniyle tasarruf sağlanabilmektedir. Ayrıca hasır donatısının montajı ve işçilik ile ilgili hatalarda ortadan kalkacak ve işçilik kolaylaşacaktır. Beton karışımının optimum tasarımı yapılarak mekanik özelliklerle birlikte maliyeti de kontrol etmek mümkündür. Betonun çelik liflerle donatılmasından elde edilen esas kazanç, yapının uzun süreli hizmet ömrüdür [19].

2.2 Çelik Lif Donatılı Beton Türleri

Çelik lif donatılı betonların, farklı karışım ve yerleştirme özelliklerine, gösterdikleri dayanım performansına göre bazı türleri aşağıda sıralanmaktadır:

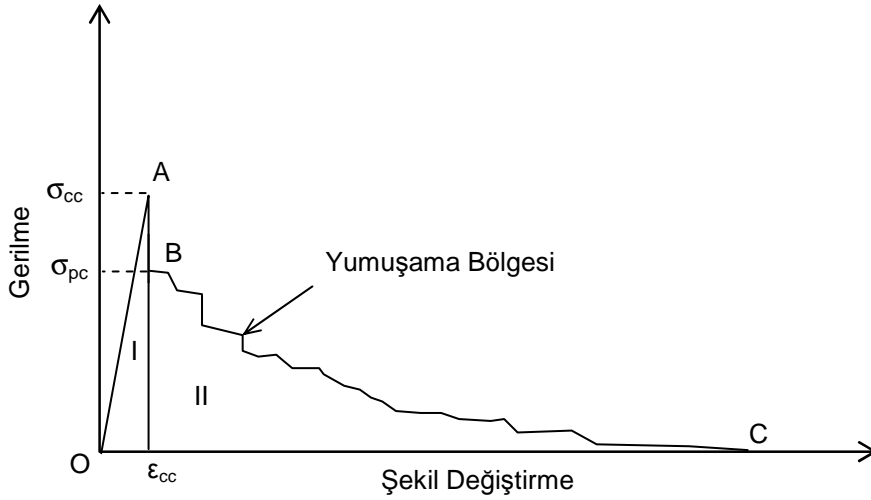
- a) Geleneksel lif donatılı beton (LDB)
- b) Karma lif donatılı betonlar (KLDB)
- b) Yüksek performanslı lif donatılı beton (YPLDB) [15].

2.2.1 Geleneksel çelik lif donatılı betonlar

Geleneksel çelik lif donatılı beton, geleneksel beton karışımına kısa süreksiz çelik lifler eklenerek üretilmektedir. Geleneksel çelik lif donatılı betonun kullanımı en büyük lif uzunluğu, hacim oranı ve geometrisi, işlenebilirlik gereksinimleri nedeniyle sınırlandırılmaktadır. Lif hacim oranı için tipik üst limit %2-%3 arasındadır [15]. Bununla birlikte %2'den daha az oranda lif kullanılması genellikle çatlak sonrası sünekliğe ve enerji yutma kapasitesine katkı sağlamaktadır. En büyük dayanım ve çekme şekil değiştirme kapasitesi gibi diğer özelliklerdeki iyileşmeler önemli düzeyde değildir.

Diğer bir ifadeyle geleneksel çelik lif donatılı beton, çekme çatlaklarının oluşumu ve gelişimini geciktirerek dayanım (eğilme, kesme veya basınç) ve sünekliği arttıran tipik olarak %2'den daha az hacim oranında kısa, süreksiz çelik liflerden oluşmaktadır [26].

Geleneksel lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışında ilk çatlak gerilmesi ve çatlak sonrası en büyük gerilme olmak üzere iki dikkat çekici özeliği vardır. Kompozitin çatlama dayanımı matris dayanımı ile etkilenirken çatlak sonrası dayanım lif donatısının ve lif-matris arayüzeyinin özelliklerine bağlıdır. İlk çatlak ve çatlak sonrası dayanım artışı gösteren geleneksel lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik gerilme şekil değiştirme davranışı Şekil 2.1’de verilmektedir. Geleneksel lif donatılı çimentolu kompozitin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı iki bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölge, ilk çatlak gerilmesine (A noktası) kadar olan lineer elastik bölgedir ($OA\epsilon_{cc}$ bölgesi). İkinci bölge (BC bölgesi), çatlak sonrası en büyük gerilmeden sonra şekil değiştirme yumuşaması davranışının sergilendiği bölgedir.



Şekil 2.1 : Geleneksel lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı [14].

Çelik liflerin betona belirli bir oranda eklenmesi ile elde edilen yeni betonun çekme dayanımının yanında bir çok mühendislik özelliklerinde de iyileşmeler gözlenmiştir. Çelik lifler, basınç ve çekme etkisi altında, liflerin çekme dayanımı kullanılmadan önce beton matrisinde çok sayıda kılcal çatlakların meydana gelmesini önlemektedir. ÇLDB'ler taşıma gücüne ulaştığı halde yük taşıma özeliğinden dolayı basınç tokluğu gösterirler [27].

Geleneksel çelik lif donatılı betonlar ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, genellikle betonda farklı narinlikte ve hacim oranında uçları kancalı, dalgalı ve düz çelik liflerin kullanılmış olduğu görülmektedir.

2.2.2 Karma elik lif donatılı betonlar

Karma lifli betonlar, betonda tek tip ve boyutta lif kullanımı yerine birden fazla tip ve boyutta lif kullanılarak üretilen yeni imento esaslı kompozit malzeme olarak tanımlanabilir [8]. Liflerin farklı tipleri, kompozit performansını iyileştirmek ve özel uygulamalar kazandırmak için bir kompozite karma lif formunda eklenmektedir. Karma lif formu, aynı veya farklı tür ve geometride liflerin betonda birlikte kullanılmasından oluşmaktadır.

Kullanılan en yaygın inşaat malzemesi olan beton, yüksek dayanım, yüksek tokluk ve dürabilite ile birlikte iyi işlenebilirlik gibi zeliklerle yüksek performansa doğru gelişmektedir. Sertleşmiş betonda imento, agrega, boşluklar ve farklı boyutlardaki mikro çatlaklar tek lifin iyileştirme etkisini sınırlandırmaktadır. Farklı boyut ve tiplerde karma lifler, farklı boyutlardaki çatlaklara direnerek yüksek performans özeliklerine ulaşılmasında önemli roller oynayabilir [7].

Son yıllarda yapılan çalışmalar, lif donatılı betonlarda iki farklı lifin karma kullanılması ile beton özeliklerinin daha iyi hale getirilebilmesinin mümkün olabileceğini göstermiştir. Kısa lifler betonda kullanılan lif sayısını arttırdığı için genellikle çatlakları azaltmak ve drabiliteyi arttırmak amacıyla eklenmektedir. Daha çok mekanik özeliklerin geliştirilmesi amaçlandığında uzun lifler kullanılmaktadır. Liflerin karma olarak kullanılması betonda sinerji etkisi oluşturmakta ve tek lif kullanımı ile elde edilen etki, daha az oranda lifin karma olarak kullanılması ile elde edilebilmektedir [10].

Son zamanlarda, belirli bir imento matrisinde, iki farklı lif ile karma oluşturma kabul kullanılmaktadır. Karma kompozit, diğer bir lifin mevcut özeliklerini daha etkili kullanılabilen bir lifin varlığı nedeniyle daha çekici mühendislik özelikleri sunabilir [9].

Karma lifli beton üretiminde amaç, farklı kr yaşlarında ve yk aşamalarında betonun farklı bölgelerinde veya ara yüzey bölgelerinde farklı boyutlarda oluşan çatlakların mikro düzeyden başlayarak kontrol edilebilmesidir. Bu amaç doğrultusunda mikro, mezo ve makro düzeydeki çatlakların kontrolü için yine mikro, mezo ve makro düzeyde lifler kullanılmaktadır. Mikro atlak; uzunluğu bir numune veya yapının boyutlarına göre küçük olan çatlak, makro çatlak ise uzunluğu bir

numune veya yapının boyutlarına göre fazla küçük olmayan çatlaktır [8]. Yüksek dayanımlı makro lifler (çelik) büyük çatlakları, zayıf mikro lifler (polipropilen v.b.) ise mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol etmektedir. Mikro ve makro liflerin kullanılmasının betonda meydana getirdiği iyileşmeler şunlardır.

Mikro lifler;

- Boyutları nedeniyle matris içinde daha sık bir lif dağılımı oluşturur.
- Çatlakları makro düzeye gelmeden durdururlar.
- Elastik bölgedeki davranışı iyileştirirler.

Makro lifler;

- Elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını arttırırlar.
- Makro düzeydeki çatlakları kontrol ederler.
- Maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirirler [28].

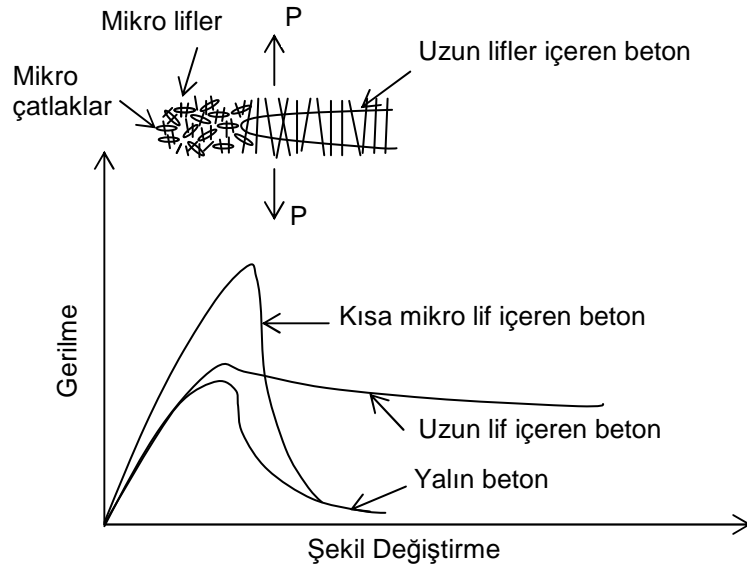
Banthia ve diğ., [29] 200 cm²/gr yüzey alanına göre makro ve mikro liflerin sınıflandırılmasını önermişlerdir. Geleneksel makro lifler, 25-60 mm uzunluğa ve 0,3-3 mm çapa sahiptir. Tipik olarak mikro lifler, 20 mm'den daha kısa ve 25 µm veya daha az bir çapa sahiptir. Genellikle kısa makro lifler karıştırma ve püskürtme için daha elverişlidir. Lifler, mikro lif olarak tanımlanmış olandan küçük olduğunda yüzey alanındaki önemli artış, taze betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Özellikle yüksek hacim oranlarında mikro liflerin eklenmesi, kıvam (işlenebilirlik) özelliklerini azaltarak porozitede artışa neden olması sonucu dayanım ve toklukta azalmalar meydana gelmektedir [29].

Makro ve mikro liflerin karma birleşimleri, farklı tür ve boyutlarda makro liflerin birleşiminden daha fazla dayanımı iyileştirmektedir. Genellikle karma birleşimlerin ilk çatlak başlangıcına direnci daha büyüktür ve sadece bir lif tipi ile donatılmış betona göre tokluğu daha yüksektir. Lifler, basınç dayanımında sadece az bir artış sağlamaktadır [30].

Betonda liflerin kullanılması ile sınırlanmış büzülme (rötre) çatlama azalmakta ve önlenmektedir. Banthia ve diğerleri büzülme çatlama üzerinde makro ve mikro lif donatısının etkilerini karşılaştırmışlardır. Her iki lif tipinin, yalın harçta belirlenen çatlak genişliğine göre toplam çatlama genişliği azalttığını ve tekli yerine çoklu ve

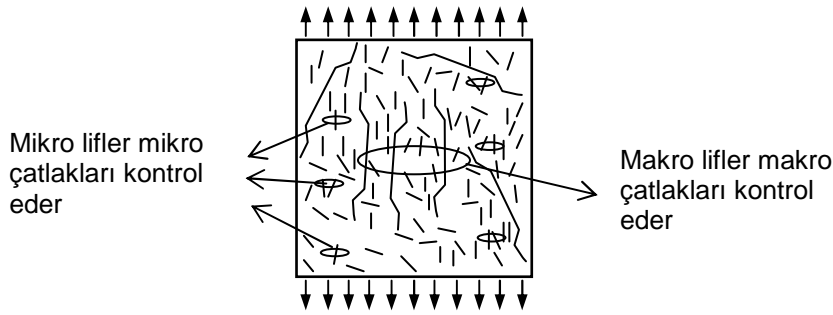
daha küçük çatlaklar meydana geldiğini belirtmişlerdir. Çoklu çatlamanın oluşması ve gelişmesi tek çatlağa göre daha fazla enerji gerektirmektedir [29].

Matristeki çatlaklar mikro düzeyde başlar. Büyük boyutlu lifler arasındaki mesafe fazla olduğu için bu lifler mikro çatlaklar için etkili olamazlar. Büyük boyutlu lifler ancak çatlaklar gelişip makro düzeye geldiği zaman etkili olur [28]. Mikro lifler ise çatlaklar mikro düzeyde iken arada köprü vazifesi görerek çatlakları durdururlar. Mikro lifler matrisin hemen hemen her bölgesine dağılabilecek kadar küçük oldukları için makro liflerin bulunmadığı ara bölgelerdeki küçük çatlakların başlamasını ve gelişimini kontrol edebilirler. Uzunluğu 10 mm ve çapı 80 µm'den küçük mikro lifler kullanılarak 100 µm'den küçük aralıkla bir lif dağılımı sağlanabileceği gösterilmiştir. Mikro lifler, mikro çatlakları kritik çatlak haline gelmeden durdururlar [31]. Mikro ve makro düzeydeki liflerin yine mikro ve makro düzeydeki çatlaklar arasında köprü oluşturması Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Şekil 2.2'dekine benzer biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler (kısa kesilmiş çelik lifler) harç fazını ve uzun çelik lifler ise betonu güçlendirmektedir. Bundan dolayı betonda kırılma enerjisinin artırılmasında uzun liflerin (çelik) narinliğinin de önemli katkısı vardır. Yüksek dayanımlı ve uzun lifler, büyük (uzun) çatlakları kontrol ederken, düşük dayanımlı ve kısa lifler çatlak başlangıcını ve küçük çatlakların ilerlemesini kontrol etmektedir.



Şekil 2.2 : Betonda çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi [28].

Homojen dağılmış mikro lifler, mikro çatlakların birleşimi yoluyla oluşan büyük çatlakların gelişimini engeller. Malzeme üzerindeki gerilmeyi boşaltmak için yeterince büyük bir makro çatlak oluşumunun meydana gelmesine izin verilmediği zaman malzemenin değişik kısımlarında diğer mikro çatlaklar birleştiğinde çoklu çatlaklar gelişir. Uzun süre devam eden ilk yük, kompozit dayanımında bir artışa neden olmaktadır. Kritik makro çatlak geliştiğinde geleneksel makro lifler, malzemede sünekliğin oluşmasında ve geniş çatlak köprülenmesinde daha çok etkilidir. Karma lifli betonların kırılma sürecinde mikro ve makro liflerin etkisi Şekil 2.3’de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : Kırılma sürecinde mikro ve makro liflerin etkisi [32].

İyi tasarlanmış karma kompozitlerde lifler arasında pozitif bir etkileşim vardır. Meydana gelen karma performans, her bir lif performansının toplamını geçer. Bu kavram, genellikle “sinerji” olarak tanımlanmaktadır. Pek çok lif kombinasyonu, aşağıda verilen en yaygın tanımlamalar ile sinerji sağlayabilir. Bunlar;

- a) Lif özelliklerine göre karmalarda, nisbeten esnek olan ikinci lif tipi çatlak sonrası bölgede tokluk ve şekil değiştirme kapasitesinde iyileşmeye neden olurken, daha rijit ve sert olan diğer lif tipi yeterli ilk çatlak dayanımı ve en büyük dayanımı verir.
- b) Lif boyutuna göre karmalarda, mikro çatlakların köprülenmesine neden olan daha küçük bir lif tipi mikro çatlak gelişimini kontrol eder ve çatlakların birleşimini geciktirir. Bu kompozitte daha yüksek bir çekme dayanımına neden olur. Daha büyük olan ikinci lif, makro çatlakların gelişmesini geciktirmektedir. Bu nedenle kompozitin kırılma tokluğunda önemli bir iyileşme meydana gelir. Liflerin kısa boyutu (genellikle mikro lif olarak tanımlanır) çimento hamuru ve harç fazında çatlak birleşimini geciktirir ve bu fazların çekme dayanımını artırır.

- c) Lif fonksiyonuna göre karmalarda, ikinci lif tipi mekanik özelliklerde iyileşmeye neden olurken diğer lif tipi üretim kolaylığı ve plastik rötre gibi taze ve erken yaş özelliklerini iyileştirmektedir. Düşük hacimli polipropilen lif ($V_f < \%2$) ile daha yüksek hacimli çelik lif birleştirildiği bazı karma karışımlar günümüzde ticari olarak elde edilebilmektedir [33].

Karma lif karışımlarında iki veya daha fazla farklı tip lifler, bireysel olarak liflerin her birinden faydalar üreten ve bir sinerjik etki gösteren kompozit üretmek için orantılı olarak katılmaktadır. Karma kompozitler genel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır.

- 1) Aynı veya farklı tür liflerin farklı boyutlarda beraber katıldığı boyutsal karma.
- 2) Benzer boyutlarda fakat farklı modüllerde liflerin beraber katılmasıdır. Örneğin, düşük modüllü polipropilen liflerle yüksek modüllü çelik veya karbon liflerin beraber kullanılmasıdır.

Yüksek modüllü lif yeterli bir şekilde matrise bağlanırsa istenilen iyileşme elde edilmektedir. Liflerin karma olarak kullanımında tipik olarak, harç fazını güçlendiren ve kırılmadan önce veya hemen sonra davranışı iyileştiren ince mikro liflerle, büyük çatlak açıklıklarında tokluğu sağlayan büyük makro lifleri birlikte katılmaktadır. Mikro lifler, makro liflerin sıyrılmaya direncine katkı sağlayarak yüksek dayanım ve tokluk elde edilmesini sağlamaktadır. Farklı uzunlardaki çelik liflerin karma olarak kullanılması daha çok çalışılmıştır. Fakat henüz tam olarak optimize edilmemiştir [34].

Karma lifler, çatlak ve büzülme direnci kabiliyetini etkili bir şekilde artırarak betonun geçirimsizliğini iyileştirmektedir. Farklı lifin üstünlüğü, yük taşıma sürelerinde ve beton matrisinin oluşması sırasında gözlenmektedir. Genellikle malzeme iç yapısının oluştuğu daha erken devrede çatlak başlama ve büzülme direnci için daha küçük lifler uygulanmaktadır. Lifler, çatlak kaynağının boyutlarını ve sayısını azaltarak, kuruma çatlaklarının başlamasını geciktirmekte, betonun geçirimsizliğini iyileştirmektedir. Boşluk yapısının iyileşmesi geçirimsizlik ve büzülme direncini etkileyen önemli bir faktördür. [35].

Karma lifli betonlara ait bazı uygulama alanları şunlardır:

- a) Hasarlı binaların güçlendirilmesinde,

- b) Kesiti küçük taşıyıcı elemanların yapımında,
- c) Zımbalamaya karşı kolon başlarının güçlendirilmesinde,
- d) Zararlı radyoaktif ve endüstriyel atıkların saklanması için çatlaksız ve dürabilitesi yüksek elemanların üretilmesinde,
- e) Sünek davranış gerektiren taşıyıcı yapı elemanlarının birleşim bölgelerinde,
- f) Prekast çatı kaplama elemanı yapımında,
- g) Çarpma ve aşınmaya karşı dayanım gerektiren bölgelerde [31].

En büyük sinerjiyi üreten lif kombinasyonlarının belirlenmesi için yapılan çalışmaların bazıları aşağıda verilmiştir.

Mekanik ve geçirgenlik özelliklerinin optimizasyonuna farklı lif tipi ve boyutlarının kombinasyonu ile ulaşılabilir. Bentur ve Mindess tarafından polipropilen ve çelik lifin karma olarak kullanılmasının dikkat çekici üstünlükleri şunlardır;

- Daha güçlü ve daha rijit lif tipi kullanıldığında ilk çatlak gerilmesi ve en büyük dayanım iyileşmektedir. Daha esnek ikinci lif tipi, çatlak sonrasındaki bölgede şekil değiştirme kapasitesi ve tokluğun iyileşmesine neden olur.
- Daha kısa bir lif tipi kullanılarak karma donatılardırma sağlandığında, gelişimleri kontrol edilmiş mikro çatlaklar bağlanır. Bu, kompozitte daha yüksek bir çekme dayanımına neden olur. Lifin ikinci tipi daha uzun olduğunda büyük çatlakların ilerlemesini durdurabilir ve kompozitin tokluğu önemli derecede iyileşebilir [36].

Kim ve diğ., [30] 30 mm uzunluğunda çelik liflerin, 12 mm ve 6 mm uzunluğunda çelik ve polipropilen liflerle birleştirilen karma lif donatılı betonun termal çatlama direncini araştırmışlardır. Mikro lifler (12 mm'den daha kısa) mikro çatlakları önleme kabiliyeti nedeniyle ilk çatlama karşı betonun direncinde artış sağladığını ve makro liflerin (12 mm'den daha uzun) toklukta iyileşmeye neden olduğunu belirtmişlerdir.

Rossi [37], liflerin iki farklı düzeyde çalıştığını ileri sürmektedir. Malzeme düzeyinde küçük çaplı liflerin büyük hacimleri (işlenebilirliği etkilemeyecek kadar yeterince kısa) betonun dayanım ve sünekliğini iyileştirdiğini ve yapısal düzeyde uzun liflerin ise daha küçük bir hacimde (uzun çatlaklar arası kuvvetleri aktarmak için yeterince uzun) yapının yük taşıma kapasitesi ve sünekliğini arttırdığını belirtmiştir. Rossi, bir ultra yüksek dayanımlı harç matriste 0,3 mm çapında ve 25

mm uzunluğunda %2 hacim oranında kancalı çelik lifler ile 0,25 mm çapında ve 5 mm uzunluğunda %5 hacim oranında düz çelik liflerin karma bileşimini deneye tabi tutmuştur. Deneyler sonucunda karma kompozitin, 0,4 mm bir çatlak ağzı açıklığı ile 40 MPa eğilme dayanımına ve 15 MPa çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir [37].

Mobasher ve Li [31], yerinde döküm harçta sırasıyla 1 mm ve 0,76 mm uzunluğunda karbon ve alüminyum liflerin etkisini araştırmıştır. Bu liflerin kompozitin çekme dayanımında önemli bir artış sağlarken makro çatlakları köprülemek için çok kısa olduğundan süneklikte önemli bir artış olmadığı belirtilmiştir. Sünekliği iyileştirmek için 12 mm uzunluğunda polipropilen lifler ilave edilmiştir. Herbiri %4 karbon ve polipropilen lifli ve %4 alüminyum ve polipropilen lifli karma kompozitler test edilmiştir. Her iki karma karışımda, eğilme dayanımı ve tokluğun arttığı belirlenmiştir [31].

Soroushian ve diğ., [38] çimento hamurunda 6 mm ve 13 mm yüksek modüllü polietilen lifleri karma olarak kullanmışlardır. Kompozitin çarpma direnci, eğilme dayanımı, tokluk, basınç dayanımı, hacimsel özgül ağırlık, permeabilite ve su emme kapasitesini araştırmışlardır. Kompozitin çarpma dayanımının artışında her bir lif tipinin etkinliği, diğer tip lifin kullanılması ile arttığı belirtilmiştir. Karma kompozitin eğilme performansının iyileşmesinde optimum bir lif miktarının olduğu ifade edilmiştir [38].

Yao ve diğ., [9] aynı düşük lif hacim oranında (%0,5) üç farklı tipde tekli ve ikili karma lif içeren betonlar üzerinde basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Üç tip karma lifli kompozitler; karbon, polipropilen, karbon-çelik ve çelik-polipropilen lif kombinasyonları kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçlarında, liflerin karma bir formda kullanılmasının, liflerin tek olarak katıldığı betonlara göre daha üstün kompozit performansı elde edilmiştir. Üç karma tip arasında, karbon-çelik kombinasyonunda, katılan iki lifin sinerjik etkileşim ve yüksek modülleri nedeniyle en yüksek dayanım ve eğilme tokluğunun elde edildiği belirtilmiştir. Deney sonuçlarına göre, çelik lif eklenmesinin esas üstünlüğü yüksek eğilme tokluğu ve eğilme dayanımı sonuçları, karbon lif eklenmesinin ise yüksek basınç ve yarmada çekme dayanımı olduğu bulunmuştur. Karbon-çelik karışımı kompozitte, yalın betona göre basınç dayanımında %31, yarma çekme dayanımında

%36, eğilme dayanımında %32 ve tokluk indislerinde %40-%200 arasında iyileşme elde edilmiştir [9].

Bannthia ve Sappakittipakorn [33] tarafından sabit işlenebilirlikte, büyük ve küçük çaplı dalgalı tip liflerin karma olarak kullanılmasının betonun tokluğuna olan etkisini araştırmak için bir deneysel program gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda liflerin karma olarak kullanılmasının beton için umut verici olduğu ve büyük çaplı dalgalı liflerin daha küçük çaplı dalgalı liflerin bir kısmı ile yer değiştirilmesinin tokluğu önemli oranda arttırdığı belirtilmiştir [33].

Qian ve Stroeven [5], mekanik özelliklere bağlı olarak, düşük lif oranlı karma polipropilen-çelik lifli betonlarda en uygun lif boyutu ve uçucu kül oranını araştırmışlardır. Üç farklı boyuttaki çelik lifler, polipropilen lifle belirli oranlarda karıştırılarak tekli ve karma lifli betonlar üretilmiştir. Çelik lifler %0,15 ve %0,30, polipropilen lif %0,2 ve %0,4 hacim oranlarında kullanılmıştır. Araştırma sonuçlarında, lifleri homojen olarak dağıtmak için uçucu kül gibi belirli orandaki bir ince malzemenin gerekli olduğu ifade edilmiştir. Homojen olarak dağılmış farklı tip ve boyutlarda liflerden oluşan karma lifli betonda meydana gelen sinerji etkisinin, daha yüksek toplam lif oranına sahip tek lifli betonda sağlanan iyileşmelere benzer önemli iyileşmelere neden olduğu bulunmuştur. Kısa lif tipi eklenmesi basınç dayanımında önemli bir etkiye sahip olurken yarmada çekme dayanımını sadece hafif bir şekilde etkilediği belirtilmiştir [5].

Qian ve Stroeven [39], üç farklı boyutta çelik lif (ÇL1: kancalı, 0,3 mm çaplı ve 40 mm uzunlukta, ÇL2: kancalı, 0,3 mm çaplı ve 30 mm uzunlukta, ÇL3: düz, 0,1 mm'den daha az çaplı ve 6 mm uzunlukta) ve polipropilen (monofilement, 18 µm çaplı ve 12 mm uzunlukta) lif kullanılarak üretilen tekli ve karma lifli betonların kırılma özelliklerini araştırmışlardır. Toplam lif oranı, beton hacminin %0-0,35 arasında değişmiştir. Çatlak durdurulması üzerinde karma liflerin etkilerini araştırmak için 100x100x500mm boyutunda çentikli prizmalar üzerinde 4 noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, küçük şekil değiştirme aralığında yük taşıma kapasitesi ve kırılma tokluğu üzerinde uzun çelik lifler ve polipropilen lifler arasında pozitif bir sinerji etkisinin var olduğunu belirtmişlerdir. Büyük şekil değiştirme aralığında, enerji yutma kapasitesi bakımından uzun çelik

lifler, polipropilen ve kısa çelik life göre daha etkili olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre:

- Küçük şekil değiştirmede karma lifli betonun yük taşıma kapasitesini uzun çelik lif (ÇL1) ve polipropilen lif önemli derecede etkilemiştir. Çelik lifin etkisi polipropilen life göre belirgin bir şekilde daha fazla olduğu bulunmuştur. Kısa düz çelik liflerin (ÇL3) de belirli bir etkisinin olduğu ortaya çıkmıştır.
- Küçük şekil değiştirme aralığında yük taşıma kapasitesi ve kırılma tokluğu üzerinde çelik lif (ÇL1) ve polipropilen lif kombinasyonunun pozitif bir sinerji etkisinin olduğu bulunmuştur. Fakat bu sinerji etkisi, büyük şekil değiştirme aralığında görülmediği belirtilmiştir.
- Küçük şekil değiştirme durumunda polipropilen lifin etkisi, liflerinin ayrılmasından dolayı toplam lif oranının artışıyla birlikte azalmıştır.
- ÇL1, ÇL2 ve ÇL3 üç çelik lif arasında ÇL1 en iyisi sonuçlar vermiştir. Bunun nedeni ÇL1'in, düz ÇL3'e göre kancalı olmasına bağlanmıştır. ÇL1, ÇL2 ile karşılaştırıldığında ise boy/çap oranı daha yüksektir [39].

Sun ve diğ., [7] yaptıkları çalışmada yüksek performanslı betonda farklı uzunlukta çelik, polivinilalkol (PVA) ve polipropilen (PP) lif ile genişletici katkı kullanmışlardır. Üç farklı boyutta çelik lif (5, 10, 25 mm), PVA lif (8 mm) ve polipropilen lif (10 mm) kullanılarak tekli, ikili ve üçlü karma lifli betonlar üretilmiştir. Lifler, toplam lif hacmi %1, %1,5 ve %2 olmak üzere üç farklı hacim oranında eklenmiştir. Büzülme ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde karma liflerin ve/veya genişletici katkının etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçlarında, farklı tip ve boyutlarda karma liflerin, farklı ölçülerdeki çatlak kaynağının boyutu ve sayısını azalttığı belirtilmiştir. Genişletici katkıyla birleştirilen karma liflerin, yüksek performanslı betonun büzülme direnci ve geçirimsizliğini, genişletici katkı veya liflerin tek olarak kullanılmasına göre daha fazla artırdığı ifade edilmiştir. Betonun büzülme direnci ve geçirimsizliğinde meydana gelen iyileşmenin, karma lif oranı, toplam lif hacim oranı, lif tipi ve boyutu, genişletici katkı miktarına bağlı olduğu belirtilmiştir. Deney sonuçlarına göre;

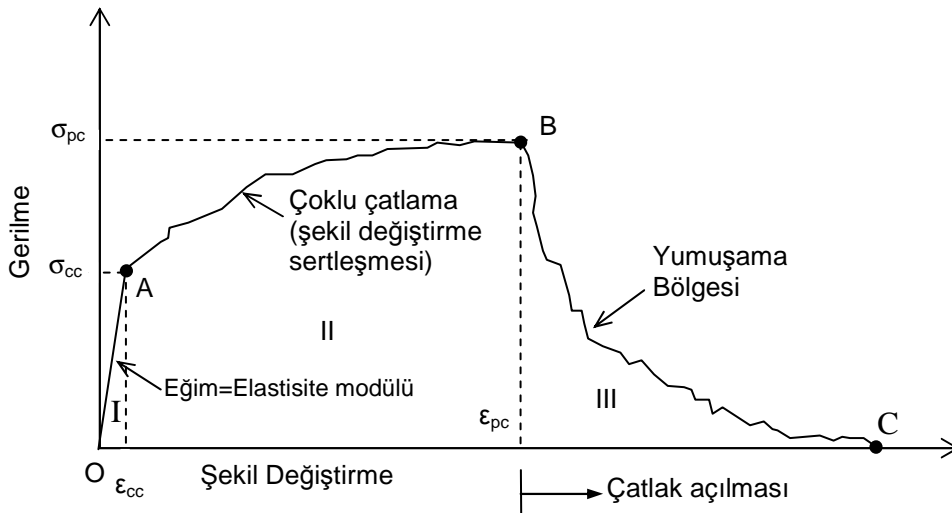
- Farklı tip ve boyutlarda karma lifli betonda, lifler çatlağın başlamasını ve ilerlemesini engellemiş, çatlak kaynağının boyut ve sayısını azaltmıştır. Bu nedenle beton matrisin boşluk yapısı iyileşmiştir. Ayrıca farklı tip ve boyutlarda

karma lif donatı betonun performansı, sadece karma çelik lif ve tek tip ve boyuttaki diğer liflerden oluşan betona göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

- Yeterli oranda genişletirici katkı katılması, betondaki büzülme azaltmış ve beton matrisini özellikle erken hidratasyon dönemlerinde iyileştirmiştir. Böylece, agrega ve liflerin büzülme direnci daha erken iş görmeye başlamıştır.

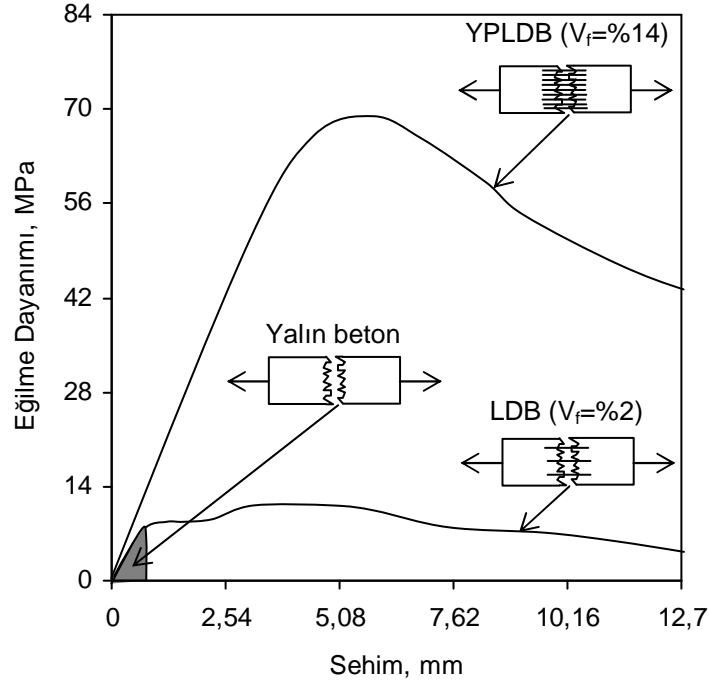
2.2.3 Yüksek performanslı çelik lif donatılı betonlar (YPÇLDB)

Yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik gerilme şekil değiştirme davranışında ilk çatlak gerilmesi ve çatlak sonrası en büyük gerilme olmak üzere iki dikkat çekici özellik vardır. Kompozitin çatlama dayanımı matris dayanımı ile etkilenirken çatlak sonrası dayanım lif donatısının ve lif-matris arayüzeyinin özelliklerine bağlıdır. Çatlak ve çatlak sonrası dayanım artışı gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik çekme gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 2.4’de verilmektedir. Yüksek performanslı lif donatılı kompozitlerin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışında, Şekil 2.4’de görüldüğü gibi elastik bölge (OA arası), şekil değiştirme sertleşmesi bölgesi (AB arası) ve şekil değiştirme yumuşuması bölgesi (BC arası) olmak üzere üç tip davranış gözlenmektedir. Yüksek performanslı lif donatılı betonu geleneksel lif donatılı betondan ayıran özellik, çoklu çatlama sonucu şekil değiştirme sertleşmesi göstermesidir.



Şekil 2.4 : Yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı [14].

Yüksek performanslı lifli betonlar, sürekli lif (çelik) hasırlar veya yüksek oranlarda süreksiz çelik lifler kullanılarak üretilmektedir. YPÇLDB, depreme karşı güçlendirmede, Şekil 2.5’de görüldüğü gibi önemli oranda arttırılmış dayanım, süneklik ve enerji yutma kapasitesi gibi istenilen malzeme davranışına neden olan şekil değiştirme sertleşmesi gösteren lif donatılı betonun yeni bir türüdür.



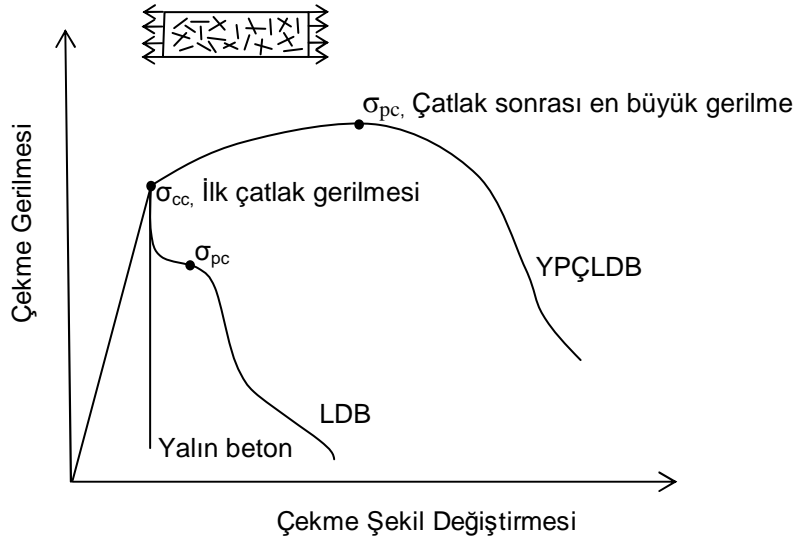
Şekil 2.5 : Eğilmeye tabi tutulan yalın beton, LDB ve YPLDB'nin (SIFCON) gerilme-şekil değiştirme davranışı [40].

Şekil değiştirme sertleşmesi, kompozitin geçirimsizlik ve dürabilitesinin iyileşmesine neden olan çoklu çatlama mekanizmasının bir sonucudur [41]. Bununla birlikte bu geliştirilmiş kompozitin üretimi özel imalat yöntemleri ve malzeme bileşimlerinin tasarımını gerektirmektedir.

Yüksek performanslı lifli betonlarda, çoklu çatlama mekanizmasının sonucu olarak şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergileyerek çok yüksek enerji yutma kapasitesi değerleri elde edilebilmektedir [42]. YPÇLDB'nin, geleneksel lif donatılı beton ve yalın betona göre süneklik, tokluk ve çatlak sonrası dayanımı gibi mekanik özelliklerinin grafiksel karşılaştırılması Şekil 2.6'da verilmiştir.

Son yıllarda taşıyıcı beton elemanların onarımı ve güçlendirilmesi için yüksek performanslı lifle donatılmış betonun kullanımında artan bir ilgi vardır. Bu ilgi, yüksek performanslı lifle donatılmış betonun reolojik, mekanik ve dürabilite

özelliklerinin pek çoğunun geleneksel betonlardan (yalın ve geleneksel lif donatılı beton) daha iyi olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.6 : YPÇLDB, lif donatılı beton (LDB) ve yalın betonun tipik çekme gerilme-şekil değiştirme davranışı [43].

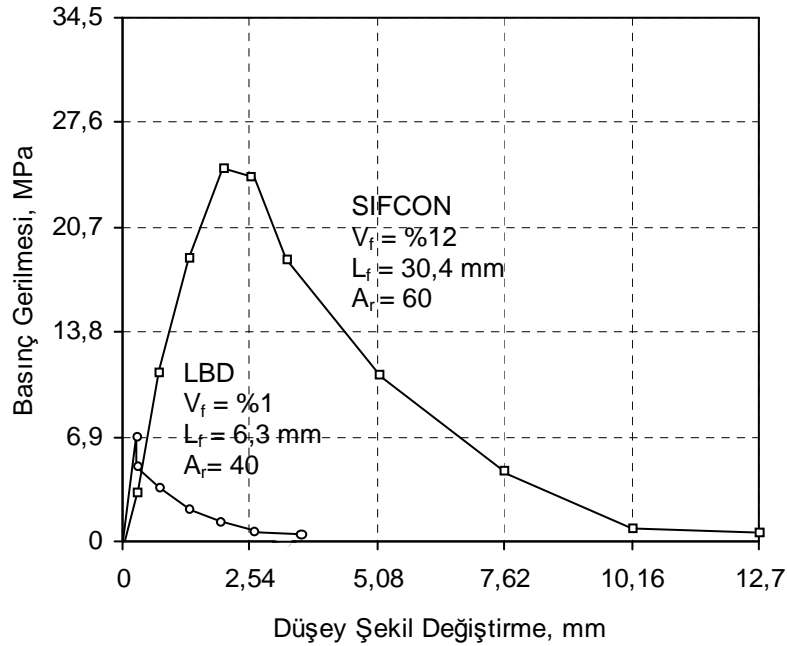
Yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitlerin günümüzde mevcut ve uygulanabilen türleri şunlardır:

- Bulamaç enjekte edilmiş lifli (süreksiz çelik lif) beton (SIFCON)
- Bulamaç enjekte edilmiş hasır lif (sürekli) donatılı beton (SIMCON)
- Lifle donatılmış yoğunlaştırılmış çimento esaslı kompozitler (DSP)
- Lifle donatılmış MDF (Macro-Defect-Free) çimentolu kompozitler [44].

Lif donatılı betonlarda (LDB), uygulanabilir karışım ve yerleştirme özellikleri nedeniyle lif hacim oranı ve narinliği belirli değerler içerisinde sınırlandırılmaktadır. Bu sınırlamalar, betonda liflerin kullanımı ile kazanılan mühendislik özelliklerindeki iyileşmeler üzerinde sınırlar koymuştur. Lifle donatılmış çimento esaslı malzemeler içerisinde daha fazla miktarlarda lif katmak için Lankard [45] tarafından yöntemler araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda SIFCON, 1979'da Lankard tarafından önerilmiştir. Bu tarihten sonra Lankard, malzemenin temel mekanik özelliklerinin birkaçında çalışmalar yürütmüştür ve SIFCON kompozit değişik projelerin tasarım ve yapımında kullanılmıştır [45].

SIFCON, liflerin yerleştirilmesinden sonra üzerine çimento esaslı bulamaç enjekte edilen yüksek performanslı bir lif donatılı kompozit malzemedir. SIFCON, kompozit matrise önemli oranda çekme özellikleri kazandıran ve lif-matris uygunluğuna sahip

lif donatılı betona benzemektedir. Meydana gelen kompozit, geleneksel lif donatılı betonda kullanılan lif oranından çok daha yüksek bir hacim oranı içermektedir. SIFCON, genellikle portland çimento esaslı bir matriste kısa çelik liflerin kullanıldığı kompozit bir malzemedir. SIFCON, çelik liflerin hacmin %0,5-%1,5 oranında karışıma doğrudan ilave edildiği geleneksel çelik lifli donatılmış betondan farklıdır. Meydana gelen kompozit malzeme, tokluk ve süneklik kadar çok yüksek basınç dayanımına da sahiptir. SIFCON, kullanılmış liflerin tipine ve üretim yöntemlerine bağlı olarak lif hacmi %20'lere kadar olabilen çok yüksek lif hacim oranlı bir çimento kompozitidir. Lifli betonda olduğu gibi, SIFCON'da da süreksiz liflerden oluşan bir donatı sistemi olduğundan kompozit malzeme önemli derecede çekme dayanımı kazanabilmektedir. SIFCON kompozitler, geleneksel LDB'ye göre yüksek dayanım ve süneklik özelliklerine sahiptirler [45]. SIFCON kompozitlere daha yüksek hacimlerde lif katılabilmesiyle mekanik özelliklerde meydana gelen iyileşmelerin lif donatılı betona göre karşılaştırılması Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 : SIFCON ve LDB'nin tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri [46].

Eren ve Çelik [47] tarafından yapılan çalışmada, YPÇLDB'nin özellikleri üzerinde silis dumanının etkisi, iki farklı silis dumanı oranında ve üç farklı boy/çap (30/0,5, 60/0,8 ve 50/0,6) oranında uçları kancalı tip çelik lifler kullanılarak araştırılmıştır. Lifler, beton hacminin %0,5, %1 ve %2'si olmak üzere üç farklı hacim oranında betona eklenmiştir. Silis dumanının basınç dayanımı üzerinde çelik lif hacim oranına

ve narinliğe bağlı olarak daha fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre:

- Genellikle lif hacim oranı arttığında taze betonda sürülenmiş hava miktarı azalmıştır. Gelişigüzel dağılmış lifler, hava kabarcıklarının çıkışı için bir yol sağlayan ağ formunda olduğundan hapsolmuş hava yüzdesi azalmıştır.
- Liflerin miktarı ve çapı arttığında YPÇLDB'nin Ve-Be süresi artmıştır.
- Liflerin bütün tipleri için lif oranı arttığında taze YPÇLDB'nin hapsolmuş hava miktarı azalmıştır [47].

Marar ve diğ., [48] yüksek dayanımlı lif donatılı beton kompozitin çarpma dayanımını belirlemek için basit, ekonomik ve pratik bir düşen ağırlıklı çarpma deney aleti geliştirmişlerdir. Çarpma ve basınç deneyleri, üç farklı narinlikte (60, 75 ve 80) kancalı çelik liflerin üç farklı hacim oranında kullanıldığı (%0,5, %1 ve %2) beton silindirler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç altında her bir lif narinliğinde ve hacim oranındaki silindir numuneler için toplam yutulan enerjiyi belirlemek amacıyla YPÇLDB'nin gerilme-şekil değiştirme eğrileri genelleştirilmiştir. Betona çelik liflerin eklenmesi, çarpma direnci ve basınç tokluğunu iyileştirmiştir. Deney sonuçlarında, farklı L/d (60,75 ve 83) oranlarındaki YPÇLDB için geliştirilmiş çarpma aleti ile belirlenen çarpma enerjisi ve basınç deneylerinden genelleştirilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde elde edilen basınç tokluk enerjisi arasında logaritmik bir ilişkinin varlığı gösterilmiştir. Çelik lif hacminin artması çarpma dayanımında artışa neden olmuştur. Basınç tokluğu, yalın yüksek performanslı betona çelik liflerin eklenmesi nedeniyle önemli derecede artmıştır. Lif hacim oranı azaldığında gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmının eğiminde bir artışın olduğu görülmüştür. Lif hacmi artarken, basınçta YPÇLDB'nin çatlak sonrası süneklik, enerji yutma kapasitesi ve tepe basınç gerilmesindeki şekil değiştirme kapasitesinin arttığı belirtilmiştir [48].

Kützing [49] tarafından basınç altında yüksek performanslı betonun çatlak sonrası davranışı üzerinde çelik liflerin etkisini araştırmak için bazı deneyler uygulanmıştır. Çelik lif hacim oranları %0,5 (40 kg/m^3) ve %1,5 (120 kg/m^3) arasında değişmiştir. Polipropilen lifin oranı %0,2'de (2 kg/m^3) sabit tutulmuştur. Hacmin %1,5 oranında çelik lif eklenmesi ile süneklikte iyileşme görülmüştür. Araştırmacı, karışıma 2 kg/m^3 polipropilen lif eklendikten sonra en büyük gerilme bölgesinde bir yatıklaşma gözlemlemiştir [49].

Song ve diğ., [50] tarafından yüksek dayanımlı çelik lif donatılı betonun basınç, yarmada çekme dayanımı, kırılma modülleri ve tokluk indeksleri belirlenmiştir. Çelik lifler %0,5, %1 ve %2 hacim oranlarında katılmıştır. Lif donatılı betonun basınç dayanımı, %1,5 hacim oranında en büyük değere ulaşmış ve yalın betona göre %15,3 iyileşme gözlenmiştir. Lifle donatılmış betonun yarma çekme dayanımı ve kırılma modüllerinde artan hacim oranı ile sırasıyla %93,8 ve %126,6 iyileşmeler elde edilmiştir. Tokluk indisleri de artan hacim oranı ile birlikte iyileşmiştir. Lif hacminin %2 oranında I_5 , I_{10} ve I_{30} tokluk indisleri sırasıyla 6,5, 11,8 ve 20,6 bulunmuştur [50].

2.3 Çelik Lif Donatılı Betonların Performansına Etki Eden Faktörler

Çelik lif donatılı betonların mekanik özelliklerine etki eden faktörler; lif, matris, numune ve lif-matris arayüzey özellikleri ile ilgili olmak üzere dört ana başlıkta toplanabilir. Bunlar;

- a) Lif ile ilgili faktörler: Lifi tipi, geometrisi, narinliği, elastisite modülü, çekme dayanımı, hacim oranı, yönlenmesi ve dağılımı.
- b) Matris ile ilgili faktörler: Matris dayanımı, en büyük agrega boyutu, elastisite modülü, maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme şekil değiştirmesi ve ilk çatlak boyutu.
- c) Numune ile ilgili faktörler: Numune boyutu, geometisi ve üretim metodu
- d) Arayüzey bağ dayanımı gibi lif-matris arayüzeyi ile ilgili parametrelerdir.

Genel olarak lifle donatılmış betondaki araştırmalar kompozitin davranışında bir veya iki özeliğin etkisinin araştırılması üzerinde odaklanmıştır. Tipik olarak bu özellikler lif hacim oranı ve narinliğidir [51].

2.3.1 Karışım özellikleri ve deney yönünün etkisi

Lif donatılı betonun mekanik özellikleri kür yöntemi, matris bileşimi ve deney yönü ile etkilenmektedir [52]. Lif donatılı beton yalın betona göre genellikle daha yüksek çimento ve ince malzeme içeriğine ve daha küçük agregaya sahiptir. Lif oranı arttığında çökme değeri azalır [53]. İşlenebilirlikteki bu azalma kullanılan liflerin tipi ve içeriğine bağlıdır. Yüksek lif içeriğini beton içinde homojen olarak dağıtmak zordur. Liflerden en iyi faydayı elde etmek için homojen bir lif dağılımı

gerekmektedir. Bununla birlikte geleneksel betonlar ile daha yüksek hacim oranlarına ulaşmak zordur. Bu nedenle yüksek lif hacim yüzdelerinde daha işlenebilir bir beton verebilen kendiliğinden yerleşen karışım teknikleri kullanılabilir. Kolay pompalanan ve işlenebilen çelik lif donatılı beton elde etmek için bir çelik lif üreticisi tarafından aşağıdaki sınırlamalar verilmiştir.

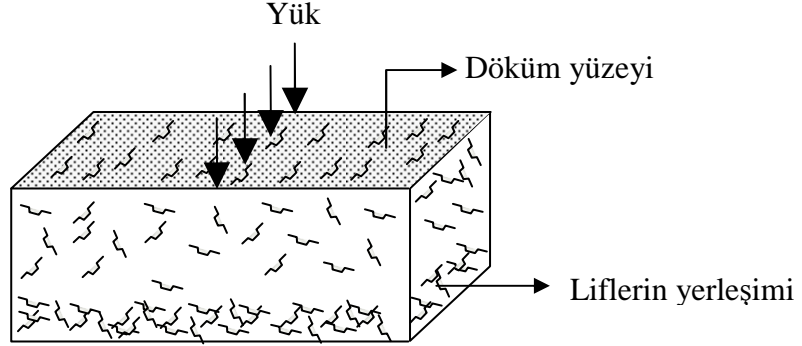
- Çimento miktarı $320-350 \text{ kg/m}^3$ arasında olmalıdır.
- $750-850 \text{ kg/m}^3$ iyi kalite ve derecelenmiş 0-4 mm kırma kum kullanılmalıdır.
- Yuvarlak çakıl için en büyük boyutu 28 mm, kırmataş için en büyük 32 mm boyutlu sürekli agrega tane boyutu dağılımı kullanılmalıdır. 14 mm'den daha büyük boyutlu malzeme %15-%20 arasında sınırlandırılmalıdır.
- Karakteristik basınç dayanımı en az 25 N/mm^2 olmalıdır.
- Su/çimento oranı yaklaşık 0,50 olmalı ve 0,55 değerini aşmamalıdır.
- Gerekli işlenebilirlik elde etmek için süper akışkanlaştırıcı kullanılmalıdır.
- Klorürlü veya klor iyonu içeren beton katkıları kullanılmamalıdır [54].

Tautai ve diğ., tarafından yapılan çalışmada, çelik lif donatılı betonun mekanik özellikleri üzerinde üretim tekniklerinin etkileri araştırılmıştır. Kür şartlarının ve döküm yönüne göre deney yönünün lif donatılı betonun mekanik özelliklerine etkileri belirlenmiştir. Numuneler üç farklı çevresel koşullarda (buhar, su, hava) kür edilmiştir. Deney sonuçlarına göre buhar kürü sudaki küre göre çelik lif donatılı betonun eğilme dayanımını etkilemezken, eğilme tokluğunu azalttığı bulunmuştur. Çelik lif donatılı betonun eğilme davranışı döküm yönü ile belirgin bir şekilde değiştiği belirtilmiştir [52].

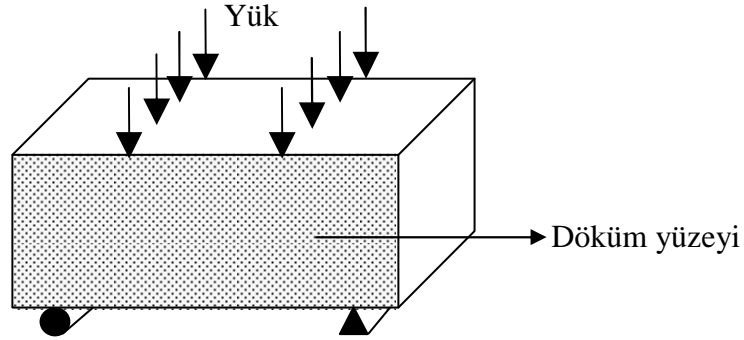
Çelik lif donatılı betonun yerleştirilmesi, masterlanması ve kürü için geleneksel alet, ekipman ve işlemlerin kullanılması yeterli olmaktadır. Sıkıştırma ve masterlamadan sonra aşınmaya karşı ürünler ve çimento, genellikle beton yüzeyi üzerinde yayılmaktadır [55]. Çelik lif donatılı beton yalın beton gibi aynı metot ve teknik ile kürlenmeli ve korunmalıdır [56].

Çelik lifli betonun eğilme davranışı, deney yönüne göre belirgin bir şekilde etkilenmektedir. Deney yönü döküm yönüne dik olduğunda numunelerin eğilme dayanımı ve tokluğunda deney ve döküm yönüne paralel duruma göre azalmalar gözlenmiştir.

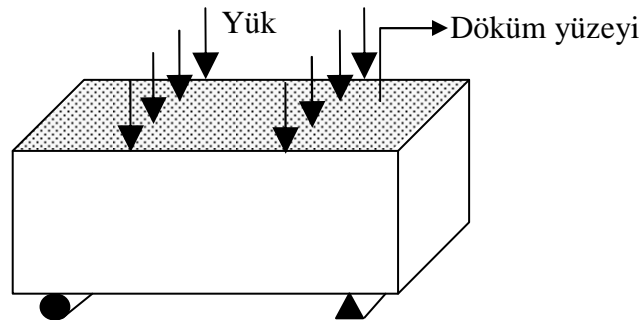
Lifli karışımın yerleştirilmesi sırasında liflerin aşağı oturmasını etkileyen artan akışkanlık döküm yönüne göre deney yönünün etkisi artmaktadır. Döküm yönüne göre lif yerleşimi ve deney yönünün karşılaştırılması Şekil 2.8’de verilmiştir.



a) Döküm sırasında çelik liflerin yerleşimi



b) Deney yönü döküm yönüne dik olması durumu

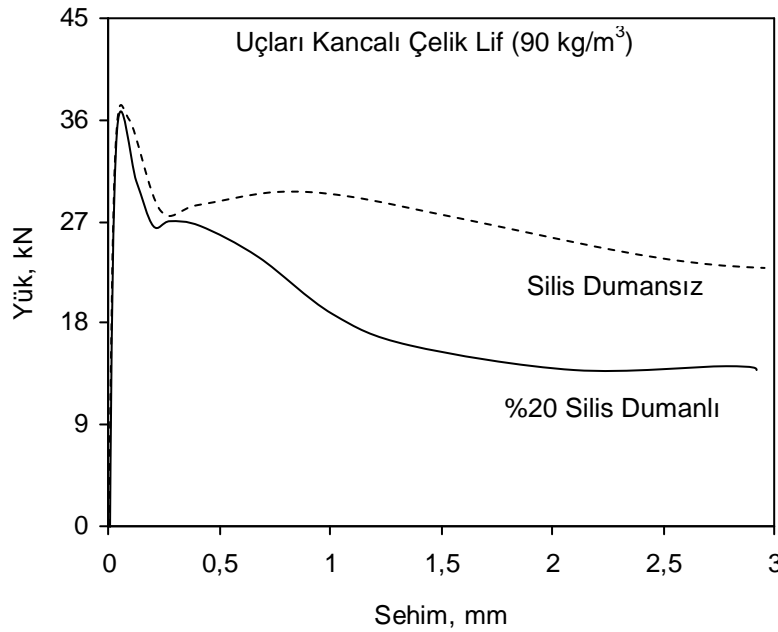


c) Deney yönü döküm yönüne paralel olması durumu

Şekil 2.8 : Döküm yönüne göre lif yerleşimi ve deney yönü [52].

2.3.2 Matris bileşiminin etkisi

Genel olarak matris dayanımı arttığında beton daha gevrek olduğundan dolayı aynı sünekliği elde etmek için daha çok lif katılması gerekmektedir. Matris bileşimine silis dumanının katılması, matrisi daha gevrek yaptığından dolayı aynı lif tipi ve hacim oranında silis dumanlı beton kirişler daha düşük tokluğa sahiptir. Silis dumanı içeren betonun yalın (silis dumanı içermeyen) betona göre çatlak sonrası yük-sehim eğrisinde daha büyük bir azalma olduğu Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9 : Yük-sehim eğrisine silis dumanı eklenmesinin etkisi [36].

Balendran ve diğ., [57] beton türü ve numune boyutuna göre betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde liflerin etkinliğini araştırmışlardır. Hafif agregalı ve kireç taşı agregalı çelik lifli ve yalın betonlar üretilmiştir. Çelik lif hacim oranı %1 olan betonların basınç dayanımı 90-115 MPa arasında değişmiştir. Aynı tip ve hacimdeki lifle, yarmada çekme ve eğilme dayanımındaki iyileşme normal ağırlıklı betona göre hafif ağırlıklı betonda daha fazla olduğu belirtilmiştir [57].

2.3.3 Çelik lif özelliklerinin etkisi

Çelik liflerin üretim teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak çekme dayanımları hasır donatı çubuklarına göre 2-4 kat daha fazladır. Geleneksel çelik donatılarına göre beton matrisi ile daha güçlü bağ oluşturan çelik lifler daha küçük boyutlarda olduğu için çok daha fazla yüzey alanına sahiptir [58]. Çelik lif donatılı betonların

performansı üzerinde, çelik lifin narinliği, dayanımı ve oranının önemli etkileri vardır [59].

2.3.3.1 Çelik lif türü ve tipi

Son yıllarda betonda homojen lif dağılımı ve daha güçlü lif-matris özellikleri sağlayan uygun çelik lif tipinin belirlenmesi amacıyla için pek çok araştırma yapılmıştır. ASTM A 820 tarafından çelik liflerin üretimlerinde kullanılan ürüne bağlı olarak 4 genel çelik lif tipi için bir sınıflandırma verilmiştir [60]. Bunlar;

- a) Tip I: Soğuk şekil değiştirme uygulanmış çelikten kesilmiş lif
- b) Tip II: Plakadan kesilmiş lif
- c) Tip III: Ergitilerek üretilmiş çelik lif
- d) Tip IV: Diğer lifler

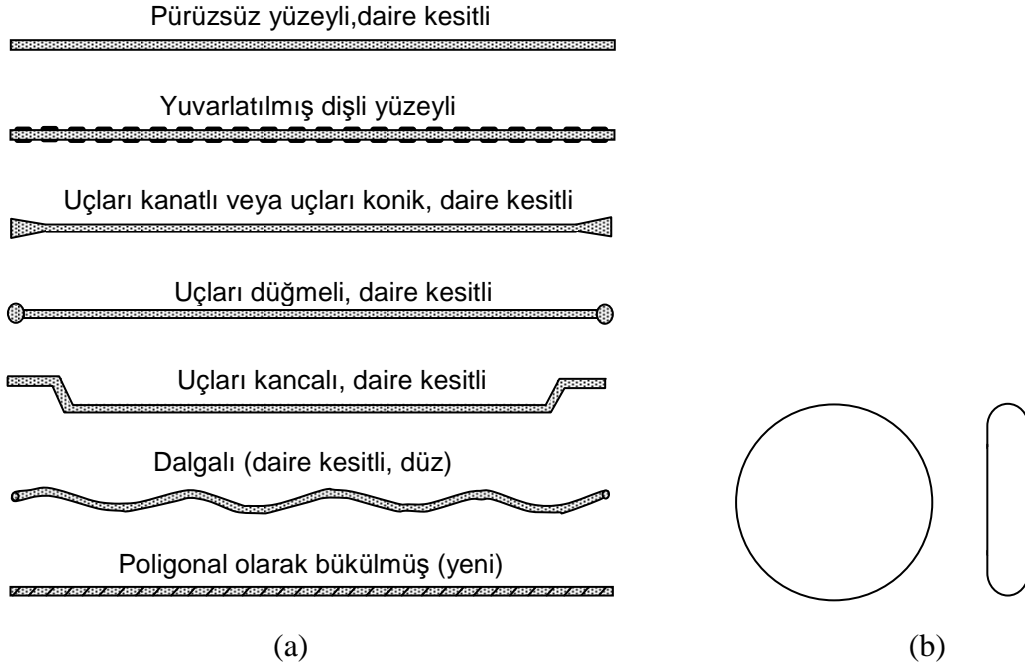
Kesilmiş telden üretilen yuvarlak kesitli düz çelik lifler, genel olarak 0,25-1 mm arasında çapa sahiptir. Yassı düz çelik lifler ise, tipik olarak 0,25-1,14 mm genişlik, 0,15-0,41 mm kalınlık aralığında en kesite sahip kesilmiş plaka veya yassılaştırılmış liften üretilmektedir. Dalgalı ve deforme edilmiş çelik lifler, tüm uzunluğu dalgalı veya sadece uçlarda genişletilmiş olarak üretilmektedir. Bazı lifler, karıştırma ve taşıma özeliğini ve matrise ankrajı iyileştirmek için eğimli veya yassı şekilde deforme edilmektedir [61]. Uçları kancalı çelik lif gibi bazı lifler, karıştırmayı kolaylaştırmak için tutkalla birbirine yapıştırılmaktadır. Karıştırma sırasında her bir lif birbirinden ayrılarak liflerin topaklanması önlenmektedir [60].

Betonların zayıf olan mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan çelik lifler, ACI 544'e göre lif boyutunun eşdeğer lif çapına bölünmesi ile elde edilen boy/çap (L/d) oranına göre tanımlanmaktadır. Bu orana kısaca narinlik denilmektedir. [62].

Çelik liflerin çekme dayanımı 345-2200 MPa, uzunluğu 19-60 mm aralığında, narinliği (uzunluk/çap) 30-100 aralığında değişmekte olup elastisite modülü 205 GPa'dır [55]. Günümüzde çelik lif teknolojisindeki gelişmeler nedeniyle çekme dayanımı 2600 MPa'a kadar olan yüksek performanslı çelik lifler üretilmektedir.

Çelik lifler en kesitleri göre dairesel, dikdörtgen, eşkenar, kare, üçgen, poligon (çok köşeli) veya sabit poligon şeklinde olabilmektedir. Lif ve matris arasında daha güçlü aderans geliştirmek için, lifler mekanik deformasyonlarının artırılmasıyla veya

uzunluğu boyunca yüzeyi pürüzlendirilerek iyileştirilmektedir. Bu nedenle çelik lifler yüzey durumuna göre düz, nervürlü, düzensiz, zikzaklı (kıvrımlı), helezon, çift baskılı, uçları kancalı, uçları kanatlı, uçları düğmeli şekilde olmaktadır. Çelik lifler için tipik örnekler Şekil 2.10'da gösterilmektedir.

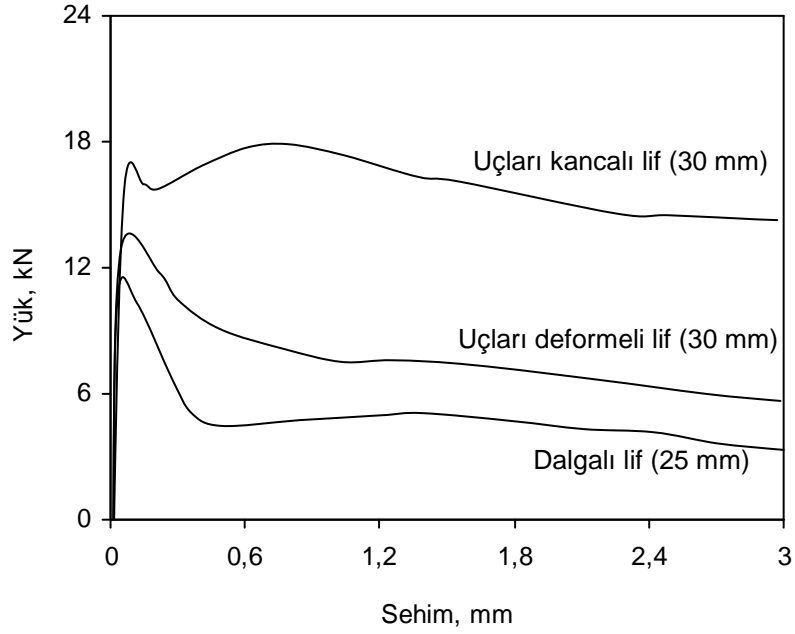


Şekil 2.10 : (a). Betonda genellikle kullanılan çelik liflerin tipik profilleri. (b). Bazı araştırmalarda kullanılmış dairesel ve eliptik lifler [14].

Çelik lif donatılı betonda, genellikle özel olarak bükülmüş kanca uçlu çelik lifler kullanılmaktadır. Lif uçlarındaki kancalar, betona olan ankrajı arttırmaktadır. Çelik lifler betonarme elemanları her doğrultuda takviye etmektedir. Özel tutkal ile yapıştırılmış demetler halinde bulunan uçları kancalı çelik lifler, beton karıştırma mikserinde basit ve hızlı bir şekilde dağılmaktadırlar [63].

Lif uçları kanatlı, konik ve düğmeli olarak şekillendirilmiş liflerin kullanılması lif-matris arasındaki mekanik ankraj yoluyla sağlanan aderansın, düz liflerin katılması ile sürtünmeli kayma bağı gerilmesi ile sağlanan aderansdan daha etkilidir [64].

Uçları kancalı (30 mm), dalgalı (25 mm) ve uçları şekillendirilmiş (deformeli) üç farklı tip çelik lifin ÇLDB'nin yük-sehim eğrilerine etkisi Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Uçları kancalı çelik lifli beton diğer iki türe göre daha yüksek çekme dayanımına ve daha iyi çatlak sonrası davranışa sahip olduğu gözlenmiştir. İlk çatlak sonrası yükteki azalmanın, dalgalı ve uçları deforme olmuş liflerde daha fazla fazladır.



Şekil 2.11 : Yük-sehim eğrisine farklı çelik lif tiplerinin etkisi [65].

Nataraja ve diğ., [66] basınç dayanımı 30-50 MPa arasında değişen çelik lif donatılı betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin belirlenmesi amacıyla yaptıkları çalışmada, üç hacim oranında (%0,5, %0,75 ve %1) ve iki farklı narinlikte (55 ve 82) dairesel kesitli dalgalı lifler kullanmışlardır. Lif eklenmesinin en büyük gerilme, en büyük gerilmedeki şekil değiştirme, betonun tokluğu ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin şekli üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Betona dalgalı çelik lif eklenmesi tokluğu, basınç dayanımını ve en büyük gerilmedeki şekil değiştirme kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir [66].

2.3.3.2 Çelik lif hacmi

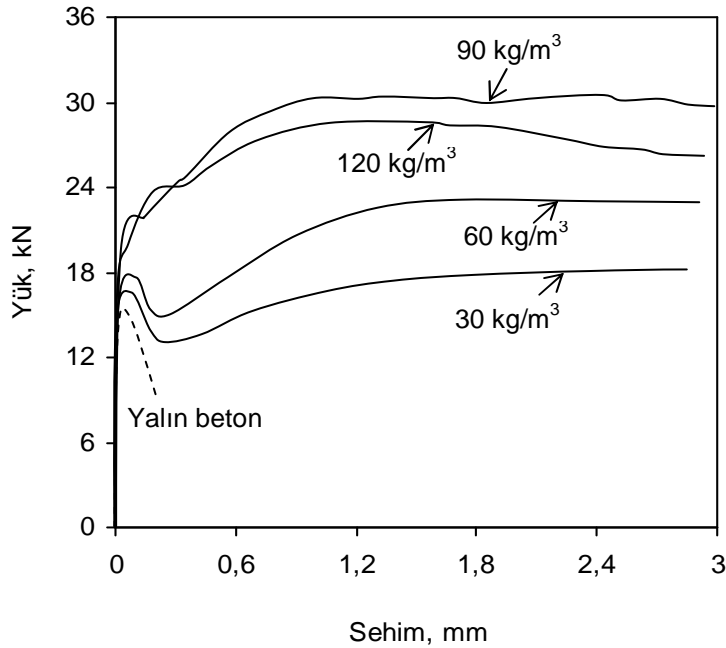
Çelik lif donatılı betonda lif hacim oranı için tipik üst limit %2-%3 arasındadır [15]. Bununla birlikte %2'den daha az lif hacim oranlarında, lifler çoğunlukla çatlama sonrası süneklığe ve enerji yutma kapasitesine katkı sağlamaktadır. En büyük dayanım ve çekme şekil değiştirme kapasitesi gibi diğer özelliklerdeki iyileşmeler önemli düzeyde değildir [26]. Tipik olarak beton için lif hacim oranı, %0-%1,5 arasında değişmektedir. Genel olarak lif hacim oranının %2'nin üzerinde olması, zayıf lif dağılımına ve işlenebilirliğe neden olmaktadır. Tipik olarak beton bileşenlerinin miktarlarına göre bazı lif tipleri için lif oranları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Çelik lif donatılı normal ağırlıklı beton için tipik bileşim oranlarının değişimi [65].

Oranlar	En büyük agrega boyutu, mm		
	9,52	12,7	19,1
Çimento, kg/m ³	356-593	297-534	278-415
Su/Çimento Oranı	0,35-0,45	0,35-0,50	0,35-,055
İnce/Kaba Agrega Oranı	45-60	45-55	40-55
Sürüklenmiş Hava, %	4-8	4-6	4-5
Lif Tipleri	Lif Oranı, %		
Deformeli Lif	0,4-1,0	0,3-0,8	0,2-0,7
Düz Lif	0,8-2,0	0,6-1,6	0,4-1,4

Lif hacmi, lif tipine ve betonun kullanım yerine göre değişmektedir. Endüstriyel zemin döşemeleri için çelik lif hacmi, hacimsel olarak %0,3-%0,5 (24-36 kg/m³) ve yapısal uygulamalarda 60-100 kg/m³ arasında sınırlandırılmaktadır [67].

Uzunluğu 50 mm olan uçları kancalı çelik lif içeren 100x100x350 mm boyutundaki kirişlerin yük-sehim davranışlarında lif hacim oranının etkisi Şekil 2.12’de gösterilmektedir. Bu eğrilere göre, enerji yutma kapasitesindeki iyileşme, daha yüksek lif hacim oranlarında daha fazla olduğu görülmektedir. İlk çatlak yükü sonrası ani düşme, artan çelik lif hacim oranıyla azalmaktadır. Diğer lif tipleri için bu azalma çok daha fazladır. Daha yüksek lif hacim oranlarında, çatlak sonrası yükte önemli bir artış olmaktadır. Bu artış, eğilme dayanımında artışa neden olmaktadır.



Şekil 2.12 : Yük-sehim eğrisine farklı çelik lif hacminin etkisi [64].

2.3.3.3 Çelik lif uzunluğu, çapı ve narinliği

Liflerin beton ile aderansı, lif narinliğine (L/d) bağlıdır. En yaygın çelik lifler, 50-100 arasında değişen narinliğe sahiptirler. Liflerin boyutları ne kadar küçük olursa taze beton karışımında yayılması daha kolay olmaktadır. Genel bir sonuç olarak, bir lifin narinliği attıkça her bir lifin etkinliği de daha büyük olmaktadır. Kısa lifleri karıştırmak kolaydır. Fakat meydana gelen kompozitin özellikleri daha uzun liflere göre özellikle tokluk ve çatlak sonrası dayanımı daha küçük olmaktadır. Genel olarak lif uzunluğu, 6,4-76 mm arasında değişmektedir [65].

Büyük çaplı dalgalı çelik lifler, donatı olarak betonda sıklıkla kullanılmaktadır. Maliyeti daha az olan büyük çaplı lifler karışımında daha kolay yayılarak betonun işlenebilirliğinde çok fazla bir azalmaya neden olmamaktadır. Bununla birlikte lif çapının artması lif donatılı betonun tokluğunu azaltmaktadır [33].

ÇLDB'nin özelliklerini etkileyen en önemli faktörler; lif narinliği ve hacim oranıdır. Beton üretiminde karıştırma ve yerleştirme aşamasında narinlik önemlidir. Narinliğin artışı ile liflerin betonda heterojen dağılımı ve topaklanması olasılığı artmaktadır. Lif uzunluğunun etkisi, düz çelik lif kullanılması durumunda çok önemlidir. Bununla birlikte daha büyük narinliğe sahip uzun lifler, enerji yutma ve dayanım artışı ile daha iyi performans vermektedir [24].

Mohammadi ve diğ., [68] tarafından yapılan çalışmada çelik lif donatılı betonun basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı ve ultrasonik dalga hızı üzerinde, lif narinliğinin ve hacim oranının etkileri araştırılmıştır. Bu amaç için üç farklı narinlikte (45,65 ve 80) uçları kancalı çelik lifler kullanılmıştır. Lifler beton hacminin %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında eklenmiştir. Çelik liflerin eklenmesi, narinliğe ve hacim oranına bağlı olarak betonun yarma-çekme ve eğilme dayanımını önemli oranda arttırdığı bulunmuştur [68].

Gao ve diğ., [69] tarafından çelik liflerin, yüksek dayanımlı hafif ağırlıklı betonun elastisite modülü ve poisson oranı üzerindeki etkisi araştırılmış ve eğilme kırılma toklukları belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğuna lif hacmi ve narinliğinin belirgin bir etkisi olduğu, basınç dayanımını az iyileştirdiği ve çekme/basınç dayanımı oranının belirgin bir şekilde arttırdığını belirtmişlerdir. Lif hacmi ve narinliğin artmasıyla, en büyük yüke karşılık gelen

eğilme şekil değiştirmesinin (sehim) arttığı ve liflerin çatlak durdurmasına bağlı olarak en büyük yük sonrası yük-sehim eğrisinde yavaş bir şekilde azalma olduğu gözlenmiştir [69].

2.3.3.4 Çelik lif yönlenmesi

Lif yönlenmesi sıyrılma sürecinde önemli bir rol oynar. Çatlak yüzeyine yönlenmiş bir çelik lif sıyrılmasının çok büyük bir enerji gerektirtmektedir. Bu sıyrılma süreci, lifte eğilme (bükülme) oluşmasına ve matrisin gevrekliğine bağlıdır. Yönlenme, üretim tekniği, yerleştirme koşulları ve taze betonun reolojisi ile etkilenmektedir [32].

Çelik lifli betonun yerleşimi ve sıkıştırılmasına bağlı olarak lifler kirişin alt kısmına aşağı doğru yerleşme eğilimindedir. Eğilme deneyi sırasında döküm (yerleştirme) yönü ve deneye yerleştirme yönü ilişkisine bağlı olarak lif yerleşimi deney sonuçlarını etkilemektedir. Lif donatılı betonlar için eğilme deney metodunu (üç noktadan yüklenmiş kirişler için) tanımlayan ASTM C 1018 standardında geniş numuneler için döküm yönüne dik olan deney yönü tanımlanmaktadır. Bu standart, homojen olmayan lif dağılımına neden olan lif yerleşiminin etkisini ihmal etmektedir. Bu lif yerleşim etkisi, zemin üzerindeki tabliyeler, döşeme sistemleri ve kirişlerde çekme bölgesi gibi uygulama alanlarında çelik lif donatılı betonun eğilme davranışını arttırmak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte lif yönlenmesinin düşük şekil değiştirmelerde ölçülen elastik özellikler nedeniyle dinamik elastisite modülü üzerinde etkisi daha az olmaktadır [68].

2.4 Çelik Lif Donatılı Betonların Üstünlükleri ve Uygulama Alanları

Çelik liflerin betona belirli oranda eklenmesi ile elde edilen yeni betonun çekme dayanımının yanında bir çok mühendislik özelliklerinde de iyileşmeler gözlenmiştir. Çelik lifler, basınç ve çekme etkisi altında, liflerin çekme dayanımı tam olarak kullanılmadan önce, beton matrisinde çok sayıda kılcal çatlakların meydana gelmesini önlemektedir. Çelik lifli betonun, taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıma özelliği vardır. Ayrıca kesme, burulma ve yorulmaya karşı dayanımı fazladır. Çatlamlar, dökülme, parçalanma ve dağılmalar daha az olmaktadır. Basınç

dayanımında da belirli bir artış görülür. Çekme dayanımında ise normal betona göre oldukça önemli artışlar gözlenmektedir [70].

Geleneksel çelik lif donatılı betonların, normal betonlara göre sağladıkları üstünlüklerden dolayı kullanım alanları ve oranları gün geçtikçe artmaktadır. Püskürtme beton uygulamaları, yol kaplamaları, su ve deniz yapıları, zemin kaplamaları, prefabrike elemanların üretimi, depreme ve ateşe dayanıklı yapılar, kabuk ve güvenlik yapıları kullanım alanları olarak sıralanabilir. Çelik lif donatılı püskürtme betonlar ise tünel kaplama, şevlerin stabilitesi, kazıların ve temellerin desteklenmesi, kanal kaplamaları, köprü mesnetlerinin korunması, nükleer atıkların saklandığı büyük yeraltı depolarının kaplanması, kanalizasyon, baraj, yüzme havuzu ve su depoları gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Ayrıca, diğer önemli bir kullanım alanı ise liman, otoyol, demiryolu ve köprüler gibi yapıların tamir ve onarımıdır [71,72]. Çelik lif donatılı betonun uygulama alanlarından bazılarına ait fotoğraflar Şekil 2.13’de verilmektedir.

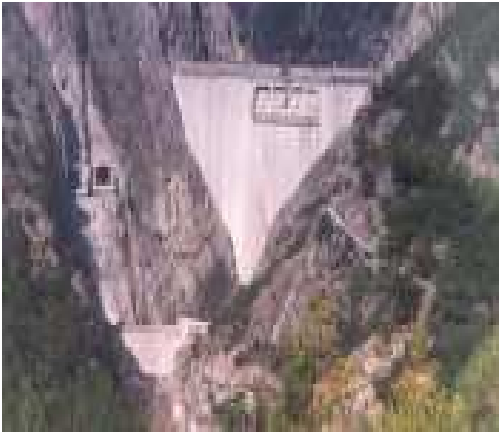
Çelik lifler püskürtme betonda, esas olarak çarpma dayanımı ve sünekliği arttırmak için geniş çapta kullanılmaktadır [67]. Kancalı uçlu çelik lifle donatılmış püskürtme betonlar, kaya mesnet takviye uygulamalarında çelik hasır donatı ile takviye edilmiş betona göre çok daha fazla etkiye sahip olduğu görülmektedir [73]. Geleneksel çimentolu kompozitlerde daha büyük lif dayanımına sahip çelik meso lif kullanılması mikro çatlak köprülenmesindeki belirgin etkisinden dolayı dayanımda artış sağlamaktadır [34]. Çelik liflerin üstünlüğü, daha fazla aderans ve sıyrılmaya dayanımını arttırmak için çeşitli şekillerde üretilebilmeleridir [74].



a) Zemin betonları



b) Hava alanı kaplamaları



c) Su yapıları (Berke Osmaniye Barajı)



d) Tünel segmanları



e) Püskürtme beton



f) Prefabrik yapı elemanları

Şekil 2.13 : Çelik lif donatılı betonların bazı uygulama alanları [75,76].

2.5 Çelik Lif Donatılı Betonların Yapısal Uygulamalarda Kullanılması

Yapısal uygulamalarda liflerin kullanımı, geleneksel çekme donatısının gerekliliğini ortadan kaldırmakta ve lif donatılı betonun sağladığı faydaları kullanmanın bir

yolunu vermektedir. Çelik lif donatılı betonların tasarımı için ilk olarak malzeme özelliklerinin tamamen anlaşılması sağlanmalıdır. Geleneksel yalın beton kabulleri daha uzun süre için etkili olmamaktadır. Çelik lif donatılı beton, bağımsız mekanik özellikleri ile tamamen yeni bir malzeme olarak değerlendirilmelidir. Çelik lif donatılı betonun mekanik özellikleri, lif tipi, miktarı, narinliği, matris dayanımı ve agrega boyutunun fonksiyonudur [77].

Bazı araştırmalar, ÇLDB'nin yapısal uygulamaları üzerinde bazı araştırmalar yapılmıştır. Statik yükleme koşulları altında geleneksel kayma donatısı ile yerdeğiştirmiş veya doğrudan eklenmiş olarak çelik liflerin kullanıldığı basit mesnetli kirişler ve derin kirişlerde kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu kirişlerin yorulma performansları da araştırılmıştır. Kiriş-kolon bağlantı bölgelerinde, çelik liflerin kayma donatısı ile yerdeğiştirilerek veya eklenerek kullanıldığı araştırmaların yapılması ÇLDB'nin bir diğer kullanım alanıdır. Esas uygulama, bu bağlantıların yarı-sismik yüklemeler altında performansının araştırılmasıdır [78].

Williamson [79] tarafından yapılan bir çalışmada, kayma donatısı yerine düz ve uçları kancalı çelik liflerin kullanımının uygulanabilirliği araştırılmıştır. Deneyler 305x546 mm en kesitinde 6,4 m açıklığındaki aynı miktarda eğilme donatısı içeren kirişler üzerinde yapılmıştır. Kiriş numuneler kayma donatısız (etriyesiz), etriyeli, %1,7 hacim oranlı 0,25x0,55x25,4 mm düz çelik lif ve %1,2 hacim oranlı ve narinliği 100 olan 500 mm uzunluğunda uçları kancalı çelik liflerden oluşmuştur. Kayma donatısız kirişlerin tasarlanan kaymaya ulaştığında kayma katastrofik olarak kırılırken, etriyeli numunelerde %61 oranında daha büyük gerilmede kırılma olduğu belirtilmiştir. ÇLDB numunelerde, kırılmadan önce tasarım değerinden %47 daha büyük kayma gerilmelerine ulaşıldığı gözlenmiştir. Uçları kancalı liflerin kullanıldığı kirişler, eğilmede önce çekme çeliklerinin aktığı ardından betonun kırıldığı kirişler kadar yeterli kayma dayanımı verdiği belirtilmiştir [79].

Jindal [80] tarafından donatılı beton kirişlerin kayma ve moment kapasiteleri üzerinde liflerin etkisi araştırılmıştır. Kayma açıklığına bağlı olarak, 100 mm genişlik, 150 mm yükseklik ve 762-1534 mm arasında değişen uzunluklara sahip kirişler deneye tabi tutulmuştur. İki farklı tipte çelik lifler %1 lif hacim oranında karışımlara eklenmiştir. ÇLDB kirişlerin kayma dayanımının yalın betona göre %205

daha fazla olduğu bulunmuştur. Kayma dayanımındaki artışın, narinliği 75 olan 21 mm uzunluktaki düz çelik lifler kullanıldığında artış %144 olarak belirlenmiştir [80].

Roberts ve Hao [81] tarafından çelik liflerin eklenmesinin derin kirişlerin kayma kırılmasını önlediğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada, %0, %0,85 ve %1,3 lif hacim oranlı 50x200 mm en kesitinde ve 455-1000 mm arasında değişen farklı uzunluklarda kirişler üretilmiştir. Narinliği 100 olan 38 mm uzunluğundaki liflerin eklenmesiyle, numunelerde tanımlanan teorik en büyük moment kapasitesine ulaşıldığı belirlenmiştir.

Swaddiwudpipong ve Shanmugam [82] tarafından çelik lif donatılı derin kirişlerin davranışı araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, 100x650x1300 mm boyutundaki kiriş numunelerde, narinliği 60 ve uzunluğu 30 mm olan uçları kancalı çelik lifler %0-%1,5 arasında değişen hacim oranlarında kullanılmıştır. Liflerin eklenmesi ile kirişlerin kayma dayanımının arttığı belirlenmiştir.

Bollana [83], iki açıklıklı sürekli ÇLDB kirişlerin davranışını araştırmıştır. Çelik liflerle etriyelerin yer değiştirildiği numuneler ve etriye ile donatılmış yalın betondan üretilmiş kiriş numuneler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Karışımlarda, 0,25x0,56x25,4 mm boyutunda düz lifler %2 hacim oranında ve narinliği 74 ve uzunluğu 30 mm olan uçları kancalı lifler %1 hacim oranında kullanılmıştır. Etriyelerin yerine liflerin kullanıldığı kirişlerde, ilk çatlak ve en büyük dayanımda, etriyeli yalın betonun değerlerine yakın sonuçlar bulunduğu belirtilmiştir.

Günümüzde ÇLDB kirişler için uygun çelik lif hacmi için kesin bir standart yoktur. Daha önceki tüm çalışmalar tek beton sınıfında uygulanmış ve bilindiği kadar farklı beton sınıfları üzerinde çelik liflerin etkileri ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır [18].

2.6 Çelik Lif Donatılı Betonların Özellikleri

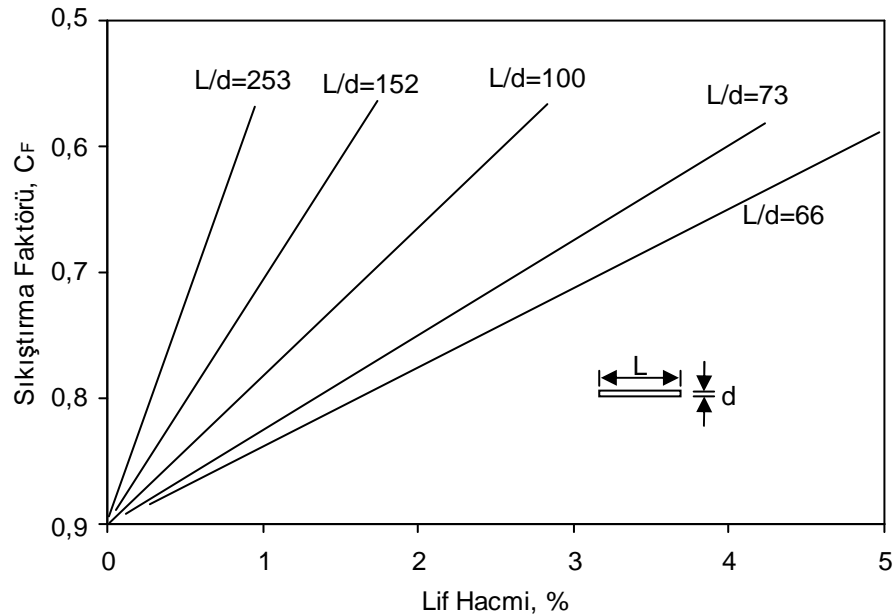
Çelik lif donatılı beton, ince ve kaba agrega içeren çimentodan ve süreksiz çelik liflerden oluşan bir betondur. Bir çok uygulamada betonu güçlendirmek için kısa, rastgele yayılmış çelik lifler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Lif eklenmesinin esas amacı, malzemenin enerji yutma kapasitesi ve tokluğunu arttırmaktır.

Beton içerisine rastgele dağılmış çelik lif donatısının eklenmesi, sertleşmiş beton malzemeyi daha sünek bir kompozite dönüştürmektedir. Çelik lif donatılı beton çatlama öncesi ve sonrası çok daha büyük gerilmelere dayanabilmektedir. ÇLDB, çelik liflerin kopması ve çimento matrisinden sıyrılmasından sonra yetersiz hale gelmektedir [60].

Geleneksel betonda kullanılan cam, sentetik, karbon ve çelik liflerin en önemli etkisi, betonda çatlak gelişimine engel olmasıdır. Bu nedenle, betondaki iç gerilmelere bağlı olarak oluşan mikro çatlakların büyümesi ve ilerlemesi, liflerin gerilme aktarma özelliği ile önlenmektedir. Lifler, şekil ve miktarlarına bağlı olarak çimento matrisinde oluşan bazı gerilmeleri taşımakta ve uygun çimento-matris oranlarında gerilmeleri aktarmaktadır [64].

2.6.1 Çelik lif donatılı taze betonların özellikleri

Taze ÇLDB'nin işlenebilirliği, lif narinliği, lif geometrisi, lif hacim oranı, matris oranları ve lif-matris arayüzey özellikleri gibi pek çok faktörler ile etkilenmektedir [74]. İşlenebilirlik, standart çökme konisi, ters çökme konisi ve Ve-Be gibi yöntemlerle ölçülmektedir. Betonun işlenebilirliği üzerinde lif narinliğinin etkisi Şekil 2.14'de gösterilmektedir.



Şekil 2.14 : Betonun işlenebilirliğinde lif narinliğinin etkisi [64].

Çelik lifler betona eklendiğinde oluşan en önemli problemlerden biri, yeterli işlenebilirliğin elde edilebilmesindedir. Betona liflerin eklenmesi işlenebilirlikte meydana gelen azalma, lif hacim oranı ve narinlikteki artış ile artmaktadır. ACI Committee 544.1R [60] raporuna göre, çelik lif donatılı betonda kullanılan tipik hacim oranlarında (%0,25-%1,5) liflerin eklenmesi, yalın betona göre çökme değerinde 25-102 mm aralığında azalmaya neden olmaktadır. ÇLDB uygulamalarında mekanik vibrasyon ile sıkıştırma önerildiğinden, ÇLDB'nin işlenebilirliğinin çökme deneyine göre vibrasyon etkilerini temsil eden Ve-Be deneyi ile belirlenmesi daha çok tavsiye edilmektedir. Yeterli işlenebilirliğin (120-150 mm) elde edilebilmesi için daha etkili akışkanlaştırıcıların katılması gerekmektedir [64].

Genellikle topaklanmanın olmaması için lifler taze betona en son ilave edilmektedir [53]. Liflerin narinliği 50'den ne kadar az olursa, lifler herhangi bir topaklanma riski olmaksızın doğrudan yayılmaktadır [60]. Bununla birlikte üretim işlemi sırasında görsel denetim, lif dağılımının uygunluğunu kontrol etmek için gerekmektedir [55].

Mohammadi ve diğ., [68] tarafından, karma olarak farklı narinlikte lifler içeren çelik lif donatılı beton ve yalın betonun özelliklerinin araştırıldığı bir araştırma yapılmıştır. Yalın ve lif donatılı taze betonun işlenebilirlik özelliklerini araştırmak için ters koni süresi, Vebe süresi ve sıkıştırma faktörü gibi çeşitli deneyler yapılmıştır. Sertleşmiş yalın ve lif donatılı betonun mekanik özelliklerini araştırmak için basınç, yarmada çekme ve statik eğilme deneyleri uygulanmıştır. Numunelere üç farklı hacim oranlarında (%1, %1,5, %2) dalgalı çelik lifler eklenmiştir. Karışımlarda herbir toplam hacim oranında 0,6x2x25 mm ve 0,6x2x50 mm boyutunda düz çelik lifler farklı ağırlık oranlarında kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, karışımlarda daha kısa liflerin oranı arttığında daha iyi işlenebilirliğin elde edildiği belirtilmiştir [68].

2.6.2 Çelik lif donatılı betonların mekanik özellikleri

Dış yükler (basınç, çekme, eğilme veya çok eksenli yükleme) etkisiyle betonda meydana gelen gerilme sistemi, çimentolu malzemelerde mikro çatlakların birbirine bağlanması ve gelişimine doğru bir eğilime neden olmaktadır [84]. Mikro çatlakların gelişimi ile betondaki gevşeme, genel olarak çimentolu malzemelerin en büyük eksikliği olarak bilinen gevrek kırılma ile sonuçlanmaktadır.

Kısa, rastgele dağılmış çelik liflerle betonun donatılandırılması, malzemenin çekme dayanımı, çekme ve basınç tokluğunda iyileşmelere neden olmaktadır. Bu iyileşme, liflerin çimentolu matrislerdeki mikro çatlak gelişimini durdurma veya geciktirme etkisiyle meydana gelmektedir. Basınç altında çelik lifler tarafından çimentolu matrisin sarılması ve çekme altında liflerin kopma ve sıyrılma davranışı çelik liflerin betonun mekanik özelliklerini iyileştirmesindeki önemli mekanizmalardır. Çelik liflerin eklenmesiyle betonun eğilme performansındaki iyileşmeler, malzemenin basınç ve çekme davranışındaki iyileşmelerin doğrudan bir sonucudur. Çelik lif donatılı betonun dikkate değer mekanik özellikleri, yapısal olan ve olmayan geniş bir uygulama aralığında çelik lif donatılı betonun kullanımını teşvik etmektedir [85].

Genel olarak çatlak genişliğinin azaltılması ve kontrolü ile betonun büzülme (rötre) davranışında iyileşme meydana getiren çelik lif donatılı betonun yalın betona göre dürabilitesi çok daha yüksektir. Beton homojen yerleştirilirse liflerin korozyonu, beton yüzeyinde sınırlanmaktadır. Lifler donma-çözülme çevrimlerinin neden olduğu olumsuz etkiyi de azaltmaktadır [60].

Shah ve Naaman [86] tarafından farklı uzunluk ve hacim oranında çelik ve cam lif donatılı beton numuneler üzerinde çekme, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre çelik lif donatılı betonların, şekil değiştirme ve sehimlerinin yalın harç numunelerinin en az 10 katı, çekme ve eğilme dayanımı ise yalın betonun en az 3 katı olduğu belirtilmiştir.

Nagarkar ve diğ., [87] yaptıkları çalışmada, liflerin eklenmesiyle basınç, yarma çekme ve eğilme dayanımı arttarken betonun işlenebilirliğinin azaldığını belirtmişlerdir. Deneyler sonucunda narinliği 105 olan liflerin %0,5 hacim oranında kullanıldığı çelik lif donatılı betonun basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımının %13-%40 arasında arttığı bulunmuştur.

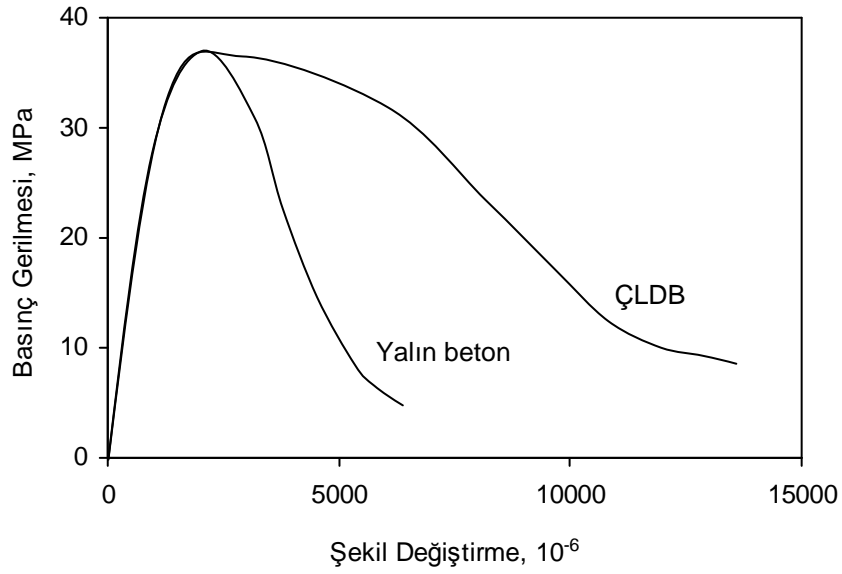
Düzgün ve diğ., [88] tarafından yapılan çalışmada sünger taşı (pomza taşı) agregalı betonun mekanik özelliklerine çelik liflerin etkisi araştırılmıştır. Doğal agregaya yerine hacmin %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza taşı ve %0,5, %1 ve %1,5 hacim oranlarında çelik liflerin kullanılmasının betonun mekanik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla üretimler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre çelik lif oranının artmasıyla yalın numunelere göre, karışımda çelik lif oranının artmasıyla; birim

ağırlık, basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı sırasıyla %8,5, %21,1, %61,2 ve %120,2 oranında arttığı belirtilmiştir.

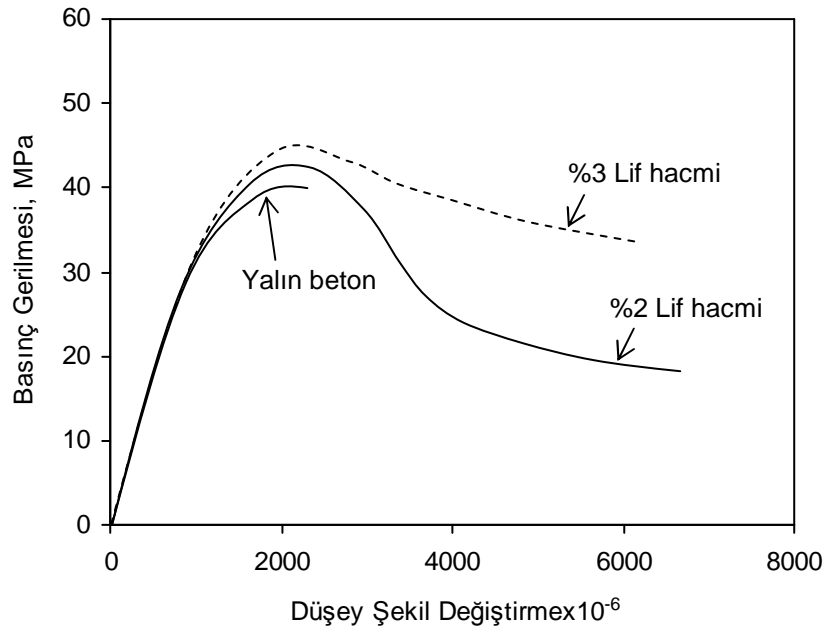
2.6.2.1 Basınç dayanımı ve elastisite modülü

Betona çelik lif eklenmesinin etkisi, araştırmacıların basınç dayanımlarında hafif bir şekilde azalmadan etkileyici artışlara kadar değişen çeşitli sonuçlar kaydettiklerinden dolayı tam olarak bilinmemektedir. Genel olarak araştırmalar betona çelik lif eklenmesinin, basınç dayanımı üzerinde çok az etkiye sahip olduğunu gösterirken, çelik lif donatılı betonun çatlak sonrası davranışı yalın betona göre önemli oranda değişmekte ve gevreklik azalmaktadır [67].

Basınç altındaki lif donatılı betonun mekanik özellikleri yalın betona göre biraz farklıdır. Lif donatılı beton, basınçta en büyük gerilmeye kadar yalın beton gibi davranmaktadır. En büyük gerilmeye ulaştıktan sonra davranışta önemli farklılıklar görülmektedir. Basınçta gerilme-şekil değiştirme davranışının azalan kısmı veya şekil değiştirme yumuşaması kısmı, lifle donatılmış betonda çok daha sünektir. Bu davranış, beton numunelerde aksel basınçla oluşan aksel çatlakları önleyen ve geciktiren çelik lif donatılı betonun özelliğinden kaynaklanmaktadır. Basınçta, çelik lif donatılı betonun davranışının yalın betonla karşılaştırılması Şekil 2.15’de verilmiştir. Bu şekile göre çatlak sonrası süneklikteki farklılıklar açıkça görülmektedir. Liflerin eklenmesi betonun basınç dayanımını arttırmamaktadır. Basınçtaki bu süneklik artışı, eğilmedeki bir elemanın toplam yapısal sünekliğini artırır. Enerji yutma özelliğindeki artış, yalın betona göre daha sünek bir basınç kırılması da sağlamaktadır. Basınçta çelik lifler, kompozitin çatlak sonrası davranışı ve toklukta büyük artışlara neden olmaktadır. Yalın betona göre farklı oranlarda lif kullanılmasının çatlak sonrası davranışa ve basınç tokluğuna etkisi Şekil 2.16’da gösterilmiştir. Şekil 2.16’ya göre lif hacim oranının artması ile ÇLDB’nin basınç tokluğunun arttığı görülmektedir.



Şekil 2.15 : Basınç altında yalın beton ve ÇLDB'nin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı [89].



Şekil 2.16 : ÇLDB'nin gerilme-şekil değiştirme eğrisine lif hacminin etkisi [90].

Çelik lif donatılı betonun basınç dayanımı üzerinde araştırmalar, Yin ve Hsu [91] tarafından %1 hacim oranında 0,25x0,56x25 mm boyutlu düz pürüzsüz çelik lif donatılı 152x152x38 mm boyutunda plakalar üzerinde yapılan deneylerle başlamıştır. Betona liflerin eklenmesiyle basınç dayanımında en büyük artış yaklaşık olarak %35 olarak belirlenmiştir.

Liflerin eklenmesiyle betonun tek eksenli basınç dayanımındaki en büyük artış Raju ve diğ., [92] tarafından yapılan çalışma sonucunda bulunmuştur. Bu çalışmada,

%0-%3 arasında değişen hacim oranlarında elik lif kullanılmasının betonun basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Deneyler, elik lif ($L/d=50$) donatılı 100 mm ve 150 mm küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Eksenel basınç deneyi sonuçlarına göre lif oranındaki artış ile basınç dayanımının doğrusal olarak arttığı belirtilmiştir. Lif hacim oranı %3 olan numunelerde basınç dayanımında, yalın betona göre %40 daha fazla artış olduğu ifade edilmiştir [92].

Bu etkileyici dayanım artışının tersine Shah ve Rangan [93] tarafından yapılan araştırmada, elik lif donatılı betonun basınç dayanımında yalın betona göre sadece küçük artışlar gözlenmiştir. Bu araştırmada, narinliği 100 ve 25 mm uzunluğunda düz elik lif içeren 50x50x250 mm boyutlu numuneler üzerinde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır.

Traina ve Mansour [94], elik lif donatılı betonda tek ve iki eksenli basınç dayanım deneyleri yapmışlardır. Yapılan çalışmada betonun tek eksenli basınç dayanımının, lif tipi ve oranına bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı kaydedilmiştir. Deneyler, iki farklı lif tipi ve üç farklı lif oranından oluşan elik lif donatılı beton plakalar (152x152x38 mm) zerinde yapılmıştır. Liflerin eklenmesiyle eksenel basınç dayanımında en büyük artış, narinliği 60 olan 25 mm uzunluktaki lifin %1,5 lif hacim oranında kullanıldığı LDB'de %22 olarak belirtilmiştir. İki eksenli basınç altında elik lif donatılı beton her zaman yalın betondan daha büyük bir basınç dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. elik lif donatılı betonun iki eksenli basınç dayanımında en büyük artış, tek eksenli dayanıma göre %85 daha fazla olduğu belirlenmiştir [94].

Naaman [95] tarafından elik lif donatılı betonun basınçtaki davranışı üzerinde şekil değiştirme oranının etkileri araştırılmıştır. elik lif donatılı betonda, %2 hacim oranında elik lifler kullanılmıştır. İki farklı şekil değiştirme oranında elik lif donatılı betonun basınç dayanımı, sırasıyla yaklaşık olarak %12 ve %15 oranında arttığı bulunmuştur. Bu artışların, yalın beton için elde edilen sonuçlarla benzer olduğu belirtilmiştir.

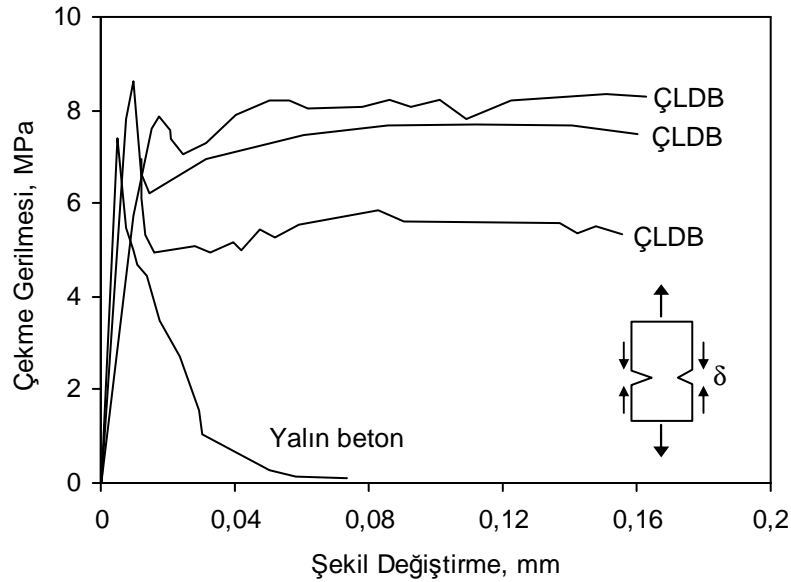
2.6.2.2 Çekme dayanımı

elik liflerin eklenmesi ile betonun çekme dayanımında iyileşme meydana gelmektedir. İlk atlak dayanımında hafif artışlar gözlenirken ilk çatlaktan sonra

tokluktaki artış, pek çok uygulamada çelik lif donatılı betona üstün performans kazandırmaktadır. Tek eksenli çekme deneyi, ÇLDB'nin çekme dayanımını en iyi göstermesine rağmen bu deneyin uygulanma zorlukları diğer yaklaşımları gerektirmektedir [76].

Araştırmacıların tamamı ÇLDB'nin çekme dayanımının bir göstergesi olarak ilk çatlak oluşumundan sonra çekme özelliklerini belirlemek için deney yöntemi olarak silindirik yarma deneyini kullanmasına rağmen ÇLDB için deney metodlarını düzenleyen ACI Komitesi (ACI 544) tarafından bu deney tavsiye edilmemektedir. Bunun nedeni çatlama sonrası silindirik numunelerdeki gerilme dağılımının bilinmemesi ve çatlama koşullarının bulunmasının zorluğudur [67].

Lif donatılı beton numunelerinin (%2 çelik lif hacminde) tipik tek eksenli çekme davranışlarının yalın betonla karşılaştırılması Şekil 2.17'de verilmiştir. İlk çatlak sonrası çekme davranışı üzerinde liflerin önemli oranda bir etkiye sahip olduğu Şekil 2.18'de görülmektedir. Liflerin eklenmesiyle betonun çekme dayanımının önemli oranda artmasıyla birlikte esas olarak ilk çatlak sonrası çekme dayanımındaki iyileşme ÇLDB'nin çekme davranışının en önemli yönüdür.



Şekil 2.17 : Tek eksenli çekme davranışına çelik liflerin etkisi [96].

Shah ve Rangan [93], liflerin yük yönünde yönlendiği ÇLDB'de tek eksenli çekme deneyi uygulamışlardır. Deneyler, narınlığı 100 olan 25 mm uzunluğunda düz çelik lifin kullanıldığı 50x25 mm en kesitli ve 300 mm uzunluğundaki numuneler üzerinde

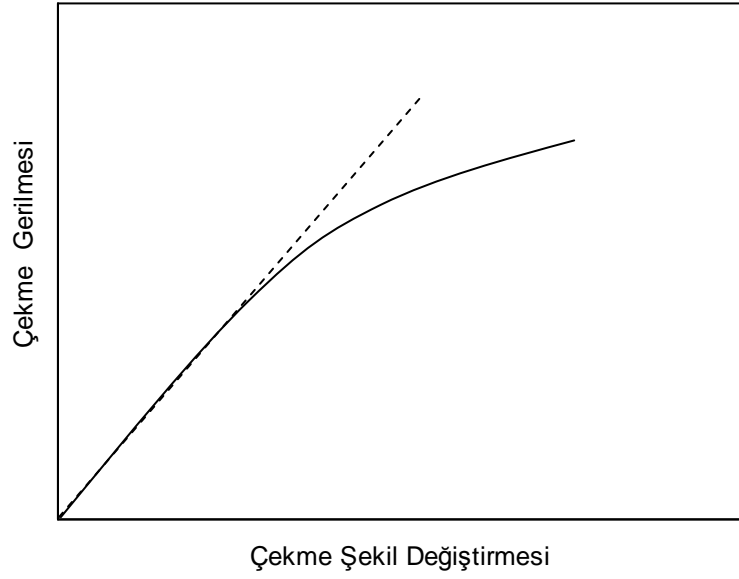
yapılmıştır. Dayanım ve tokluğun lif oranındaki artış ile doğrusal olarak arttığı belirtilmiştir. Yalın betona göre en fazla artış %1,5 lif hacim oranında %250 olarak elde edilmiştir.

Nanni [97] tarafından ÇLDB'nin çekme dayanımının belirlenmesi için silindir yarma deneyi önerilmiştir. Deneyler, üç farklı lif tipinin kullanıldığı 101 mm çapında ve 114 mm uzunluğunda silindir numuneler üzerinde uygulanmıştır. Nanni tarafından yatay eksen boyunca silindirin deformasyonunu ölçmek için lineer bağlantılı deformasyon ölçüm sistemleri ile donatılmış olan silindir numuneler önerilmiştir.

Edgington ve diğ., [98] tarafından çelik lif donatılı 100x100x500 mm boyutlu numuneler üzerinde aksenal çekme ve eğilme deneyleri uygulanmıştır. Tek aksenli çekme dayanımında az bir artış kaydedilirken, etkileyici artış betonun en büyük eğilme dayanımında gözlenmiştir. Çekme ve eğilme dayanımında önemli artışlar sağlayan mekanizma, eğilme numunelerinde tarafsız eksenin yukarı doğru kaymasına neden olmaktadır. Yalın beton için yük-sehim eğrisi ilk çatlak oluşumuna kadar hemen hemen doğrusaldır ve tarafsız eksen aynı konumunda kalmaktadır. ÇLDB numunelerde ilk çatlak oluşumuna kadar yalın betona göre benzer sonuçlar kaydedilmiştir. İlk çatlaktan sonra ÇLDB numuneler ilave yük taşıırken, yalın beton ani bir kırılma göstermektedir [98].

Abdull-Ahad ve Abhas [99], çekmede betonun iki aksenli davranışını araştırmıştır. Deneyler, 300x300x75 mm deney bölgesi beton plakalar üzerinde uygulanmıştır. Yalın beton için en fazla artış, aksenal dayanıma göre %7 olarak belirtilmiştir. Narinliği 100 olan liflerin %1,5 hacim oranında kullanıldığı ÇLDB'de iki aksenli çekme dayanımında en fazla %79'luk bir artış elde edilmiştir.

Lifler, mikro çatlakları durdurma etkisi ile betonun kırılma enerjisini ve çekme dayanımı arttırmaktadır. ÇLDB'de mikro çatlak oluşumunun ilerlemesi ile malzemenin çekme gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde Şekil 2.18'de görüldüğü gibi lineer davranıştan sapmalar meydana gelmektedir.



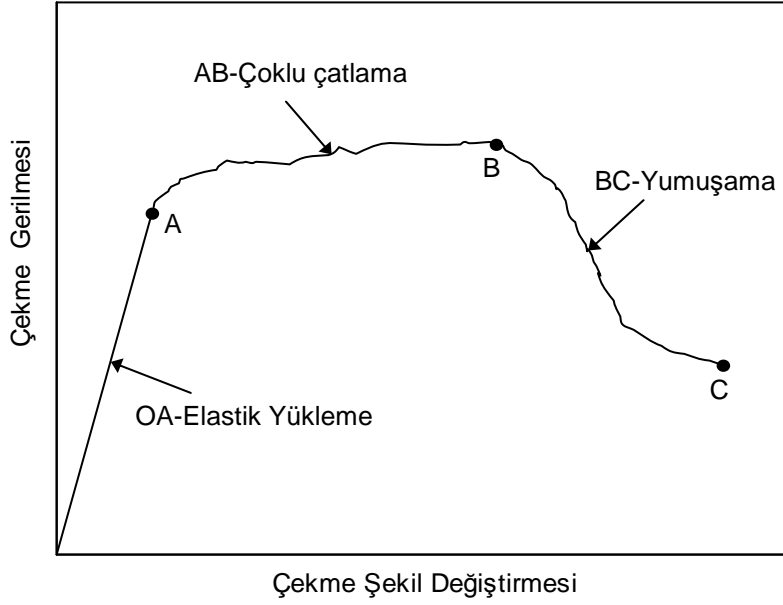
Şekil 2.18 : Lif donatılı betonda lineer davranıştan sapma.

ÇLDB’de tek eksenli çekme gerilmeleri altında en büyük yük değerine, katastrofik bir mikro çatlak gelişimi meydana geldiğinde ve en zayıf bir kesitte sürekli sistemde mikro çatlaklar oluştuğunda ulaşılmaktadır. Mikroskopik ölçümlere dayanarak, tek eksenli çekme altında çelik lif donatılı beton numunelerde meydana gelen tek çatlak en büyük yükten hemen sonra oluşmaktadır. Çekme deformasyonları, çatlama bölgesinde yerleşme eğilimindedir ve boşalma çatlama bölgesinin dış kenarında meydana gelir. Bu aşamada artan deformasyonlar, çatlama kesen liflerin yavaş yavaş sıyrılmaya veya kopmasından kaynaklanabilir [100].

ÇLDB’de çekme altında lineer davranıştan sapma, çekme dayanımının yaklaşık %80’inde oluşmaktadır. Tipik olarak %1-%2 hacim oranında çelik liflerin önemli oranda mikro çatlak durdurma etkisi nedeniyle matrisin çekme dayanımında %20-%25 arasında bir artış elde edilmektedir [101].

Çoklu çatlama gösteren lif donatılı çimentolu kompozit için çekme altında gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 2.19’da verilmiştir. Çekme davranışının tamamı üç bölgeye ayrılabilir. Birinci bölge, kompozitin elastik davranış gösterdiği bölgedir (OA bölgesi). Bu bölgeden sonra matriste çoklu çatlama oluşmaya başlar ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi şekil değiştirme sertleşmesi (AB bölgesi) göstererek lineer olmayan bir şekilde artmaktadır. Son olarak çoklu çatlama bölgesini sınırlayan en yüksek tepe noktasından yük-sehim eğrisinde azalmanın meydana geldiği şekil

değiştirme yumuşaması (BC bölgesi) bölgesidir. Bu aşamanın genişliği lif, matris ve arayüzey özelliklerine bağlıdır.



Şekil 2.19 : Tek eksenli çekme altında şekil değiştirme sertleşmesi gösteren lif donatılı çimentolu kompozitlerin tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı [52].

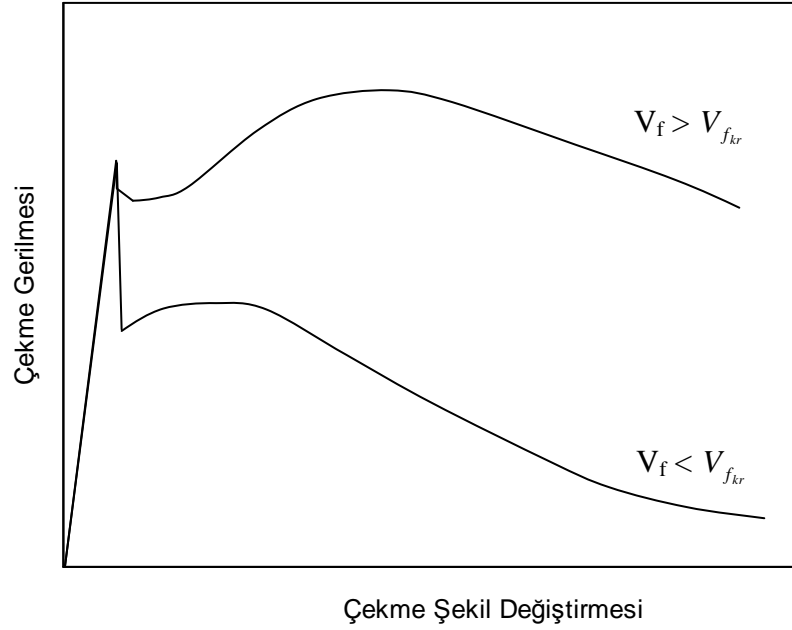
Çekme altında çatlak açıklığı, lifler tarafından çatlak köprülenmesi ve davranışın yumuşama bölgesindeki çatlakta matris çekme dayanımının liflerin etkisiyle artması ile sınırlandırılmaktadır. ÇLDB’de çekme altında yalın betona göre, büyük oranda artan süneklik çatlak sonrası lif sıyrılma mekanizması ile sağlanır.

Lif sıyrılma ve kopması, lif-matris arayüzey özellikleri ve lif uzunluğuna bağlı olarak artan çekme dayanımı, tek eksenli çekme altında ÇLDB’nin çatlak sonrası kırılma mekanizmasını artırma eğilimindedir. Çimento matrisine daha iyi bağlanan uzun lifler, daha yüksek sıyrılma kuvvetlerine sahip olmak eğilimindedir. Bundan dolayı daha uzun lifler, tamamen sıyrılmadan koparlar. Teorik olarak makro çatlakların oluşması ve liflerin sıyrılma performansının harekete geçmesinin ardından iki tip davranış gözlenebilmektedir. Bunlar:

- Artan çekme deformasyonları ile çekme dayanımı artışı ($V_f > V_{f_{cr}}$)
- En büyük yükte ani bir düşmenin ardından gelişen azalma ($V_f < V_{f_{cr}}$)

şeklinde olabilir. Bu iki davranış tipi Şekil 2.20’de verilmiştir. Çatlama sonrasında en büyük noktadan sonra dayanım artışı lif hacim oranının, liflerin sıyrılma etkisi ile dayanımın artması için gerekli kritik bir hacim oranından fazla olması durumunda

meydana gelmektedir. Kritik lif hacim oranı, lif geometrisi, narinliği, yönlenmesi, çekme dayanımı ve lif-matris arayüzey özelliklerine bağlıdır.



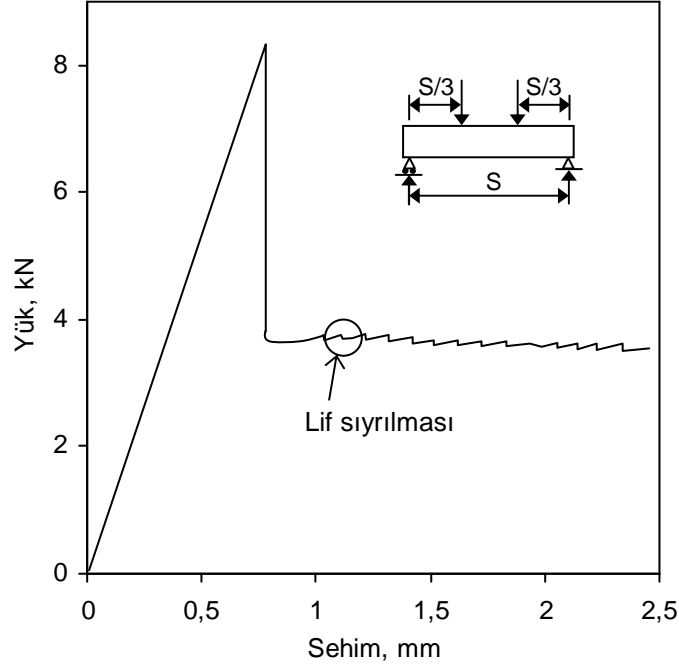
Şekil 2.20 : ÇLDB'nin çatlak sonrası tek eksenli çekme davranışının iki teorik tipi.

Geleneksel karıştırma teknikleri ile üretilen, üç boyutta rastgele şekilde çelik lifle donatılmış betonda, işlenebilirlik sınırlamaları nedeniyle kullanılan lif hacim oranı, genel olarak kritik hacim oranından daha azdır. En büyük çekme gerilmesinde çekme dayanımının ani azalmasını çatlak sonrası bölgede aşamalı yavaş yumuşama takip ettiğinden, ÇLDB'nin tek eksenli çekme davranışında iyileşme gözlenmektedir. Son lif matrsten tamamen sıyrıldığında ve lif uzunluğunun yarısına karşılık gelen büyük çatlak genişlikleri meydana geldiğinde çekme dayanımının sıfıra ulaşması beklenmektedir. Çelik lif donatılı betonun tek eksenli çekme davranışını diğer faktörler arasında lif hacim oranı, narinliği (L/d) ve lif geometrisi (mekanik deformasyon) ile daha fazla etkilendiği gözlenmiştir [102].

2.6.2.3 Eğilme dayanımı

Yalın betona liflerin eklenmesi, eğilme davranışını etkileyerek malzemenin toplam davranışını değiştirmektedir. Yapısal davranışta meydana gelen farklılıklar, lif donatılı betonun çatlak sonrası çekme dayanımı nedeniyle artan moment kapasitesi, artan malzeme sünekliği ve çatlak kontrolüdür.

Eğilme yüklemesinde, çelik lifler eğilme dayanımında büyük bir artış meydana getirmekte ve yalın betonun eğilme tokluğunu iyileştirmektedir. Çelik lif donatılı beton için tipik yük-sehim eğrisi Şekil 2.21’de verilmiştir.



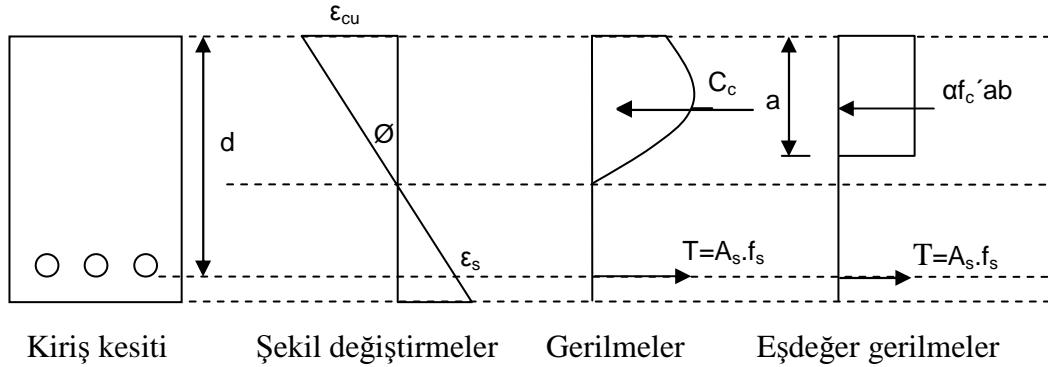
Şekil 2.21 : ÇLDB'nin tipik yük-sehim eğrisi.

Eğilme deneyleri esas olarak üç noktalı eğilme deneyi yöntemine göre uygulanmaktadır. ÇLDB'nin eğilme dayanımında yalın betona göre %50-%70 daha fazla artış olmaktadır. Eğilme dayanımındaki artış aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

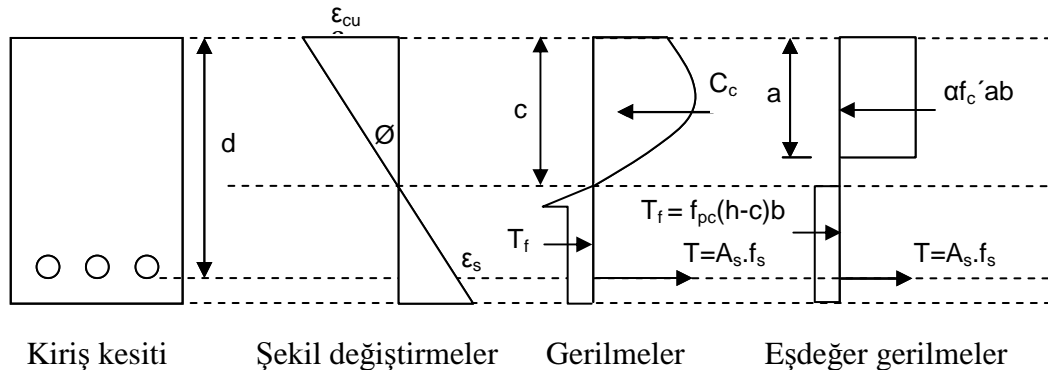
1. Lif Hacmi: Lif hacmi, $0-30 \text{ kg/m}^3$ aralığında enerji yutma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Lif hacmi arttığında, yük-sehim eğrisinin azalan kısmı, çatlak sonrası dayanımdaki artışa bağlı olarak yükselen bir eğri şekline dönüşmektedir. Bununla birlikte yüksek lif hacminde işlenebilirlik çok zayıf olmaktadır.
2. Lif Uzunluğu: Betonun karıştırılması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve masterlanması yeterli olursa, daha yüksek narinlikte uzun liflerin ÇLDB'nin dayanımında bir artışa neden olduğu bilinmektedir. Kancalı çelik liflerin düz çelik liflere göre, artan lif uzunluğu ile birlikte ölçülen enerji yutmasında daha fazla artış olduğu kaydedilmiştir. Lif uzunlukları arasındaki farklılık da yüksek lif hacminde daha az önemlidir.

3. Lif Geometrisi: Lif geometrisi de eğilme dayanımı üzerinde bir etkiye sahiptir. Deneysel sonuçlarına göre kancalı liflerin eğilme dayanımına katkısı, dalgalı lifler ve uçları deforme olmuş liflerden daha büyüktür.
4. Matris Bileşimi: Genel olarak beton matris dayanımındaki artışın daha gevrek beton davranışına neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle yüksek dayanımlı beton matris için aynı oranda süneklik elde etmek için daha fazla lifler gerekmektedir.
5. Diğer Faktörler: Bu faktörler, tokluk indeksleri üzerinde etkisi olan numune boyutu ve çentik açıklığıdır [64].

Geleneksel çelik donatılı beton kirişler için tipik olarak beton çatladığında tarafsız eksenin altındaki betonun çekme yüklerini taşımadığı kabul edilmektedir. Eğilme davranışı üzerinde liflerin etkilerini daha iyi anlamak için eğilmede yalnız ve lif donatılı betonun en kesitlerinin şekil değiştirme uygunluğu ve kuvvet dengesi Şekil 2.22’de ve Şekil 2.23’de gösterilmiştir. Lifle donatılmış beton için çatlak sonrası çekme gerilmesi Şekil 2.23’de sabit bir değer olarak alınmaktadır.



Şekil 2.22 : Eğilmede yalnız beton en kesitinde şekil değiştirme uygunluğu ve kuvvet dengesi.



Şekil 2.23 : Eğilmede lifle donatılmış beton en kesitinde şekil değiştirme uygunluğu ve kuvvet dengesi.

ASTM C 1018-97 standardı, eğilmede kiriş numunelerinin yük-sehim eğrisi altındaki alanla belirlenen tokluk özelliği kullanılarak lif donatılı betonun eğilme performansının değerlendirildiği yaygın bir yöntemidir [103].

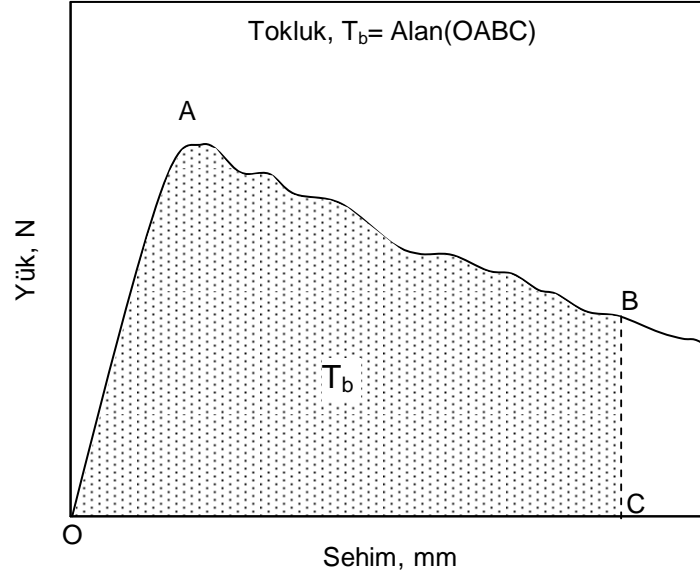
Pigeon ve Cantin [104] tarafından yapılan çalışmada düşük sıcaklıklarda çelik lifle donatılmış betonun mekanik özellikleri, ASTM C 1018 eğilme deneyi standardı kullanılarak belirlenmiştir. Deneyler, normal oda sıcaklığında, -10°C ve -30°C 'de yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda araştırılan değişkenler çimento tipi (normal portland çimentosu ve silis dumanlı çimento), su/bağlayıcı oranı (0,30, 0,35 ve 0,45), lif tipi (dalgalı ve kancalı çelik lif) ve lif hacminden (40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3) oluşmaktadır. Sonuçlara göre, eğilme yüklemesinde ÇLDB'nin tokluğunun sıcaklığın azalması ile birlikte arttığı ifade edilmiştir. Bu artışın, düşük sıcaklıktaki matris dayanımındaki artışla ilgili olduğu belirtilmiştir. Normal ve yüksek performanslı betonda tokluk, her iki lif tipi ve hacim oranında arttığı bulunmuştur. Deneylerde lif geometrisinin etkisinin oldukça küçük olduğu belirtilmiştir [104].

Stavena ve diğ., [105] tarafından iki farklı lif hacminde ve iki farklı çelik lifin kullanıldığı su/çimento oranı 0,50 olan betonlar üzerinde düşük sıcaklıkta eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, sıcaklık azaldığında dayanım ve tokluğun arttığı belirtilmiştir. Düşük sıcaklıktaki dayanım ve tokluğun lif hacmi ile arttığı ifade edilmiştir.

2.6.2.4 Enerji yutma kapasitesi (tokluk)

Basınç, çekme ve özellikle eğilme de çelik lif donatılı beton için dayanımda artışlar gözlenirken, lif eklenmesiyle sağlanan en önemli etki, toklukta artıştır. Tokluk, malzemenin enerji yutma özelliğinin bir ölçüsüdür. Tokluk, Şekil 2.24'de gösterildiği gibi bir yük-sehim veya gerilme-şekil değiştirme altındaki alan ile belirtilmektedir [106].

Yalın beton düşük çekme dayanımı, şekil değiştirme kapasitesi ve kırılma tokluğu nedeniyle gevrek bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Betonun kullanılabilir bir yapı malzemesi yapmak için donatı kullanmak gerekir. Geçmişte beton donatıları, yapının çekme ve kayma gerilmelerine karşı dayanımında önemli bir yeri olan sürekli çelik donatılar ve etriyeler şeklinde olmuştur.



Şekil 2.24 : Tokluğun tanımı.

Son yirmi yıldan beri çok geniş bir ilgiye sahip beton donatısının bir diğer tipi, süreksiz kısa liflerdir. Sürekli donatılar ve süreksiz kısa lifler betonda farklı etkiler yapmaktadır. Geleneksel çelik donatılar betonun çekme ve kayma kapasitesini artırmak için kullanılırken süreksiz kısa liflerin katılması çatlak sonrası davranışını, belirgin bir şekilde süneklik, enerji yutma kapasitesi, çarpma (darbe) ve çatlama dayanımını iyileştirmektedir.

İlk çatlak davranışı üzerinde liflerin etkisi sınırlı iken gevrek beton matrisin çatlamasından sonra lif eklenmesinin etkisi açıkça görülmektedir. İlk çatlak sonrasında bir çatlağı köprüleyen lifler, çatlak önünde çatlağın açılmasını önleyici basınç uygular. Bu çatlağın açılmasını önleyici basınç, çatlak ucundaki gerilme yığılmasını azaltması nedeniyle çatlağın ilerleme eğilimini geciktirir. Çatlak ilerlemesinin önlenmesi ve geciktirilmesinde liflerin etkisi, çatlak ucu bölgesindeki lif-matris arasındaki etkileşime bağlı olarak oluşan çatlak önleyici basınç alanının büyüklüğü ve türüne doğrudan bağlıdır. Çatlak açılması ile lifler matristen sıyrılır ve bu sırada enerji yutulur. Lif sıyrılma sürecinde mikro mekanik düzeyde yutulan bu enerji, makro mekanik düzeyde lifle donatılmış kompozitin tokluğu olarak ortaya çıkmaktadır.

Lifle donatılmış betonun sünekliği veya enerji yutma kapasitesi genel olarak eğilmede bir numunenin yüklenmesi ve yüke karşılık sehim davranışının ölçülmesi ile belirlenmektedir. Yük-sehim davranışı altındaki alan kompozitin eğilme

tokluğunu tanımlar. Eğilme tokluğunu tanımlamak için kullanılan deney standartlarının bazıları ASTM C 1018 ve JSCE-SF4'dür [52].

Tokluktaki artış, çekme ve eğilmedeki yük-sehim eğrisi altındaki alanının artışından kaynaklanmaktadır [53]. Çelik lif donatılı betonun en önemli özelliklerinden birisi olarak kabul edilen tokluk genellikle üç noktalı eğilme yüklemesi ile belirlenmektedir. Tokluk indisleri, ideal elasto-plastik eğilme davranışı ile belirlenen yük-sehim eğrisine (eğrinin belirlenmiş bir kısmı) göre elde edilmektedir. Tokluk indisi, I, ÇLDB'nin belirli sehime kadar olan yük-sehim eğrisi altındaki alanın yalın betonun yük-sehim eğrisi altındaki alana oranı ile belirlenmektedir.

Tokluk indisleri referans numarası (#), elasto-plastik davranış için sehimin belirlenmiş bir katına kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanın ilk çatlak sehimine kadar yük-sehim eğrisi altındaki alana bölünmesini ifade etmektedir [64].

Lif donatılı betonun tokluğunu ölçmek için kabul edilen çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler arasındaki temel farklılık, yapıya uygulanan yükün özelliklerinden dolayıdır. Bu özellikler;

- a) Yükleme tipi: Çekme, basınç veya eğilme yüklemesi
- b) Yükleme sınıfı: Statik, dinamik veya çarpma (darbe) yük olmak üzere iki grupta toplanabilir.

Statik yükleme altındaki eğilme tokluğu, lif donatılı çimentolu kompozitlerin tokluğunu tanımlamak için en yaygın olarak kullanılmaktadır. Statik yükleme altında lif donatılı çimentolu kompozitlerin tokluğunu ölçmek için yutulan enerji esas alınarak çeşitli tokluk tanımlamaları geliştirilmiştir. Örneğin, eğilme, basınç ve çekme tokluğu sırasıyla eğilme, basınç ve çekme deneyleri ile elde edilen tokluğa karşılık gelen bazı tanımlamalardır. Lif donatılı beton uygulamalarında eğilme yüklemesi en yaygın yükleme tipidir.

Lif donatılı betonun eğilme tokluğunun tanımlanması ile ilgili yapılan pek çok çalışma ve geliştirilmiş farklı deney metotları vardır. Bu deney metotlarının çoğunda tokluk statik üç noktalı eğilme düzeneğinde numune tarafından yutulan enerji yük-sehim eğrisi altında kalan alan kullanılarak belirlenmektedir. Bununla birlikte, literatürde ve değişik deney standartlarında farklı tokluk tanımlamaları vardır.

Kasperkiewics ve Skarendahl [57] tarafından çeşitli tokluk tanımlama yöntemleri iki katogoride sınıflandırılmıştır.

- a) Mutlak değer tanımlamaları
- b) Bağlı değer tanımlamaları

a) Mutlak değer tanımlamasına dayanan yöntemler: Herhangi boyuttaki bir numunenin kırılması veya belirli bir sehime kadar numuneyi yüklemek için gereken toplam enerjiyi ölçmektedir. Bu nedenle tokluğun mutlak tanımlaması referans olarak her bir ideal malzemede kullanılmaz. Bu katogoride kalan yöntemler; Japon inşaat mühendisleri birliği (JSCE-SF4), yöntemi Hollanda CUR yöntemi, Belçika standardı (NBN B15-238), Almanya beton birliği (DBV 1996) ve RILEM yöntemidir.

b) Bağlı değer tanımlamasına dayanan yöntemler: Betonun yaklaşık elastik sınıra kadar yutulan enerji veya donatısız matris kırılmasında yutulan enerjinin belirli bir sehime kadar yutulan enerjiye bölümüne dayanan yöntemlerdir. Bu katogoride kalan yöntemler; ASTM C1018, ACI Komite 544 önerileri, Barr indisleri, Fransa standardı P18-409, Wang ve Backer İndeksi, Ward ve Li indisleridir.

Yukarıdaki tokluk tanımlamalarına ilave olarak tanımlanan sınıflamaların dışında çeşitli başka tokluk tanımlamaları da vardır. Bazı araştırmacılar tarafından kırılma tokluğu, yük-sehim davranışı altındaki alanın numunenin net kesit alanına bölümü olarak tanımlanmıştır. Önerilen diğer birkaç metot eşdeğer eğilme dayanımına göre tokluğu tanımlamaktadır. Bazı araştırmacılar, değişik sehimlerde belirlenen çatlak sonrası dayanım olarak isimlendirilen bir parametre ile tokluğu tanımlamışlardır. Benzer şekilde Norveç beton birliğinin püskürtme beton standardında (BP No.7), belirlenmiş sehimlerde kalıcı eğilme dayanımı ile tokluk parametreleri tanımlanmaktadır [57].

Taylor ve diğ., [107] tarafından yapılan çalışmada, normal ve yüksek dayanımlı yalın ve çelik lif donatılı betonların dayanım ve tokluk özellikleri araştırılmıştır. Araştırmada küp dayanımı, kırılma modülleri, silindir yarma ve burulma çekme deney sonuçları ve iki kırılma tipi deney numuneleri (standart üç noktalı eğilmede çentikli kirişler ve aksenal olarak yüklenmiş çentikli küpler) kullanılarak belirlenen

tokluk sonuçları verilmiştir. Tokluk deneylerinde, çatlak ağzı açıklık yerdeğiştirmesi de (CMOD) ölçülmüştür. Normal ve yüksek dayanımlı (120 N/mm² üzerinde) betonlarda çelik lif donatısının benzer etki gösterdiği belirtilmiştir [107].

2.6.2.5 Darbe ve yorulma dayanımı

Çelik lif donatılı betonun yorulma dayanımı üzerinde farklı sonuçlar bulunmuştur. Marris ve Garrett [108], çelik liflerin basınç yüklemesi altında yorulma dayanımına etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte tek eksenli çekme altında betonun yorulma dayanımında, en büyük statik dayanımın yaklaşık %65-%70'i arasında dikkate değer bir iyileşme olduğunu bulmuşlardır.

Çelik liflerin dinamik yük ve yorulmaya karşı dayanımı genel olarak arttırdığı belirtilmektedir [61]. Bu artışın betonda liflerin dağılımı ile ilgili olduğu görülmektedir [109]. Yalın betona göre %15 daha yüksek yorulma dayanımına sahiptir.

Ramakrishnan ve diğ., [110] uçları deformeli tip lifle donatılmış betonda 2×10^6 çevrimde eğilme dayanımının, statik dayanımın %90-%95'i oranında arttığını belirtmişlerdir. Genel olarak artan lif oranı ile yorulma dayanımı artmaktadır.

Naaman ve Hammoud [111], tarafından %2 lif hacim oranında kancalı çelik lif donatılı betonların, yalın betondan iki kat daha fazla tekrarlı yorulma gerilmesi taşıdığını belirtmişlerdir. Yorulma yüklemesi üzerinde lif donatısının olumlu etkisinin gerilme düzeyine bağlı olduğu ifade etmişlerdir.

Cachim ve diğ., [109] basınç yorulma yükleri altında lif donatılı beton ve yalın betonun performansını belirlemek için bir deney programı gerçekteştirmişlerdir. Uçları kancalı iki tip çelik lif (30 mm ve 60 mm) kullanılarak performansları karşılaştırılmıştır. Deney sırasında yorulma modüllerinin değişim oranı, göçmeye kadar olan çevrim sayısı ile güçlü bir şekilde ilişkilendirilmiştir. Betona liflerin ilavesi, kırılma noktasındaki deformasyonda bir artış sağlamıştır. Lif eklenmesi ile betonun yorulma ömrü iyileşmesinin, betonda liflerin dağılımı ile ilgili olduğu görülmüştür. Lifler beton içinde homojen olarak yayılması durumunda, liflerin eklenmesi betonun yorulma ömrü üzerinde olumsuz bir etki yapabileceği belirtilmiştir [109].

2.6.2.6 Büzülme (rötre) davranışı

Lifler, betonun büzülme çatlak genişliklerini azaltmakta ve büzülme hareketini sınırlamaktadır. Lifler çok yönlü çatlak oluşumunu sağlar, çatlak üzerinden gerilme transferi yaparlar ve bu gerilme transferi çatlakların kapanmasına imkan verecek kadar uzun sürebilir. Yüksek çekme dayanımları ile birlikte düşük elastisite modülüne sahip çelik lif donatılı betonların rötre çatlakları normal betonlara oranla daha az olmaktadır [112]. Liflerin büzülme özellikleri üzerinde iyileştirme yapması için matris içerisinde etkili olabilecek yeterli miktarda bulunması gerekmektedir. Ayrıca uzun lifler kuruma rötresinin sınırlandırılmasında daha etkili olmaktadır [113].

Mangat ve Azari [114] yaptıkları çalışmada uçları deforme edilmiş liflerin artan lif hacmi ile birlikte serbest rötreyi %40'a kadar azalttığını belirtmişlerdir. Lif geometrisine bağlı olan sınırlamanın uçları deforme edilmiş liflerde, düz pürüzsüz liflere göre daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Mangat ve Azari tarafından çelik lif donatılı betondaki büzülme için geliştirilen denklem aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{os} \left(1 - 2.45\mu \cdot V_f \cdot \frac{L}{d} \right) \quad (2.1)$$

ε_{fs} : ÇLDB'nin serbest büzülmesi

ε_{os} : Yalın betonun serbest büzülmesi

μ : Lif ile beton arasındaki sürtünme katsayısı (uçları deforme edilmiş lifli beton için 0,04-0,12 arasında)

V_f : Lif hacmi

L/d : Narinlik

Serbest büzülme, büzülme problemlerinin azaltılmasında liflerin etkinliğinin uygun bir göstergesi değildir. Azaltılması gereken büzülme şekil değiştirmesi olmayıp kısıtlanmış rötre ile birleşimlidir. Çelik lifler kısıtlanmış rötre çatlaklarının miktarını ve çatlak genişliklerinin azaltmaktadır. Kuruma rötresi, %1 hacim oranında çelik liflerin eklenmesiyle yaklaşık %15-%20 oranında azalmaktadır [114].

3. ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN PERFORMANSA DAYALI TASARIMI

3.1 Performansa Dayalı Tasarım

Performansa (enerji yutma kapasitesine) dayalı tasarım, çelik lif donatılı betonların çatlak sonrası şekil değiştirme kapasitesi esas alınarak yapılan yeni bir tasarım metodu olarak tanımlanabilir.

Çelik lif donatılı betonlar üzerinde yapılan çalışmalarda, çelik liflerin eklenmesiyle lifli betonun mekanik özelliklerini ve özellikle yalın betona göre ilk çatlak sonrası şekil değiştirme kapasitesini önemli oranda arttırdığı belirtilmektedir. Çelik lif donatılı betonların bu üstün özelliklerinin, yapısal tasarımda ve uygulamada kullanılması amacıyla çeşitli Avrupa ülkelerinde performansa dayalı tasarımlar geliştirilmeye başlanmıştır. Betondan istenilen performansa göre çelik lif donatılı beton karışım tasarımlarının ve performans sınıflarının oluşturulmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Almanya, Avusturya ve İsviçre gibi Avrupa ülkelerinde gevrek olmayan sünek davranış gösteren yapıların tasarımında çelik liflerin betona kazandırdığı belirgin şekil değiştirme kapasitesinin dikkate alındığı karakteristik eşdeğer eğilme dayanımı parametresi kullanılmaktadır [115]. Bazı ülkelerde (Almanya, Avusturya), çelik lif donatılı betonların performansa dayalı tasarımında kullanılan eşdeğer eğilme dayanımlarına (çatlamamış ve çatlak kontrollü) ve çevresel etki sınıflarına göre, (yangına dayanıklı) karışım tasarımları ve resmi olmayan performans sınıfları belirlenmiştir [59].

Günümüzde araştırmacılar tarafından performansa dayalı başka tasarım yaklaşımları da önerilmiştir. Örneğin, Moens ve Nemegeer [116] tarafından tokluk değerlerinin, taşıma gücü eğilme dayanımlarının ve Falkner ve diğ., [117] tarafından kiriş deneylerinden elde edilen eşdeğer eğilme dayanımlarının kullanıldığı yöntemler geliştirilmiştir.

3.2 Performansa Dayalı Tasarım Parametrelerini Tanımlayan Yöntemler

Lif donatılı betonun tokluğu genel olarak eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisi altındaki alan ile belirlenen enerji yutma kapasitesi olarak kabul edilmektedir. Genel olarak tokluk ölçümleri, dört noktalı yükleme düzeneği kullanılarak eğilmede çentiksiz numuneler üzerinde uygulanmaktadır [107].

Gopalaratnam ve diğ., [118] tarafından son yıllarda bu gibi deneylerin temel özellikleri üzerinde genel bir değerlendirme çalışması verilmiştir. Bu çalışmada Avrupa, Kuzey Amerika ve Japonya standartlarındaki tokluk ölçümleri (enerjiye dayalı boyutsuz indisler, enerji yutma kapasitesi, dayanıma dayalı boyutsuz indisler, kalıcı dayanım indisleri, eşdeğer eğilme dayanımı ve sehime dayalı boyutsuz indisler) tanımlanmıştır.

En yaygın şekilde kullanılan tokluk ölçümleri, enerjiye dayalı boyutsuz indislerdir. Bu gibi indislerin pratik uygulaması, Heneger [119] tarafından yapılan çalışmaya dayanan ACI tokluk indisinin kullanılması ile başlamıştır. ACI Komitesi tarafından tokluk indisi, bir lifli beton kirişi kırmak için gerekli enerji miktarının lifli kirişi ilk çatlak noktasına getirmek için gereken enerji miktarına oranı olarak tanımlanmaktadır. Benzer yöntem, Johnston [120] tarafından yapılan çalışmaya dayanan ASTM C 1018 standardının geliştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Bu standartta tokluk göstergeleri, ilk çatlak sehiminin belirli katlarına göre hesaplanan sehim miktarları kullanılarak belirlenmektedir. Barr ve Hasso [121] tarafından önerilen tokluk indisi, ilk çatlak sehiminin iki katına kadar yük-sehim eğrisi altındaki alanın ilk çatlak sehimine kadar olan alanın oranına dayanan ACI yöntemine benzemektedir. Bu tokluk indisi, çeşitli yükleme düzenlemelerine maruz bırakılan çentikli ve çentiksiz numunelerde uygulanmaktadır.

Genel olarak çelik lif donatılı betonların performansa dayalı tasarım yöntemleri, çelik lif donatılı betonun şekil değiştirme kapasitesinin belirlenmesinde yapılan kabuller nedeniyle farklılıklar göstermektedir. Tokluk ölçüm yöntemlerinin bazıları şunlardır:

- 1) ASTM C1018 Standardı (Üç noktalı eğilme yüklemesi kullanılarak lif donatılı betonun ilk çatlak dayanımı ve eğilme tokluğu için deney yöntemi),
- 2) Almanya Beton Birliği Yöntemi (DBV 1996),

- 3) JSCE-SF4 Standardı (Çelik lifle donatılmış beton için deney yöntemi, eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu standardı) ve
- 4) Belçika Standardı (NBN B15-238).

3.2.1 Almanya beton birliği yöntemi (ABBY)

Almanya Beton Birliği [122] tarafından çelik lif donatılı zemin betonlarının tasarımı için iki farklı tasarım yöntemi verilmektedir. Bu tasarım yöntemlerinin birisi, elastik teoriye diğeri enerji yutma kapasitesine göre yapılmaktadır. ABBY’de çelik lif donatılı betonların performansına dayalı tasarımı, enerji yutma kapasitesi yöntemi esas alınarak eşdeğer eğilme çekme dayanımına göre yapılmaktadır. Bu yöntemde eşdeğer eğilme dayanımları, kullanılabilirlik (KSD) ve taşıma gücü (TSD) sınır durumları için tanımlanan iki farklı şekil değiştirme bölgesi bağlı olarak hesaplanan enerji yutma kapasitelerine göre belirlenmektedir. Çelik lif donatılı betonlar için ABBY’ye göre tanımlanan şekil değiştirme bölgeleri, Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : ÇLDB’ler için ABBY’ye göre şekil değiştirme bölgeleri [122].

Şekil Değiştirme Bölgesi	Sınır Durumu	Sehim (mm)
I (küçük sehim durumu)	Kullanılabilirlik (KSD)	$\delta_1 = \delta_o + 0,65$
II (büyük sehim durumu)	Taşıma Gücü (TSD)	$\delta_2 = \delta_o + 3,15$

Almanya Beton Birliği tarafından tanımlanan eşdeğer eğilme çekme dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan sehimlere karşılık gelen şekil değiştirme bölgelerinin grafiksel gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir. Kullanılabilirlik sınır durumu için eşdeğer eğilme çekme dayanımı Şekil 3.1’de ‘A’ ile taşıma gücü sınır durumu için eşdeğer eğilme çekme dayanımı ‘A+B’ ile gösterilen yük sehim eğrisi altındaki alan kullanılarak belirlenmektedir. ABBY’ye göre karakteristik eşdeğer eğilme dayanımı Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

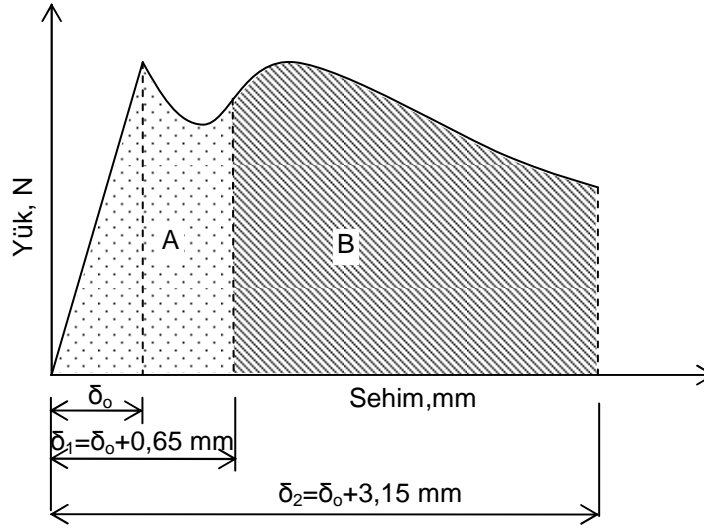
$$f_{eş} = \frac{T_i}{\delta_i} \cdot \frac{S}{bh^2} \quad (3.1)$$

T_i : KSD veya TSD için yük-sehim eğrisi altında kalan alan, Nmm

δ_i : Her bir sınır durumu için belirlenen sehim değeri, mm

$b \times h$: Kiriş kesit alanı, (genişlik x yükseklik) mm

S : Kiriş açıklığı, mm



Şekil 3.1 : ABBY'ye göre tanımlanan şekil değiştirme bölgeleri ve yutulan enerjiler.

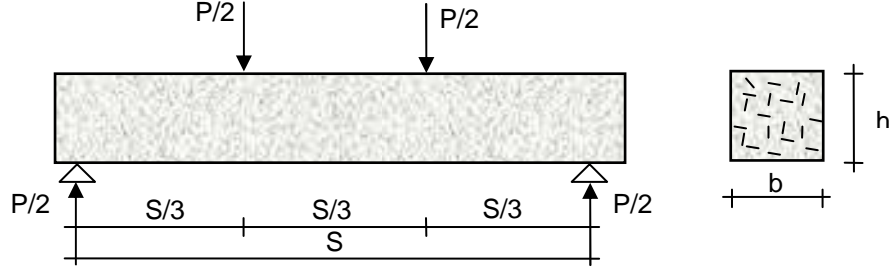
Almanya Beton Birliği, çelik lif donatılı betonlar için performansa dayalı tasarıma göre performans sınıfı kodlamalar kullanmaktadır. Örneğin; C30/37 F 0,9/0,7 XC4 performans sınıfı çelik lif donatılı betonda; C30/37 ifadesi betonun 28 günlük silindir/küp basınç dayanımını, F 0,9/0,7 ifadesi ise kullanılabilirlik/taşıma gücü sınır durumu için eşdeğer eğilme dayanım sınıfını belirtmektedir. XC4 ifadesi de, EN-206-1 Avrupa standardına göre tekrarlı ıslanma kurumada, “karbonatlaşma” çevresel etki sınıfına karşılık gelmektedir [4].

3.2.2 ASTM standardı (ASTM C 1018)

ASTM C 1018 standardı, üç noktadan yüklenmiş çelik lif donatılı beton kirişte ilk çatlak, sehim ve ilk çatlak sehiminin belirli bir katlarına kadar olan sehimler için gereken enerjinin belirlenmesine dayanmaktadır. ASTM C 1018’de standart haline getirilmiş olan tokluk göstergeleri betonun yük sehim eğrisi altında kalan alan cinsinden ifade edilmektedir. Lifli betonun taşıma gücünü yitirmesi için gereken enerji, yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın büyümesi ile artmaktadır. ASTM C 1018’e göre tokluk indisleri seçilen sehim değerine kadar malzeme davranışını tanımlamak için kullanılmaktadır [123].

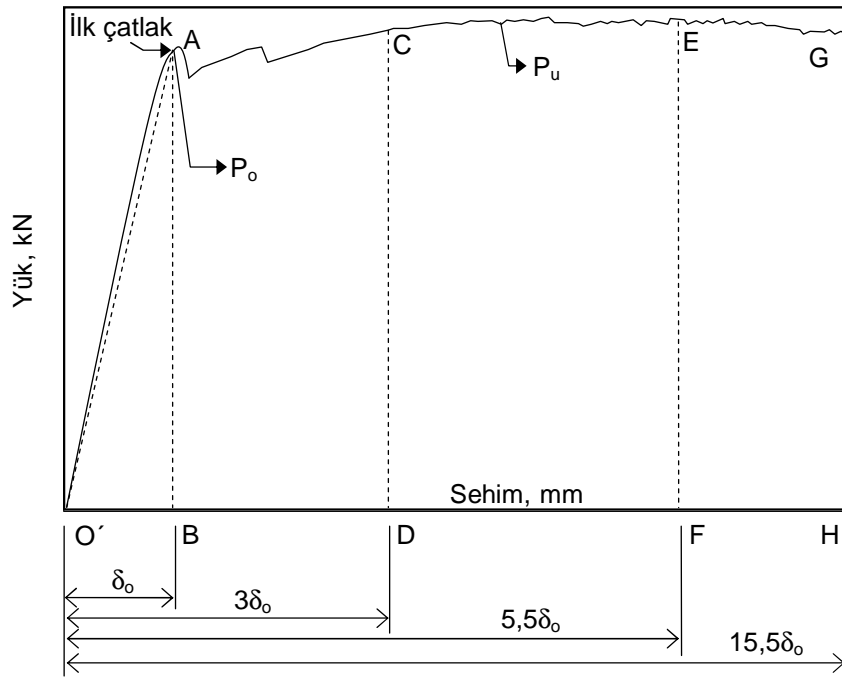
Tokluk indisleri numune özelliklerinden bağımsızdır. Çelik lifli betonların elastik-plastik davranışını açıklayabilmek için geliştirilmiştir. Tokluk indislerinin

hesaplanmasında özellikle ilk çatlak noktasının yerinin belirlenmesi zordur. ASTM C 1018'e göre çelik lif donatılı kiriş numuneler için dört noktalı standart eğilme deneyi düzeneği Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : ASTM C 1018'e göre standart eğilme deney düzeneği.

Bu deney yöntemine göre ilk çatlak, yük-sehim eğrisinde eğrinin yükselen kısmının doğusallıktan saptığı noktadır. Şekil 3.3'de yük sehim eğrisinde yükselen kısımda eğriliğin yukarı veya aşağı doğru olması durumuna göre ilk çatlak tokluğu belirlenmektedir.



Şekil 3.3 : ASTM C 1018'e göre tipik yük-sehim eğrisi üzerindeki tanımlamalar.

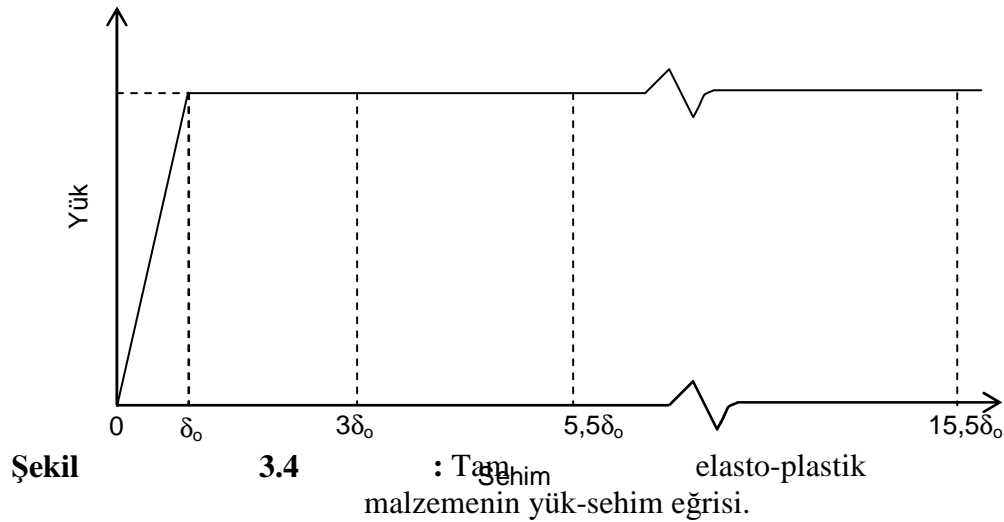
ASTM C 1018 yöntemine göre yapılan tanımlamalar şunlardır:

- Yük-sehim eğrisinin lineer bölümden ilk kez ayrıldığı nokta (Şekil 3.3'de A noktası) tanımlanarak ilk çatlak belirlenir.

- Yük-sehim eğrisinde ilk çatlama karşılık gelen yükü kullanarak ilk çatlama oluşturulan gerilme N/mm^2 cinsinden hesaplanır.
- İlk çatlama sehim, OB uzunluğuna karşılık gelen sehim (δ_0) olarak belirlenir.
- İlk çatlak sehimine kadar yük-sehim eğrisinin altındaki alan belirlenir (Bu alan OAB üçgeni olup ilk çatlak için geçerli olan enerjidir).
- İlk çatlak sehiminin 3 katına ($3\delta_0$) kadar yük-sehim eğrisinin altındaki alan belirlenir. Bu alan Şekil 3.3'deki OACD alanıdır. OD uzunluğu ilk çatlak sehiminin (OB) 3 katına eşittir. Bu alanın, ilk çatlama kadar olan alana bölünmesiyle bulunan sayıya I_5 tokluk indisi denir. Hesaplanan I_5 indisine benzer biçimde diğer indisler (I_{10} , I_{20} ve diğ.) Denklem 3.2'deki gibi tanımlanabilir:

$$I_5 = \frac{A(O'ACD)}{A(O'AB)}, I_{10} = \frac{A(O'AEF)}{A(O'AB)} \text{ ve } I_{20} = \frac{A(O'AGH)}{A(O'AB)} \quad (3.2)$$

Böylece, I_5 , I_{10} ve I_{20} tokluk indislerindeki 5, 10 ve 20 değerleri Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, ilk çatlama kadar olan lineer elastik kısma ve ondan sonra tam plastik sehimlere uygun olmaktadır. Tokluk indislerinin değerinin düşük oluşu, çatlama sonrası dayanımdaki hasarın büyük, enerji yutma yeteneğinin ise az olduğunu göstermektedir.



Çelik lif tipi, hacim oranı, narinliği ve matris parametrelerinin uygun seçilmesi ile tokluk indislerinin 5, 10 ve 20 gibi değerlere ulaşması ve hatta aşılması da mümkündür. Tokluk indisleri çelik lifin tipi, miktarı ve uzunluğuna bağlıdır. Çatlama sonrasındaki farklı aşamalarda hasarın derecesi kalıcı dayanım faktörleri ile de

gösterilebilir. ASTM C1018'e göre kalıcı dayanım faktörleri Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5) \quad (3.3)$$

$$R_{10,20} = 10(I_{20} - I_{10}) \quad (3.4)$$

$R_{5,10}$ ve $R_{10,20}$ gibi kalıcı dayanım faktörleri, ölçülen ilk çatlak dayanımının yüzdesi olarak ilk çatlaktan sonra belirli sehime karşılık gelen alanlarındaki ortalama kalıcı dayanımı göstermektedir. Kiriş deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisinde ilk çatlak oluşuktan sonra malzemenin yük sehim eğrisi tam plastik davranış gösterirse $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}=100$, yumuşama eğilimi gösterirse $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}<100$ olmaktadır. Yalın betonda ise kalıcı dayanım faktörleri sıfırdır ($R_{5,10}$ ve $R_{10,20}=0$). ÇLDB'ler ASTM C 1018'e göre kalıcı dayanım faktörlerine bağlı olarak Çizelge 3.2'de sınıflandırılmaktadır [123].

Çizelge 3.2 : ÇLDB'lerin kalıcı dayanım faktörlerine göre sınıflandırması.

Sınıf	Değerlendirme	Kalıcı Dayanım Faktörü
I	Zayıf	< 40
II	Orta	40-60
III	İyi	60-80
IV	Mükemmel	80-100

3.2.3 Japon standardı (JSCE-SF4)

Japon standardı SF4 yöntemi, mutlak eğilme tokluğu değerini vermektedir. Bu yöntem, en kesiti 150 mm x 150mm, açıklığı 450 mm olan çentiksiz kirişler üzerinde dört noktalı eğilme deneyini önermektedir. Şekil 3.5'de gösterildiği gibi kiriş açıklığının 1/150'sine karşılık gelen sehime değerine kadar olan yük sehim eğrisi altındaki alan kullanılarak Denklem 3.5'e göre eşdeğer eğilme dayanımı ($f_{eş}$) hesaplanmaktadır:

$$f_{eş} = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{S}{bh^2} \quad (3.5)$$

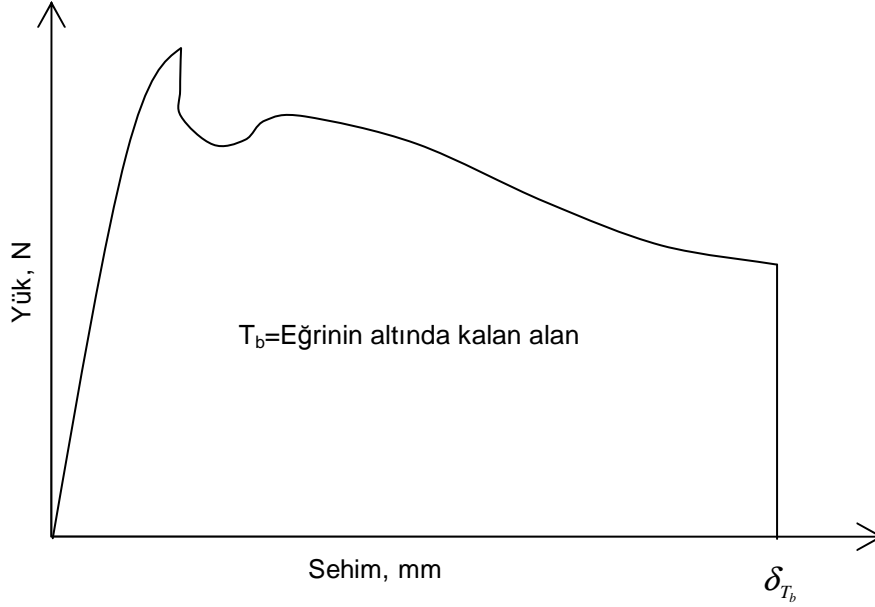
T_b : Kiriş açıklığının 1/150'ne karşılık gelen sehime değeri kadar olan yük sehim eğrisi altındaki alan, Nmm

S : Kirişte mesnetler arası açıklık, mm

δ_{tb} : Kiriş açıklığının 1/150'ne karşılık gelen sehim değeri, mm

b : Kiriş numunesinin genişliği, mm

h : Kiriş numunesinin yüksekliği, mm



Şekil 3.5 : JSCE-SF4 yöntemine göre tipik yük-sehim eğrisi [122].

Japon standardına göre kiriş açıklığının 450 mm olması halinde 3 mm'lik bir sehim elde edilmektedir. Bu sehim, ASTM standardına göre daha fazla bir sehime karşılık gelmektedir. Bu nedenle Japon standardında çelik lifin betona katkısı ASTM standardına göre daha iyi değerlendirilmekte ve donatılı beton daha rasyonel kullanılmış olmaktadır. Yeni hazırlanan Avrupa standartlarında da Japon standardına benzer bir yöntem önerilmektedir [124].

Japon standardında, ASTM yöntemine göre ilk çatlak noktasının belirlenmesi gereği yoktur. Bu yöntemde belirlenen değerler, deney sonuçlarının değişkenliğine karşı duyarlı değildir. Bu yöntem farklı lif tipi içeren ÇLDB ve yalın beton arasındaki farkı ASTM C 1018, Chen ve diğ., [73] tarafından önerilen yöntemlere göre daha iyi göstermektedir. Japon standardı SF4 yönteminin sakıncası, bağıl tokluk değerlerine göre tamamen boyuta bağlı mutlak bir tokluk değeri vermesi ve açıklık genişliğinin 1/150'sinde belirlenen sehimin normal uygulamalara göre çok büyük olmasıdır. Bu yöntem, ilk çatlak ve çatlak sonrası davranışı birbirinden ayırmamaktadır. Bu nedenle farklı davranış gösteren karışımlar teorik olarak aynı tokluk değerine sahip olabilmektedir

3.2.4 Norveç yöntemi (NBP No.7)

Bu yöntem, ASTM ve JSCE yöntemlerinde tanımlanan tokluk kabulünden tamamen farklı bir tanımlamaya dayanmaktadır. Norveç yönteminde, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5’de tanımlandığı gibi belirlenmiş sehimlerde eğilme dayanımı ve kalıcı eğilme dayanımlarına göre lif hacim oranı ve uzunluğu belirlenmektedir. Numune boyutu olarak, 100x100x300 mm numune boyutu öneren daha önceki yöntemlere göre 75x125x450 mm olarak farklı numune boyutu önerilmektedir.

Çizelge 3.3 : Kalıcı eğilme gerilmesi için gereksinimler ve tokluk sınıfları.

Tokluk Sınıfı	Farklı sehimler için kalıcı eğilme dayanımı, MPa	
	1 mm	3 mm
0	Yalın püskürtme beton	
1	Lif tipi ve hacim durumu	
2	2,0	1,5
3	3,5	3,0

Çizelge 3.4 : Çizelge 3.3’de verilen tokluk sınıfları (2,3) için eğilme dayanımları.

Beton Sınıfı	C30	C35	C40	C45	C50	C55
En küçük eğilme dayanımı, MPa	3,8	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0

Çizelge 3.5 : Çizelge 3.3’de verilen tokluk sınıfları (2,3) için lif hacimleri.

Lif uzunluğu (mm)	En küçük lif hacmi, kg/m ³	
	Ortalama değer	Tek değer
≤ 20	≥ 60	≥ 42
21-39	≥ 40	≥ 28
≥ 40	≥ 30	≥ 21

Bu yöntemin üstünlükleri ASTM yöntemine göre, ilk çatlak noktasının belirlenmesi gereği ve sonuçların değişkenliğine karşı hassas olmayan Japon standardı ile aynı olmasıdır. Norveç yönteminin sakıncası sonuçların boyuta bağlı olmasıdır [125].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Deneysel Çalışmanın Kapsamı

Çelik lif donatılı betonların;

- a) Mekanik özelliklerine ve performans parametrelerine; farklı matris dayanımı, lif çekme dayanımı, lif narinlik ve hacim oranının etkilerini belirlemek,
- b) Bazı mekanik özelliklerini ve performans parametrelerini; S/Ç, lif narinliği ve hacim oranına bağlı olarak belirleyen matematiksel modeller vermek,
- c) Farklı yöntemlere göre belirlenen performans (şekil değiştirme kapasitesi/tokluk) parametreleri kullanılarak performansa dayalı karışım tasarımlarının belirlenmesi,
- d) Almanya Beton Birliği Yöntemi'ne (ABBY) göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımlarına ve beton sınıfına bağlı olarak performans sınıflarını belirlemek,
- e) Belirlenen bazı mekanik özelliklerine ve performans parametrelerine göre çoklu sayısal optimizasyon teknikleri kullanılarak en düşük maliyet ve en yüksek performans koşullarında optimum karışım çözümleri vermek

amacıyla üç gruptan oluşan bir çalışma yapıldı.

4.2 Deneysel Çalışma Programı

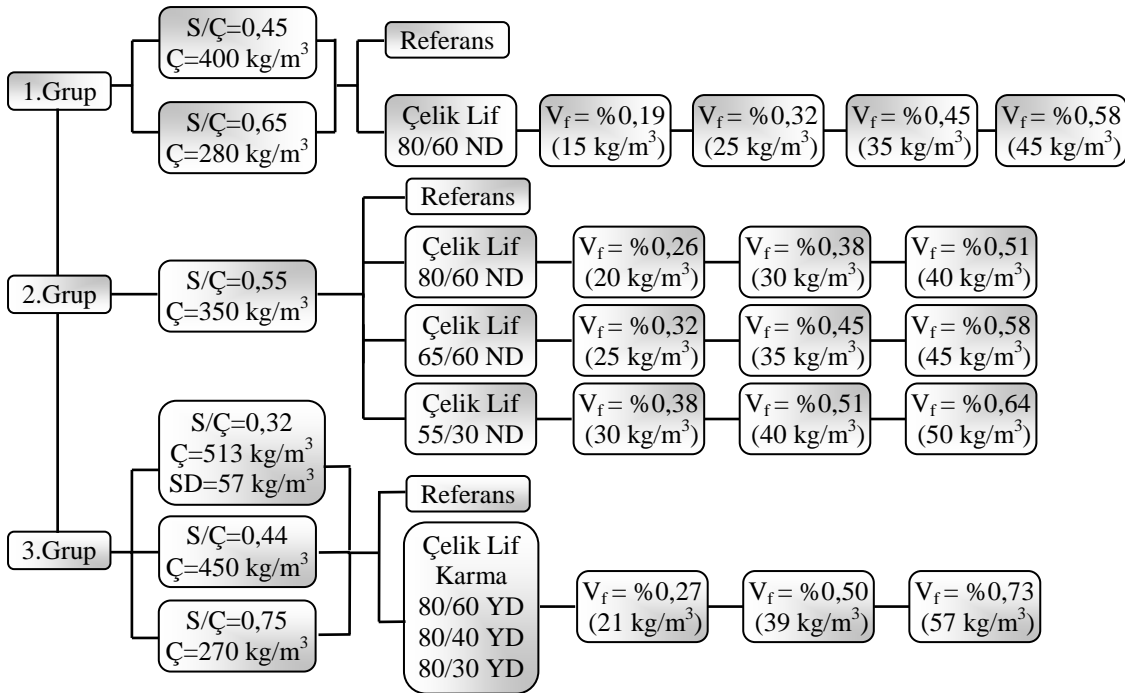
Çelik lif donatılı betonlar üzerinde yukarıda belirtilen çalışma kapsamında uygulanan deneysel program aşağıda verilmektedir.

1. Grup: Normal dayanımlı (ND) kancalı çelik lif (80/60) ve hacim oranının, iki farklı S/Ç oranındaki (0,45 ve 0,65) betonların mekanik ve performans özelliklerine etkisi araştırıldı. İki farklı S/Ç oranında ve dört farklı lif hacim oranında, 2 seri yalın ve 8 seri çelik lifli karışımlar olmak üzere toplam 10 seri beton üretildi.
2. Grup: Aynı S/Ç oranına (S/Ç=0,55) sahip betonlara, farklı narinliğe sahip normal dayanımlı kancalı çelik liflerin, farklı hacim oranlarında eklenmesinin mekanik ve

performans özelliklerine etkisi araştırıldı. Tek S/Ç oranında ve farklı lif hacim oranlarında, bir seri yalın ve 9 seri çelik lifli karışımlar olmak üzere toplam 10 seri beton üretildi.

3. Grup: Aynı narinliğe sahip farklı çap ve uzunlukta yüksek dayanımlı (YD) çelik liflerin, farklı toplam lif hacim oranlarında karma olarak kullanılmasının, üç farklı S/Ç oranına sahip betonların mekanik ve performans özelliklerine etkisi araştırıldı. Çelik lifler, karışımlara toplam lif hacmine eşit oranlarda ilave edildi. Farklı S/Ç ve toplam lif hacim oranlarında, 3 seri yalın ve 9 seri karma çelik lifli karışımlar olmak üzere toplam 12 seri beton üretildi. Tüm gruplarda uygulanan deneysel programın şematik gösterimi Şekil 4.1’de verilmektedir.

Her üç grupta yaklaşık aynı agrega karışım oranlarında ve belirli bir işlenebilirlikte üretilen betonlar üzerinde basınç, elastisite modülü, yarma çekme ve sehim kontrollü dört noktalı kiriş eğilme deneyleri yapıldı.



Şekil 4.1 : Deneysel programın şematik gösterimi.

4.3 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

4.3.1 Çimento

Yalın ve çelik lifli betonlarda, Akçansa Çimento Fabrikası’ndan temin edilen tek tip PC42,5 (CEM I 42,5) çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve mekanik

özelikler Çizelge 4.1’de, kimyasal özellikleri ile karmaşık bileşikleri Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.

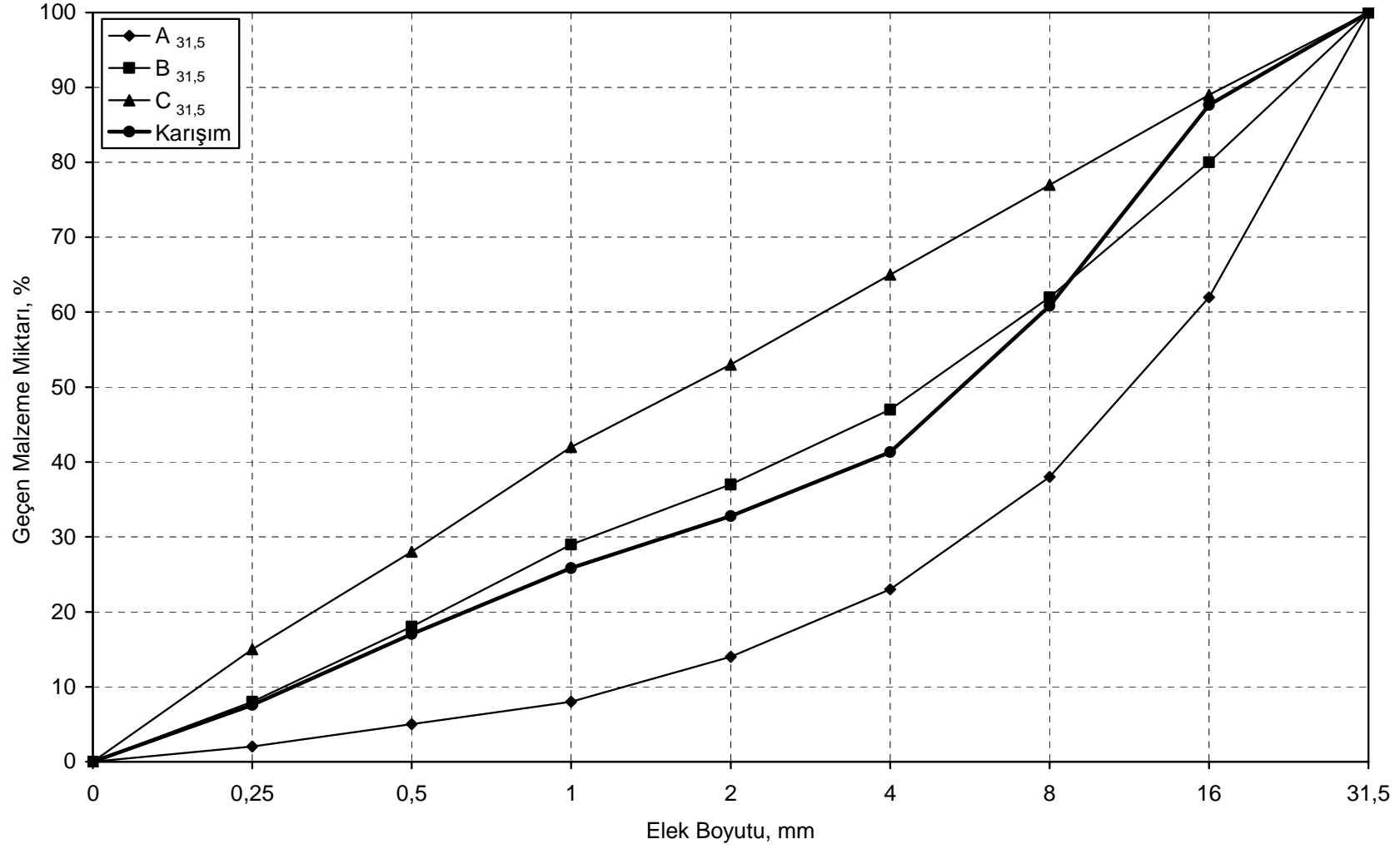
Çimento Türü	Fiziksel Özellikler	
PÇ 42,5 (CEM I 42,5)	Özgül ağırlık, g/cm ³	3,17
	Blaine özgül yüzeyi, cm ² /g	3695
	Su/çimento, %	50
	Priz başlangıcı, dk.	146
	Priz sonu, dk.	189
	Hacim genişmesi (Le Chatelier) , mm	1
	Mekanik Özellikler	
	Basınç Dayanımı N/mm ²	
	1 gün	17,9
	2 gün	28,3
7 gün	41,1	
28 gün	54,0	

Çizelge 4.2: Çimentonun kimyasal özellikleri ve karmaşık bileşikleri

Çimento Türü	Kimyasal Özellikler (%)	
PÇ 42.5 (CEM I 42.5)	SiO ₂	20,82
	Al ₂ O ₃	4,75
	Fe ₂ O ₃	3,65
	CaO	63,75
	MgO	1,30
	SO ₃	2,90
	Karmaşık Bileşikler (%)	
	C ₃ S	52,98
	C ₂ S	19,81
	C ₃ A	6,42
C ₄ AF	11,11	

4.3.2 Agregata

Yalın ve çelik lifli betonlarda iri agregata olarak iki farklı boyut aralığında kalker esaslı kırmataş, ince agregata olarak doğal kum ve kırmataş tozu kullanılmıştır. Agregata karışımında, en büyük agregata boyutu 22 mm’dir. Kullanılan agregaların bazı fiziksel özellikleri ve karışım oranları Çizelge 4.3’de verilmektedir. Karışım agregasına ait tane boyutu dağılımı eğrisi Şekil 4.2’de verilmektedir.



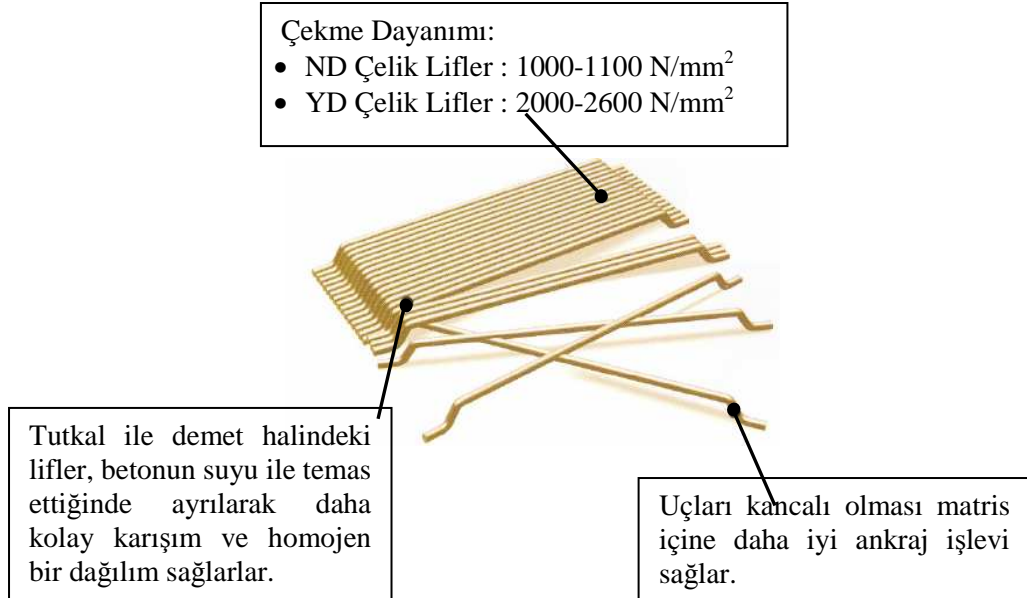
Şekil 4.2 : Karışım agregasının tane boyutu dağılımı eğrisi ve $d_{maks}=31,5$ için karışım agregasına ait sınır eğrileri.

Çizelge 4.3 : Agregaların bazı fiziksel özellikleri ve karışım oranları.

Fiziksel Özellikler	Kaba Agregası		İnce Agregası	
	Kırmataş I	Kırmataş II	Doğal Kum	Taş Tozu
Tane boyut aralığı, mm	4-11	8-22	0-4	0-5
Özgül ağırlık, kg/m ³	2,60	2,60	2,57	2,60
Su emme oranı, %	1,40	1,40	1,20	2,00
İncelik modülü	5,9	8,1	1,9	2,4
Karışım oranları, %	31±2	31±2	17±1	21±1

4.3.3 Çelik Lif

Beksa Çelik Tel ve Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilen normal (ND) ve yüksek dayanımlı (YD) iki ucu kancalı tip çelik lifler kullanılmıştır. Çelik lif tiplerinin sembolik gösteriminde; ilk sayı lif narinlik oranını, “/” işaretinden sonraki sayı mm olarak lif uzunluğunu ve en son harfli gösterim ise lif çekme dayanımı sınıfını ifade etmektedir. Örneğin; 80/60 ND, narinliği 80 ve uzunluğu 60 mm olan normal dayanımlı çelik lifi göstermektedir. Çelik lif çekme dayanımı 1000-1100 N/mm² arasında olan çelik lifler normal dayanımlı, 2000-2600 N/mm² arasında olan lifler ise yüksek dayanımlı çelik lifler olarak sınıflandırılmıştır. Uçları kancalı olan çelik lifin şematik gösterimi ve özellikleri Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Farklı dayanım ve narinliğe sahip çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.4’de ve fotoğrafları Ek A’da verilmektedir.



Şekil 4.3 : Uçları kancalı tip çelik lif ve özellikleri.

Çizelge 4.4 : Çelik liflerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Lif Tipi	Boy mm	Çap mm	Narinlik L/d	Yoğunluk gr/cm ³	Çekme Dayanımı N/mm ²	Lif Miktarı Lif sayısı/kg
80/60 ND	60	0,75	80		1050	4600
65/60 ND	60	0,90	65		1000	3200
55/30 ND	30	0,55	55	7,85	1100	16750
80/60 YD	60	0,71			2000	5000
80/40 YD	40	0,50	80		2600	15000
80/30 YD	30	0,38			2300	34000

4.3.4 Kimyasal katkı

Çelik liflerin, tekli olarak kullanıldığı karışımlarda 90-130 mm, karma olarak kullanıldığı karışımlarda 100-180 mm arasında değişen çökme değerlerine sahip belirli bir işlenebilirlikte yalın ve çelik lifli betonlar üretilmiştir. Kimyasal akışkanlaştırıcılar belirli işlenebilirlik için artan lif hacmi ile birlikte çimento miktarına oranla %0,7-%2 arasında değişen miktarlarda kullanılmıştır. Her bir grup çalışmada kullanılan kimyasal katkı türü, yoğunluğu ve karışım miktarları Çizelge 4.5’de verilmektedir.

Çizelge 4.5 : Kimyasal katkı türü ve miktarları.

S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi %	Kimyasal Katkı		
			Türü	Yoğunluk gr/cm ³	Miktarı %
0,45	80/60 ND	0,19-0,58	AGS	1,210	1,35-1,65
0,65			NP	1,160	1,00-2,00
0,55	80/60 ND	0,26-0,51	AGS	1,210	1,35-1,60
	65/60 ND	0,32-0,58			
	55/30 ND	0,38-0,64			
0,32	80/60 YD	0,27-0,73	Glenium 51	1,094	1,40-1,70
0,44			AGS	1,210	1,35-1,80
0,75			MR 40W	1,180	0,70-1,30

4.3.5 Mineral katkı

DeneySEL çalışma kapsamındaki 3. grup çalışmalarda S/Ç=0,32 olan yüksek matris dayanımlı karışımlarında, mineral katkı olarak Elkem firmasından temin edilen silis dumanı (Micro Silica Grade 940U) kullanılmıştır. Silis dumanı, çimento ile yer değiştirilerek çimento miktarının %10’u oranında karışımlara katılmıştır. Yüksek inceliğe ve aktif puzolanik özelliğe sahip olan silis dumanı, çimento hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek betondaki en zayıf bölge

olan çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı artırmaktadır. Kullanılan silis dumanına ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 4.6’da verilmektedir.

Çizelge 4.6 : Silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler.

Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık, gr/cm ³	2,34
Özgül Yüzey, cm ² /gr	4240
0,045 mm elek üstü malzeme miktarı, %	79,2
0,090 mm elek üstü malzeme miktarı, %	57,5
0,200 mm elek üstü malzeme miktarı, %	25,4
Kimyasal Özellikler, %	
SiO ₂	96,74
Al ₂ O ₃	0,42
Fe ₂ O ₃	0,35
CaO	0,14
MgO	0,20
SO ₃	0,18
Na ₂ O	0,15
K ₂ O	0,28
H ₂ O	0,20
Klorür (Cl)	0,0064
Kızdırma Kaybı	1,40

4.4 Beton Karışımlarının Özellikleri ve Numunelerin Üretimi

Deney numunelerinin üretimi ve kürü, Akçansa Çimento San. Tic. A.Ş.’ye ait Betonsa Teknoloji Merkezi’nde yapılmıştır. Çalışmada, S/Ç oranları 0,45 ve 0,65 olan karışımlara lif narinliği 80 olan normal dayanımlı çelik liflerin değişik oranlarda tekli olarak katıldığı 1. grupta 10, S/Ç oranı 0,55 olan karışımlara lif narinliği 80, 65, 55 olan normal dayanımlı çelik liflerin tekli olarak farklı oranlarda katıldığı 2. grupta 20 ve S/Ç oranları 0,32, 0,44 ve 0,75 olan karışımlara farklı çap ve uzunlukta narinliği 80 olan yüksek dayanımlı çelik liflerin üç farklı hacim oranında karma olarak katıldığı 3. grupta 12 seri olmak üzere toplam 32 seri beton üretilmiştir. Her bir seride üretilen numune boyutları ve sayıları Çizelge 4.7’de, üretilen karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Çizelge 4.8’de verilmektedir.

Çelik lif donatılı beton karışımların üretimi sırasında izlenen işlem sırası:

- Lifli beton üretiminde önce agregalar büyük boyuttan küçük boyuta doğru miksera boşaltılıp çimento ve mineral katkı (S/Ç=0,32) ilave edilerek kuru olarak betoniyerde karıştırıldı.

- Karışım suyunun bir kısmı kimyasal katkı ile karıştırıldıktan sonra geri kalan karışım suyu betonyere ilave edilip karıştırıldı.
- Sulandırılmış kimyasal katkı karıştırma işlemi sırasında betonyere dökülüp karıştırıldıktan sonra çelik lifler yavaşça serpilerek ilave edildi.
- Çelik lifler taze beton karışımında homojen bir şekilde dağılana kadar dikkatli bir şekilde karıştırıldı. Karıştırma sonrası çelik lifli taze beton karışımına ait bir fotoğraf Şekil 4.4'de gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Çelik lifli taze beton karışımı.

Birbirlerine özel tutkalla tutturulmuş olan demetler halindeki çelik lifler beton karışımında su ile temas ettiğinde hemen çözüldüğünden lifler homojen olarak dağılmakta ve olası topaklanmalar önlenmektedir.

Üretilen betonlar, her bir deney için farklı boyuttaki kalıplara dökülerek vibrasyon masası/vibratör ile sıkıştırılarak yerleştirildi. Kalıplara yerleştirilen betonlar yaklaşık 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kirece doymun kür havuzunda 28. güne daha sonra 56. güne kadar laboratuvar ortamında tutuldu.

Üretilen yalın ve çelik lifli karışımlar şu şekilde kodlandırıldı: İlk rakam yüzde olarak S/Ç oranını, sonrasındaki harf kullanılan çelik lifin çekme dayanımı sınıfını (N ise normal çekme dayanımlı, Y ise yüksek çekme dayanımlı), ardından gelen rakam çelik lif narinlik değerini ve '-' sonrasındaki rakam çelik lif hacmini onbinde olarak belirtmektedir. Örneğin; 45N80-19 kodlu karışım, S/Ç oranı 0,45 olan bir matris, normal çekme dayanımlı ve narinliği 80 olan çelik lifin %0,19 hacim

oranında ilave edildiği karışımı göstermektedir. Üretilen karışım kodları ve karışım özellikleri Çizelge 4.8’de verilmektedir.

Çizelge 4.7 : Her bir deney için üretilen numune boyutları ve sayıları.

Deney	Numune Şekli	Boyutlar (mm)	Her bir serideki numune sayısı
Basınç Dayanımı	Silindir	Ø150x300	3
	Küp	150x150x150	
Elastisite Modülü	Silindir	Ø150x300	3
Yarmada Çekme	Disk	Ø150x60	6
Dört Noktalı Eğilmede Çekme Deneyi	Çentiksiz Kiriş	150x150x750	4

4.5 Numunelerin Deneylere Hazırlanması

Üretilen farklı boyuttaki numuneler üzerinde deneyler uygulanmadan önce yapılan işlemler:

- Silindir numunelerin tek yüzeyine başlık yapıldı ve ağırlıkları bulundu.
- Yarma çekme numuneler üzerinde standart deney çubukları kullanılarak uygulanacak yükün yerleri belirlenerek işaretlendi. Numune boyutları ölçüldü.
- Kiriş numuneler üzerinde yükleme noktaları belirlenerek işaretlemeler yapıldı. Numunelerin boyutları ölçüldü ve ağırlıkları tartıldı.

Deneyler öncesinde ölçüm ve işaretleme yapılmış numunelere ait fotoğraflar Ek B’de verilmiştir.

4.6 Beton Deneyleri

4.6.1 Taze beton deneyleri

Üretilen taze beton karışımlarının kıvamını ve taze birim hacim ağırlığını belirlemek için çökme ve birim ağırlık deneyleri yapıldı.

4.6.1.1 Taze birim ağırlık deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi, beton üretimi sırasında birim ağırlık kabı olarak kullanılan küp kalıplarına taze beton karışımı iki seferde dökülüp vibrasyonla

yerleştirilmek suretiyle TS 2941'e [126] uygun olarak yapıldı. Taze birim ağırlık deneyi sonuçları izelge 4.8'de verilmektedir.

4.6.1.2 Çökme deneyi

Çökme deneyi, TS EN 12350-2'ye [127] göre taze beton betonun işlenebilirliği hakkında fikir edinebilmek ve kıvamını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deney, belirli bir yöntemle betonla doldurulan çökme konisinin yukarı kaldırılması ve taze betonun kendi ağırlığı ile yayılması sonrasında taze betonda ilk konumuna göre meydana gelen yükseklik farkı ölçülerek yapılmıştır. Bu yükseklik kaybına göre de taze betonun çökme değeri belirlenmiştir. Üretilen yalın ve elik lifli beton karışımlarına ait çökme deneyi sonuçları ve belirlenen diğer taze beton özellikleri izelge 4.8'de verilmiştir.

4.6.2 Sertleşmiş beton deneyleri

Laboratuar ortamında 20 ± 2 °C sıcaklıkta kirece doygun suda 27 gün kür edilen ve 56. güne kadar laboratuarda tutulan yalın ve elik lif donatılı beton numuneler üzerinde yapılan sertleşmiş beton deneyleri aşağıda verilmektedir.

4.6.2.1 Basınç dayanımı deneyi

Üretilen yalın ve elik lifli silindir ve küp numuneler üzerinde TS EN 12390-3'e [128] uygun olarak basınç deneyleri yapılmıştır. Tek tip elik lifli silindir ve küp numunelerde basınç deneyleri, 200 ton kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak 0,3-0,5 N/mm²/sn yükleme hızında uygulanmıştır. Karma elik lifli silindir numuneler üzerinde basınç deneyleri, 1mm/dakika Şekil değiştirme hızında 500 ton kapasiteli INSTRON marka kapalı çevrimli deplasman kontrollü yükleme makinesi ile yapılmıştır. Numuneler üzerinde iki farklı noktadan bilgisayar bağlantılı deney sistemi ile kaydedilen düşey deformasyon değerleri kullanılarak numunelerin kırılma sonrasındaki basınç gerilmesi-düşey Şekil değiştirme eğrileri de elde edilmiştir. Küp ve silindir basınç deneyi uygulamasına ait fotoğraflar Ek C'de verilmektedir.

Çizelge 4.8 : Karışımlardaki malzeme miktarları ve taze beton özellikleri.

Seri Özellikleri ve Kodları					Malzeme Miktarları							Taze Beton Özellikleri			
Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi %	Seri Kodu	Çimento kg	Su kg	K.taş I kg	K. taş II kg	Kum kg	K. taş tozu, kg	Katkı %	B.Ağırlık kg/m ³	Çökme mm	Kompa. %	Hava %
1	0,45	Yalın	0	45-NB	400	180	541	541	362	297	1,35	2336	110	80,1	1,4
		ND 80/60	0,19	45N80-19							1,35	2347	90	80,0	1,6
			0,32	45N80-32							1,45	2352	90	79,8	1,8
			0,45	45N80-45							1,55	2353	95	79,5	2,1
			0,58	45N80-58							1,65	2366	110	79,5	2,0
	0,65	Yalın	0	65-NB	280	182	578	578	387	317	1,0	2317	100	80,3	1,3
		ND 80/60	0,19	65N80-19							1,2	2321	70	79,9	1,8
			0,32	65N80-32							1,5	2303	100	78,9	2,9
			0,45	65N80-45							1,8	2320	100	79,0	2,5
			0,58	65N80-58							2,0	2318	100	78,6	3,0
2	0,55	Yalın	0	55-NB	350	193	546	546	366	300	1,35	2325	130	79,5	0,6
		ND 80/60	0,26	55N80-26							1,5	2340	120	79,2	0,8
			0,38	55N80-38							1,6	2312	125	77,9	1,4
			0,51	55N80-51							1,6	2341	125	78,6	1,6
		ND 65/60	0,32	55N65-26							1,5	2356	130	79,6	1,4
			0,45	55N65-38							1,5	2353	130	79,1	1,9
			0,58	55N65-51							1,6	2368	100	78,4	1,7
		ND 55/30	0,38	55N55-26							1,5	2362	100	79,6	1,3
			0,51	55N55-38							1,5	2355	100	79,0	2,0
			0,64	55N55-51							1,6	2356	105	78,7	1,4

Çizelge 4.8 (Devamı) : Karışımlardaki malzeme miktarları ve taze beton özellikleri.

Seri Özellikleri ve Kodları					Malzeme Miktarları							Taze Beton Özellikleri			
Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi %	Seri Kodu	Çimento kg	Su kg	K. taş I kg	K.taş II kg	Kum kg	K.taş tozu kg	Katkı %	B.Ağırlık kg/m ³	Çökme mm	Kompa. %	Hava %
3	0,32	Yalın	0	32-NB	517 *53	182	478	462	363	287	1,4	2365	150	0,804	1,26
		YD	0,27	32Y80-27							1,5	2366	180	0,805	1,24
		80/60	0,50	32Y80-50							1,6	2372	170	0,806	1,01
		80/40	0,73	32Y80-73							1,7	2380	180	0,809	0,70
	0,44	Yalın	0	44-NB	450	198	521	504	350	302	1,35	2333	150	0,781	1,32
		YD	0,27	44Y80-27							1,4	2331	120	0,788	1,42
		80/60	0,50	44Y80-50							1,5	2341	100	0,791	1,01
		80/40	0,73	44Y80-73							1,8	2349	100	0,793	0,73
	0,75	Yalın	0	75-NB	270	203	583	492	416	328	0,7	2279	120	0,781	1,74
		YD	0,27	75Y80-27							0,9	2285	110	0,783	1,50
		80/60	0,50	75Y80-50							1,1	2279	100	0,780	1,77
		80/40	0,73	75Y80-73							1,3	2273	100	0,778	2,05

* Silis Dumanı, Kompa.: Komposite

4.6.2.2 Elastisite modülü deneyi

Elastisite modülü deneyleri basınç deney numuneleri kullanılarak yapılmıştır. Elastisite modülü deneyinde, numuneler yaklaşık olarak taşıyabilecekleri maksimum yükün 1/3'üne kadar yüklenerek iki ton aralıklarla belirlenen yük değerine karşılık gelen düşey şekil değiştirme değerleri komparatör aparatı kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen yük-düşey şekil değiştirme değerleri kullanılarak hesaplanan gerilme-birim şekil değiştirme değerlerine göre geçirilen doğrusal eğilim çizgisinin eğim değeri ile her bir numuneye ait elastisite modülleri belirlenmiştir. Karma çelik lifli numunelerin elastisite modülü deneyi, şekil değiştirme kontrollü basınç deneyinde numune üzerinde iki farklı noktadan düşey şekil değiştirme ölçebilen bilgisayar bağlantılı elastisite modülü aparatı kullanılarak yapılmıştır. Karma çelik lifli numunelerin elastisite modülleri, şekil değiştirme kontrollü basınç deneyinden elde edilen en büyük basınç yükünün 1/3'üne kadar olan basınç yükü-düşey şekil değiştirme verileri kullanılarak elde edilmiştir. Numunelere ait düşey şekil değiştirme değerleri, iki farklı noktadan alınan değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Elastisite modülü deneyi uygulamasına ait fotoğraflar Ek C'de verilmektedir.

4.6.2.3 Yarmada çekme dayanımı deneyi

Üretilen yalın ve çelik lifli, çapı $d=150$ mm ve yüksekliği $h=60$ mm boyutundaki disk numuneler üzerinde yarma çekme deneyleri TS EN 12390-6'ya [129] göre yapılmıştır. Belirli kür yaşlarındaki numuneler üzerinde, betonun dolaylı olarak çekme dayanımının belirlenmesi amacıyla yarma çekme deneyi yapılmaktadır. Yarma çekme deneyleri, numunelerin alt ve üst kenar yüzeylerine standart ahşap çubukların aynı ekseninde yerleştirilip basınç yükü uygulanması suretiyle yapılmıştır. Deney sonucunda disk numunelerin taşıyabildikleri en büyük yarma çekme yük değerleri belirlenmiştir. En büyük yük değerleri kullanılarak Denklem 4.1'e göre numunelere ait yarma çekme dayanımları hesaplanmıştır. Yarma çekme deneyi uygulamasına ait fotoğraflar Ek C'de verilmektedir.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{2P}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (4.1)$$

σ_{ζ} : Yarma çekme dayanımı, N/mm²

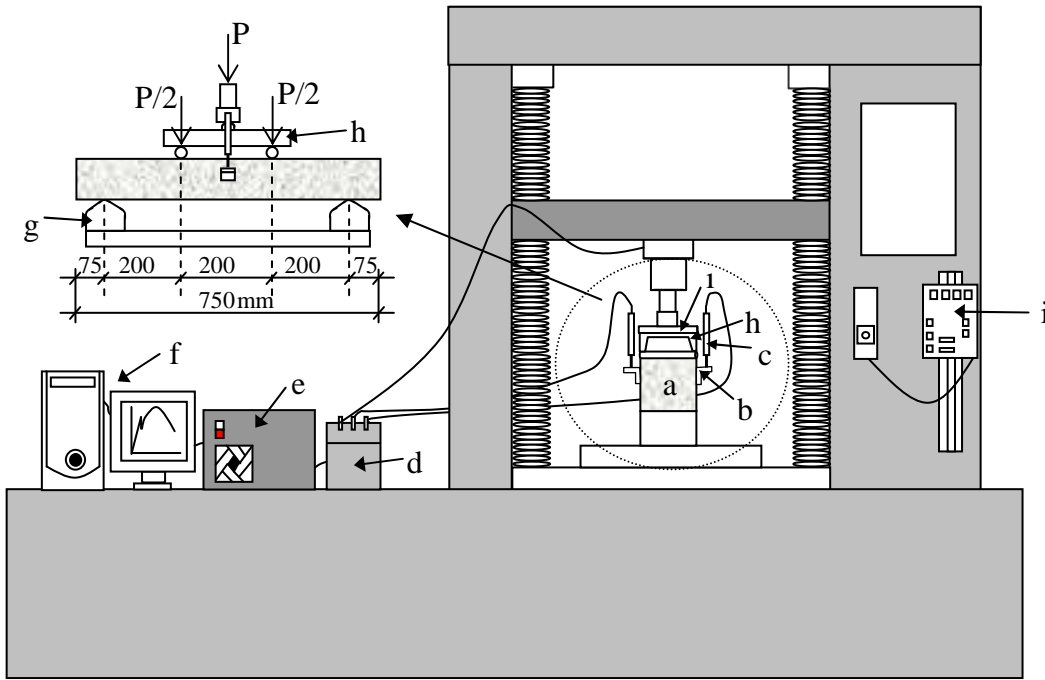
P : Disk numunesinin taşıyabildiği en büyük yük değeri, N

h : Disk numunesinin yüksekliği, mm

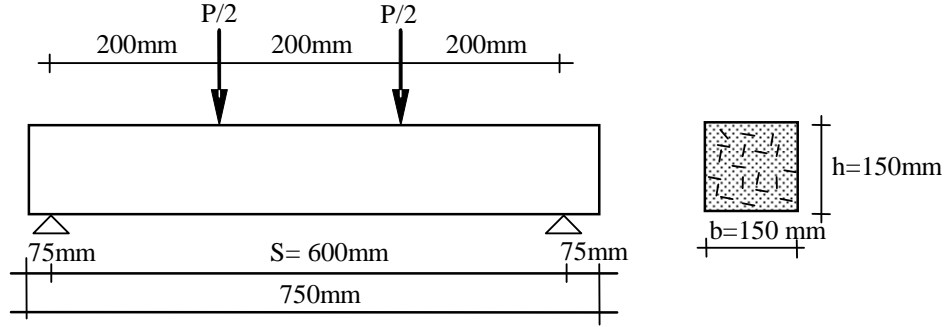
d : Disk numunesinin çapı, mm

4.6.2.4 Dört noktalı kiriş eğilme deneyi

Kiriş eğilme deneyleri, 100 kN kapasiteli INSTRON 5500R tipi kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney düzeneğinde yapılmıştır. Eğilme deney sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.5’de, kiriş eğilme numunelerinin deney yerleşim düzeni Şekil 4.6’da ve dört noktalı kiriş eğilme deneyine ait fotoğraflar Ek C’de verilmektedir. Dört noktalı eğilme deneyleri, 150x150x750mm boyutundaki çentiksiz kiriş numuneler üzerinde ASTM C 1018’de göre uygulanmıştır. Çelik lifli kiriş numunelerde, kiriş ortasında 5 mm sehim elde edilinceye kadar eğilme deneyine devam edilerek yük-sehim değerleri bir veri toplama sistemi ile kaydedildi.



Şekil 4.5 : Kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi ile dört noktalı kiriş eğilme deney sistemi: a) Kiriş numunesi, b) Sehim ölçümünde kullanılan lama şeklinde aparat, c) Deformasyon ölçüm aleti (LVDT), d) LVDT bağlantı ünitesi, e) Yük bağlantı/kontrol ünitesi, f) Veri toplama ünitesi, g) Kiriş alt yükleme plakası ve kiriş mesnetleri, h) Yükleme aparatı, i) Uniform yükleme aparatı, i) Sistem kontrol ünitesi.



Şekil 4.6 : Kiriş eğilme numunelerinin deney yerleşim düzeni.

Sehim değerleri, kirişlerin açıklık ortasında her iki kenar yüzeylerine yerleştirilen bilgisayar bağlantılı deformasyon ölçüm aletleri (LVDT) ile alınmıştır. Yük ve sehim değerleri kullanılarak numunelere ait yük-sehim eğrileri belirlenmiştir. Yalın beton numunelerde, kiriş orta noktasındaki yerdeğiştirme hızı 0,02 mm/dk değerinde sabit tutuldu. Çelik lifli kirişlerde ise 0,5 mm sehime kadar 0,05 mm/dk, 0,5-5 mm sehim aralığında 0,1 mm/dk yerdeğiştirme hızı ile eğilme deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen yük-sehim değerleri kullanılarak numunelere ait ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı, özgül kırılma enerjisi ve tokluk değerleri belirlenmiştir.

Çentiksiz kiriş numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyinden elde edilen en büyük yük değerleri kullanılarak kirişlere etkiyen en büyük moment Denklem 4.2'ye, kirişe ait atalet momenti Denklem 4.3'e göre belirlendikten sonra Denklem 4.4 kullanılarak eğilme dayanımları hesaplanmıştır [130].

$$M_{maks.} = \frac{P_{maks.} \cdot S}{6} \quad (4.2)$$

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (4.3)$$

$$\sigma = \frac{M_{maks.}}{W} \quad (4.4)$$

σ : Eğilme dayanımı, N/mm²

M_{maks} : Kirişe etkiyen en büyük moment, Nmm

P_{maks} : Kirişin taşıyabildiği en büyük yük, N

S : Kirişin mesnetler arası açıklığı, mm

W : Atalet momenti, mm³

b : Kiriş genişliği, mm

h : Kiriş yüksekliği, mm

Yük-sehim eğrisinin altındaki alan kullanılarak çelik lifli beton kiriş numunelerin özgül kırılma enerjisi, RILEM TC 50-FMC'nin [131] önerdiği Denklem 4.5'e göre hesaplanmıştır. Çelik lifli kiriş numunelerin özgül kırılma enerjisi değerleri, $\delta_{son}=5\text{mm}$ sehime kadar olan yük-sehim eğrisilerinin altındaki alanlar kullanılarak elde edilmiştir.

$$G_F = \frac{W_o}{b(h-a)} + \frac{m(1-k)g\delta_m}{b(h-a)} \quad (4.5)$$

$$k = \left(\frac{U}{S} - 1\right) \quad (4.5a)$$

W_o : Yük-sehim eğrisi altındaki alan, Nmm

b : Kiriş numunesinin genişliği, mm

h : Kiriş numunesinin yüksekliği, mm

a : Çentik derinliği, mm

m : Numunenin mesnetler arasındaki ağırlığı, kg

S : Mesnetler arası açıklık, mm

g : Yerçekimi ivmesi, $9,81 \text{ m/san}^2$

U : Kiriş numunesinin tüm uzunluğu, mm

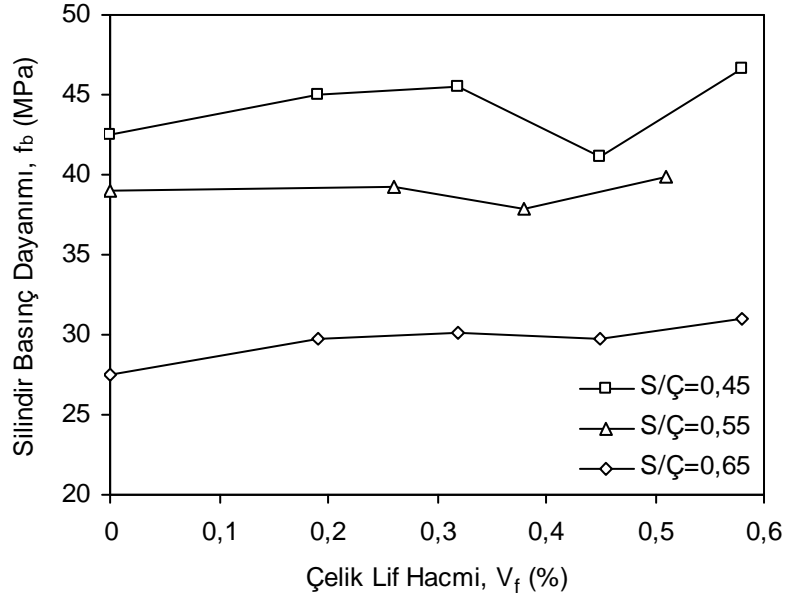
δ_m : Kiriş açıklık ortasındaki sehim, mm

5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

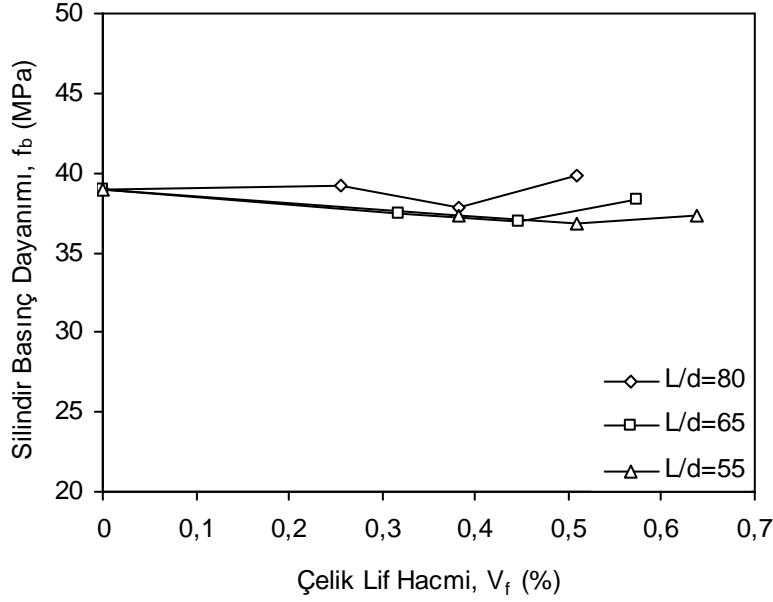
5.1.1 Basınç deneyi

Farklı S/Ç oranındaki yalın beton numunelerin silindir basınç dayanımlarına, farklı narinlikte normal dayanımlı (ND) çelik liflerin tekli olarak değişik hacim oranlarında eklenmesinin etkisi Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmektedir. Her üç S/Ç oranındaki karışımlara, farklı narinlikte ve hacim oranlarında çelik liflerin tekli olarak eklenmesinin, silindir ve küp numunelerin basınç dayanımına önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Çelik lif donatılı betonların silindir basınç dayanımının, yalın betonlarda olduğu gibi S/Ç oranı azaldıkça belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür. Çelik lif donatılı küp ve silindir numunelere ait basınç deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de, farklı dayanım ve narinlikteki çelik liflerin tekli (ND) ve karma (YD) olarak eklenmesinin küp basınç dayanımlarına etkisi de Ek D’de verilmektedir.



Şekil 5.1 : Çelik lif (ND, L/d=80) hacim oranının farklı S/Ç oranındaki numunelerin silindir basınç dayanımına etkisi.

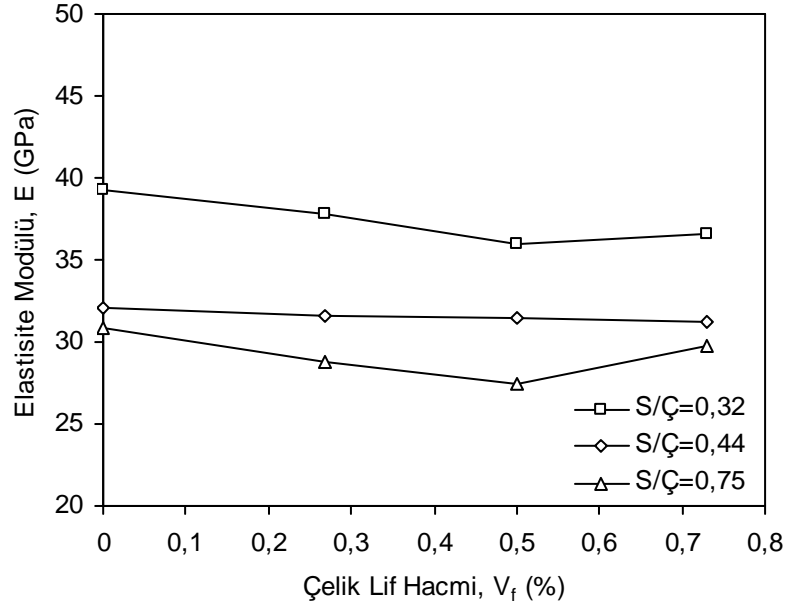
Aynı S/Ç oranındaki ($S/\text{Ç}=0,55$) karışıma farklı narinlikteki çelik liflerin eklenmesinin de silindir basınç dayanımına etkisinin olmadığı Şekil 5.2’de görülmektedir. Ancak karışımda kullanılan çelik lifin narinliği arttıkça biraz daha yüksek silindir basınç dayanımları elde edilmiştir.



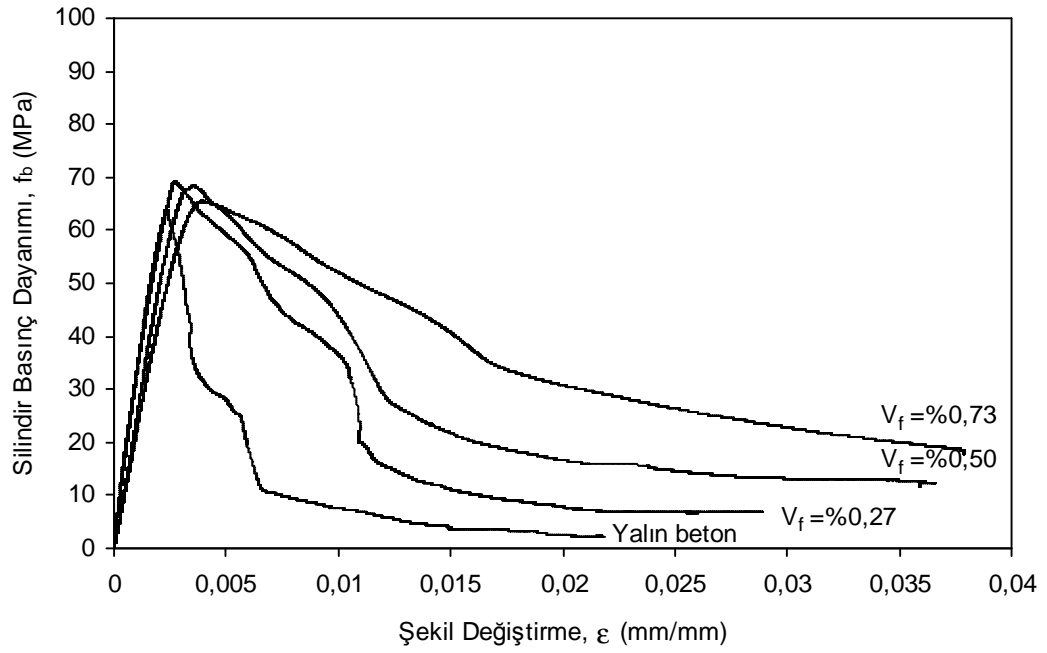
Şekil 5.2 : S/Ç=0,55 olan karışımlarda çelik lif (ND) narinliğinin ve hacim oranının silindir basınç dayanımına etkisi.

Aynı narinlikte ($L/d=80$) ve farklı uzunluklarda (60 mm, 40 mm ve 30 mm) yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak kullanılmasının, farklı S/Ç oranındaki beton numunelerin silindir basınç dayanımına etkisi Şekil 5.3’de verilmektedir. Çelik liflerin (YD) karma olarak eklendiği en düşük S/Ç oranındaki ($S/\text{Ç}=0,32$) numunelerin, silindir basınç dayanımlarında artışlar gözlenmiştir. Yalın betona göre en fazla artış, çelik lif hacim oranı %0,73 olan numunelerde yaklaşık %17 oranında meydana gelmiştir. Bu nedenle yüksek matris dayanımlı karışımlarda yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak kullanılmasının basınç dayanımı bakımından daha etkili olduğu söylenebilir.

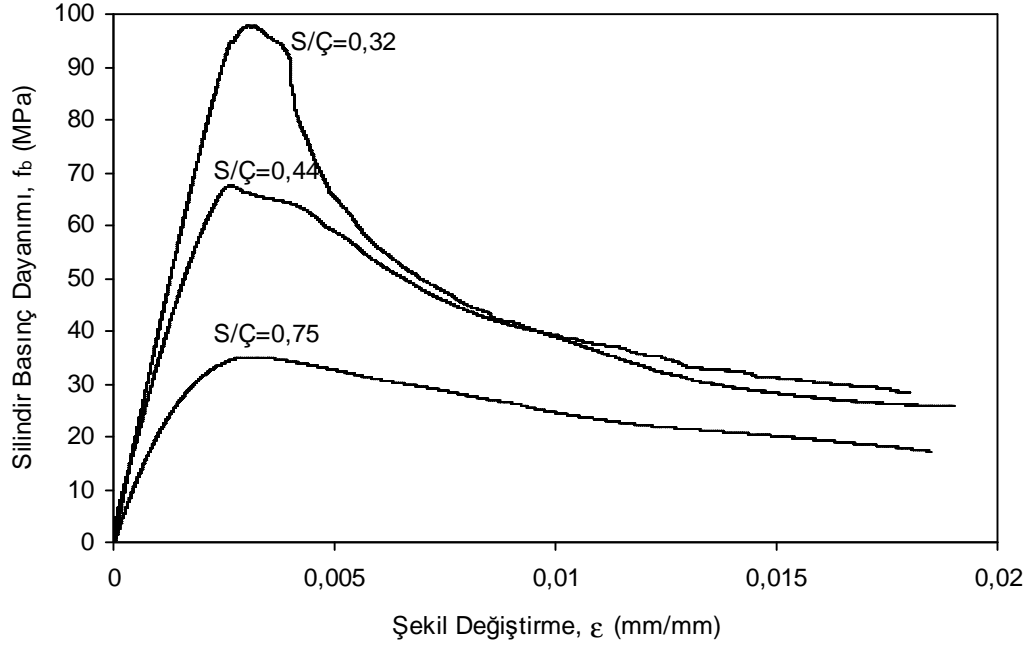
Aynı matris dayanımındaki ($S/\text{Ç}=0,44$) karışımlara farklı lif hacim oranlarında çelik liflerin karma olarak eklenmesinin, betonun basınç dayanımı-şekil değiştirme eğrisine etkisi Şekil 5.4’de, farklı matris dayanımındaki karışımlara aynı oranda çelik lif ($V_f=\%0,73$) eklenmesinin etkisi ise Şekil 5.5’de verilmektedir. Diğer farklı S/Ç ve çelik lif hacim oranına sahip numunelere ait basınç dayanımı-şekil değiştirme eğrileri Ek E’de verilmektedir.



Şekil 5.3 : Farklı S/Ç oranındaki karışımlarda, çelik liflerin farklı hacim oranlarında karma olarak kullanılmasının silindir basınç dayanımına etkisi.



Şekil 5.4 : S/Ç=0,44 olan karışımlara yüksek dayanımlı çelik liflerin (L/d=80) karma olarak artan hacim oranlarında eklenmesinin silindir basınç dayanımı-şekil değişirme eğrisine etkisi.



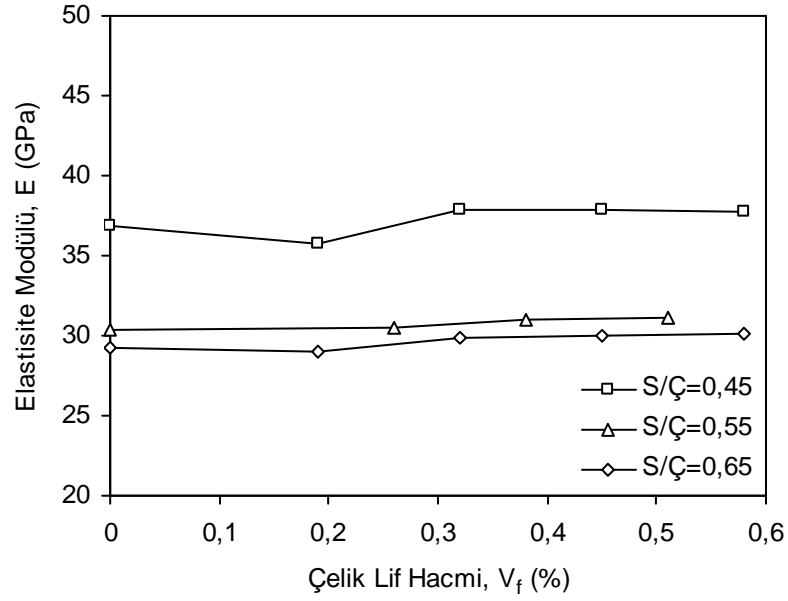
Şekil 5.5 : Farklı S/Ç oranındaki karışımlara çelik liflerin karma olarak ($V_f=0,73$) eklenmesinin silindir basınç dayanımı-şekil değiştirme eğrisine etkisi.

Karma çelik lif donatılı silindir numuneler üzerinde yapılan şekil değiştirme kontrollü basınç deneyleri sonucunda, artan lif hacmine bağlı olarak daha yüksek basınç tokluğuna sahip betonlar elde edilmiştir. Basınç tokluğundaki artış, düşük S/Ç ve yüksek çelik lif hacim oranında daha fazla oranda meydana gelmiştir. Bu nedenle yüksek matris dayanımlı karışımlarda yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak kullanılmasının basınç tokluğu bakımından daha etkili olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak, farklı matris dayanımlarına sahip beton içerisine farklı dayanım ve narinliğe sahip çelik liflerin tekli veya karma olarak eklenmesinin basınç dayanımından çok basınç tokluğunu artırıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

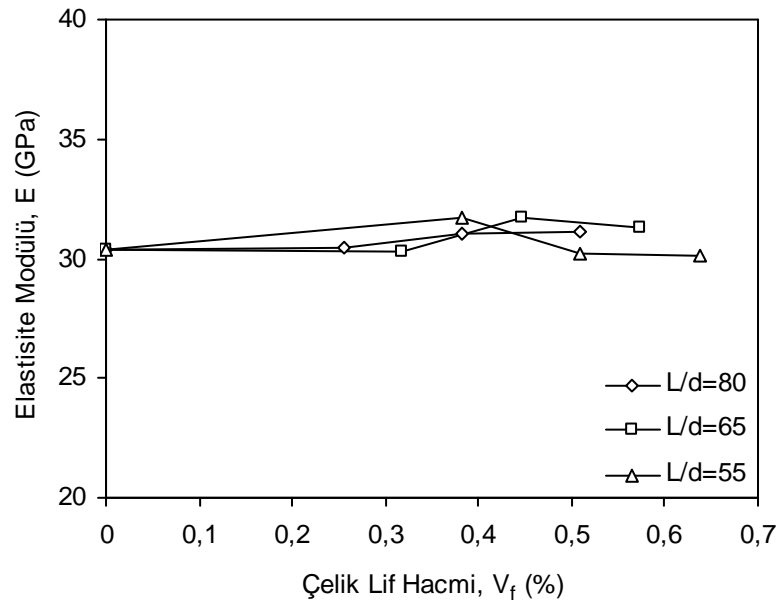
5.1.2 Elastisite modülü deneyi

Farklı S/Ç oranındaki numunelerin elastisite modülüne, farklı narinlikteki normal dayanımlı çelik liflerin (ND) değişik hacim oranlarında tekli olarak eklenmesinin etkisi Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak katılmasının etkisi de Şekil 5.8'de verilmektedir. Aynı narinlikteki lifin ($L/d=80$) üç farklı S/Ç oranındaki karışımlarda artan hacim oranlarında kullanılmasının elastisite modülünü etkilemediği gözlenmiştir. Çelik lif donatılı küp ve silindir numunelere ait elastisite modülü deneyi sonuçları Çizelge 5.1'de verilmektedir.



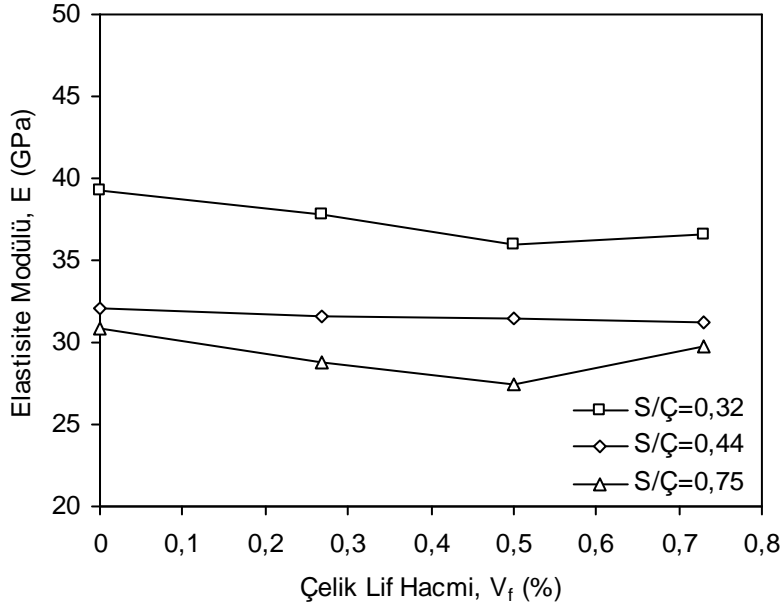
Şekil 5.6 : Normal dayanımlı çelik lif (ND, $L/d=80$) hacim oranının farklı S/Ç oranındaki numunelerin basınç elastisite modülüne etkisi.

Aynı S/Ç ($S/Ç=0,55$) oranındaki karışımda, farklı narinlikteki çelik liflerin artan hacim oranlarında kullanılmasının Şekil 5.7’de görüldüğü gibi betonun elastisite modülünü etkilemediği gözlenmiştir. $S/Ç=0,55$ olan karışımlarda, en düşük elastisite modülü değeri, çelik lif narinliği 55, lif uzunluğu 30 mm olan numunelerde elde edilmiştir.



Şekil 5.7 : $S/Ç=0,55$ olan numunelerde normal dayanımlı çelik lif (ND) narinliği ve hacim oranının elastisite modülüne etkisi.

Yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak kullanıldığı her bir S/Ç oranındaki karışımlarda, lif hacim oranı artışının elastisite modülüne etkisi olmadığı Şekil 5.8’de görülmektedir.



Şekil 5.8 : Yüksek dayanımlı karma çelik lif (YD, $L/d=80$) hacim oranının farklı S/Ç oranındaki numunelerin elastisite modülüne etkisi.

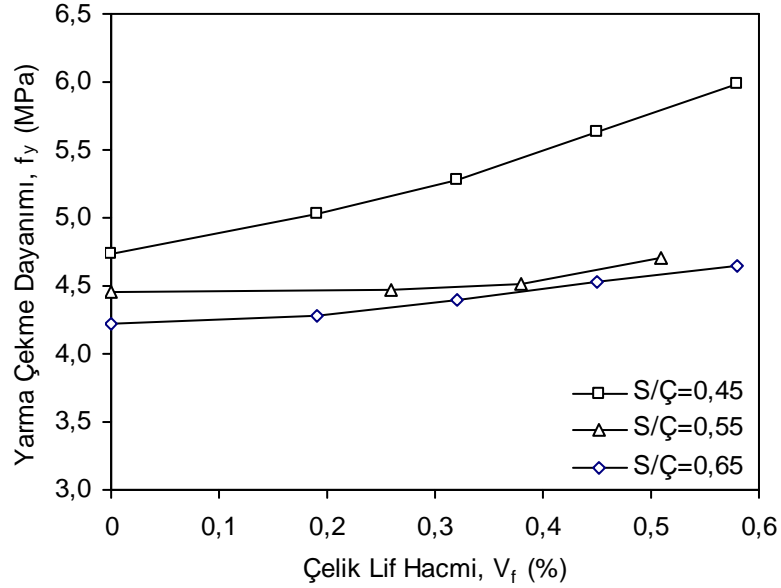
5.1.3 Yarmada çekme deneyi

Farklı S/Ç oranındaki beton numunelerin yarma çekme dayanımlarına, farklı narinlikte ve hacim oranlarında normal dayanımlı (ND) çelik liflerin tekli olarak katılmasının etkisi Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da, yüksek dayanımlı (YD) çelik liflerin karma olarak eklenmesinin etkisi ise Şekil 5.11’de verilmektedir. Çelik lif donatılı küp ve silindir numunelere ait yarma çekme dayanımı sonuçları da Çizelge 5.1’de verilmektedir.

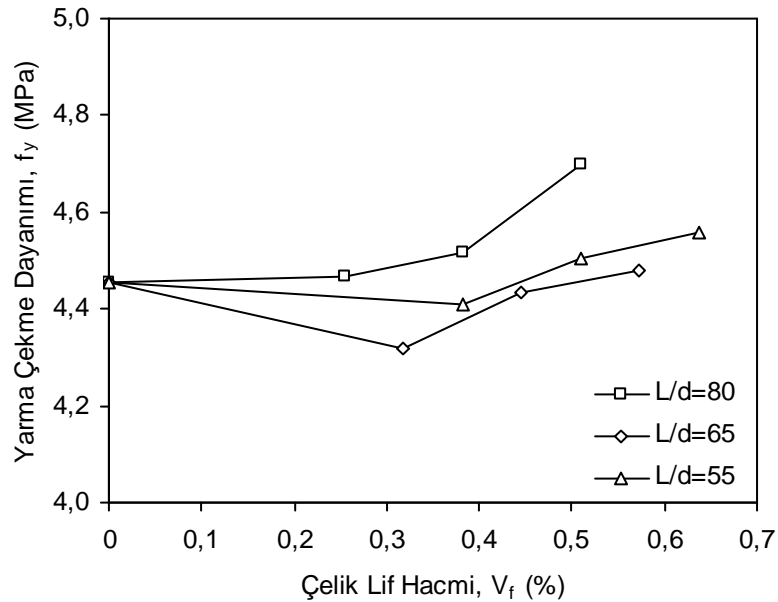
Çelik lif içermeyen karışımlara, $L/d=80$ olan çelik lif (ND) eklenmesiyle yarma çekme dayanımında, $S/Ç=0,65$ olan numunelerde en fazla %10, $S/Ç=0,45$ olan numunelerde %26 ve $S/Ç=0,55$ olan numunelerde ise %6 oranında bir artış meydana gelmiştir. Matris dayanımı yüksek olan çelik lif donatılı numunelerde yarma çekme dayanımının lif hacim oranının artmasıyla daha fazla oranda arttığı Şekil 5.9’da açıkça görülmektedir. Bu artış, matris dayanımının artmasıyla lif-matris arasındaki aderansın daha güçlü olmasından kaynaklanmaktadır.

Bununla birlikte Şekil 5.10’a göre daha düşük lif narinliğine sahip çelik liflerin aynı S/Ç oranındaki numunelerin yarma çekme dayanımına etkisinin daha az olduğu

söylenbilir. $S/\zeta=0,55$ olan numunelerde, aynı çelik lif (ND) hacim oranında yarma çekme dayanımlarında en düşük değerler, narinliği 65 olan numunelerde en yüksek değerler ise narinliği 80 olan numunelerde elde edilmiştir. Bu sonuca göre, karışımlarda aynı uzunlukta çap olarak daha büyük çelik liflerin, yarma çekme dayanımına olumlu etkisi olmadığı söylenbilir.

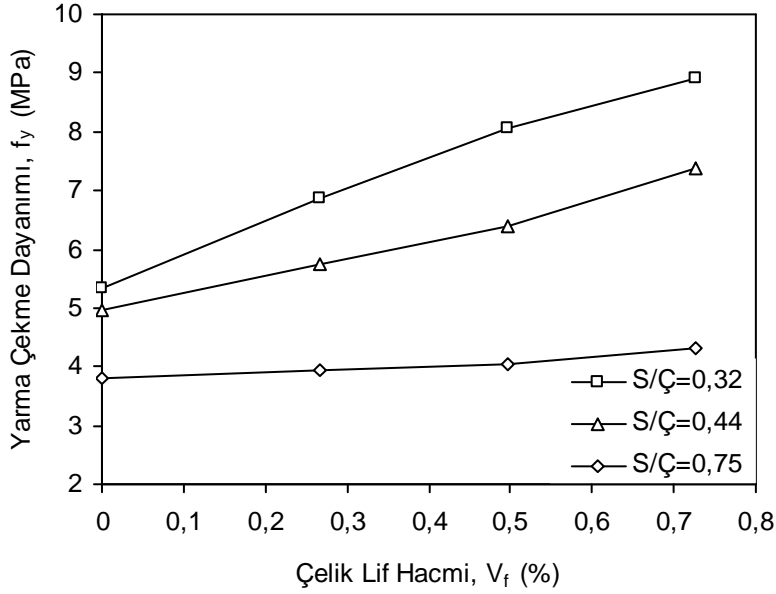


Şekil 5.9 : Normal dayanımlı çelik lif (ND, $L/d=80$) hacim oranının farklı S/ζ oranındaki numunelerin yarmada çekme dayanımına çelik lif hacminin etkisi.



Şekil 5.10 : $S/\zeta=0,55$ olan numunelerde normal dayanımlı (ND) çelik lif narinliği ve hacim oranının yarmada çekme dayanımına etkisi.

Yüksek dayanımlı çelik liflerin (YD) karma olarak kullanıldığı karışımlarda Şekil 5.11'de görüldüğü gibi düşük S/Ç oranına sahip numunelerde, en yüksek yarma çekme dayanımları elde edilmiştir. Yalın betonlara karma olarak çelik liflerin eklenmesiyle yarma çekme dayanımında en fazla artış, S/Ç=0,32 olan numunelerde yaklaşık olarak %67 oranında meydana gelmiştir. Bununla birlikte S/Ç=0,44 olan numunelerde %49, S/Ç=0,75 olan numunelerde %13 oranında artışlar belirlenmiştir.



Şekil 5.11 : Yüksek dayanımlı karma çelik lif (YD, $L/d=80$) hacim oranının farklı S/Ç oranındaki numunelerin yarma çekme dayanımına etkisi.

Aynı lif narinliği ($L/d=80$) ve S/Ç oranında ($S/Ç=0,45$), yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak kullanıldığı betonların normal dayanımlı tek tip çelik lifli betonlara göre daha yüksek yarma çekme dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. Daha yüksek yarma çekme dayanımının elde edilmesinde karma lifli karışımlarda kullanılan çelik lifin çekme dayanımının daha yüksek olmasının yanında liflerin karma olarak kullanılmasının da etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu sonuca göre karışımlarda, farklı çap ve uzunlukta olmakla birlikte narinliği aynı olan çelik liflerin daha az hacim oranlarında karma olarak kullanılmasının, tek olarak kullanılmasına göre daha etkili olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, ND ve YD çelik liflerin kullanıldığı karışımlarda, lif narinliğinin ve hacim oranının artmasıyla daha yüksek yarma çekme dayanımları elde edilmiştir. Matris dayanımı yüksek olan tekli ND ve karma YD çelik lifli karışımlarda, yüksek çelik lif hacim oranına sahip numunelerde daha yüksek yarma çekme dayanımları

belirlenmiştir. Bu, yüksek matris dayanımlı betonlarda daha güçlü lif-matris ara yüzey bağının oluşmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.1 : ÇLDB numunelere ait basınç, elastisite modülü ve yarma çekme deneyi sonuçları.

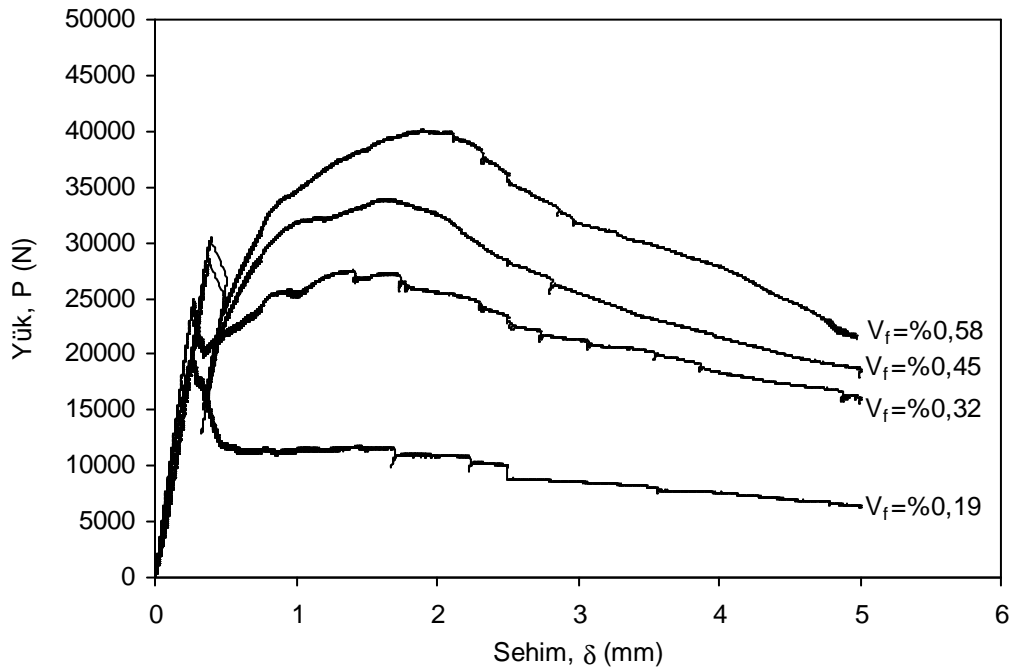
Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi %	Seri Kodu	Basınç Dayanımı		Elastisite Modülü E, MPa	Yarma Çekme Dayanımı, f_y , MPa
					Küp MPa	Silindir MPa		
1	0,45	Yalın	0	45-NB	55,60	42,51	36,94	4,74
		ND 80/60	0,19	45N80-19	56,20	44,98	34,85	5,03
			0,32	45N80-32	60,40	45,45	37,86	5,28
			0,45	45N80-45	54,70	41,13	37,82	5,63
			0,58	45N80-58	59,80	46,65	37,72	5,98
	0,65	Yalın	0	65-NB	33,96	27,47	29,19	4,22
		ND 80/60	0,19	65N80-19	35,59	29,79	28,96	4,28
			0,32	65N80-32	33,79	30,08	29,92	4,39
			0,45	65N80-45	37,49	29,72	30,03	4,53
			0,58	65N80-58	35,94	31,03	30,14	4,64
2	0,55	Yalın	0	55-NB	45,98	38,97	30,36	4,46
		ND 80/60	0,26	55N80-26	44,85	39,26	30,45	4,47
			0,38	55N80-38	44,64	37,86	31,01	4,52
			0,51	55N80-51	45,43	39,86	31,13	4,70
		ND 65/60	0,32	55N65-32	44,62	37,50	30,26	4,32
			0,45	55N65-45	44,53	36,98	31,72	4,44
			0,58	55N65-58	44,69	38,38	31,28	4,48
		ND 55/30	0,38	55N55-38	43,84	37,27	31,71	4,41
			0,51	55N55-51	44,39	36,83	30,22	4,51
			0,64	55N55-64	43,76	37,29	30,12	4,56
3	0,32	Yalın	0	32-NB	101,41	86,44	39,30	5,34
		YD 80/60	0,27	32Y80-27	103,05	92,52	37,82	6,85
			0,50	32Y80-50	104,74	98,46	36,00	8,04
			0,73	32Y80-73	105,65	101,22	36,64	8,91
	0,44	Yalın	0	44-NB	77,09	67,49	32,13	4,95
		YD 80/40	0,27	44Y80-27	69,82	67,14	31,54	5,76
			0,50	44Y80-50	75,09	68,74	31,48	6,41
			0,73	44Y80-73	78,09	66,53	31,26	7,38
	0,75	Yalın	0	75-NB	39,70	36,50	30,80	3,81
		YD 80/30	0,27	75Y80-27	38,15	32,23	28,84	3,92
			0,50	75Y80-50	34,11	35,70	27,40	4,06
			0,73	75Y80-73	40,39	34,80	30,00	4,31

5.1.4 Dört noktali kiriş eğilme deneyi

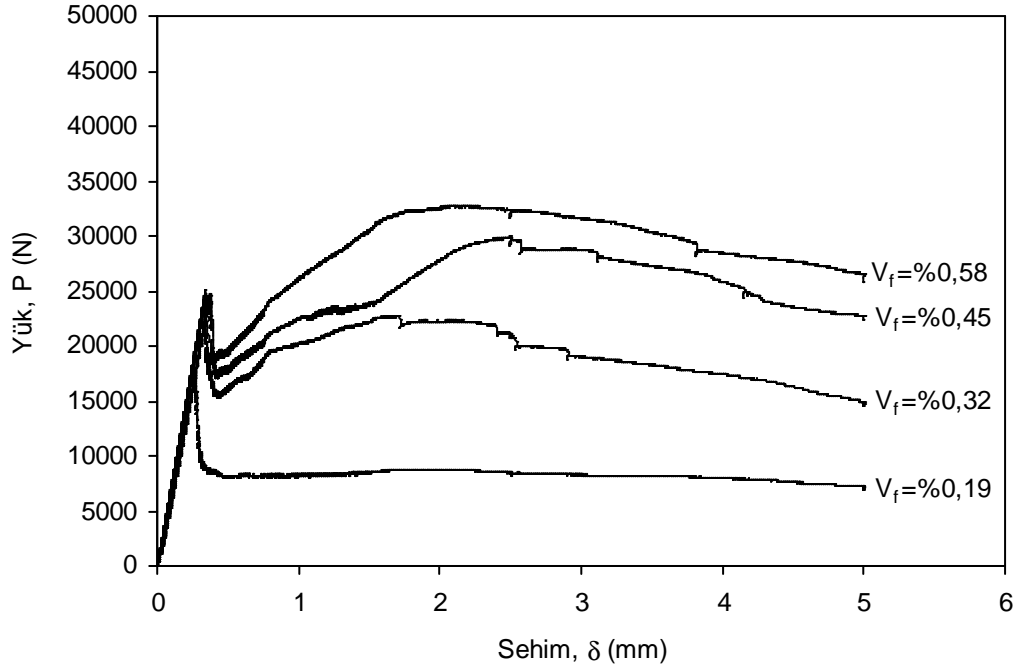
5.1.4.1 Yük-sehim eğrileri

Çelik lif donatılı betonlar üzerinde yapılan dört noktali kiriş eğilme deney verileri kullanılarak her bir numune için yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Farklı lif hacim oranlarında normal dayanımlı çelik liflerin ($L/d=80$) tekli olarak eklenmesinin yük-sehim eğrilerine etkisi, $S/Ç=0,45$ olan numunelerde Şekil 5.12’de ve $S/Ç=0,65$ olan numunelerde Şekil 5.13’de verilmektedir. Üretilen her bir serideki ÇLDB numunelere ait yük-sehim eğrileri Ek-F’de verilmektedir.

Her iki $S/Ç$ oranında en düşük çelik lif hacim oranlı ($V_f = \%0,19$) numunelerin yük-sehim eğrilerinde ilk çatlak sonrasında tekrar bir eğrisel artış gözlenmemiştir. Bununla birlikte artan çelik hacim oranıyla birlikte numunelerin yük-sehim eğrilerinin altında kalan alanın (tokluk) arttığı görülmüştür. Aynı çelik lif ($L/d=80$) hacim oranlarında en fazla artışlar $S/Ç=0,45$ olan numunelerde meydana gelmiştir. ÇLDB’lerin yalın betona göre aynı çelik lif hacim oranlarındaki ($V_f = \%0,58$) tokluk değerlerindeki artışlar, $S/Ç=0,65$ olan numunelerde $\%230$ ve $S/Ç=0,45$ olan numunelerde $\%258$ oranında meydana gelmiştir.



Şekil 5.12 : $S/Ç=0,45$ olan farklı lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



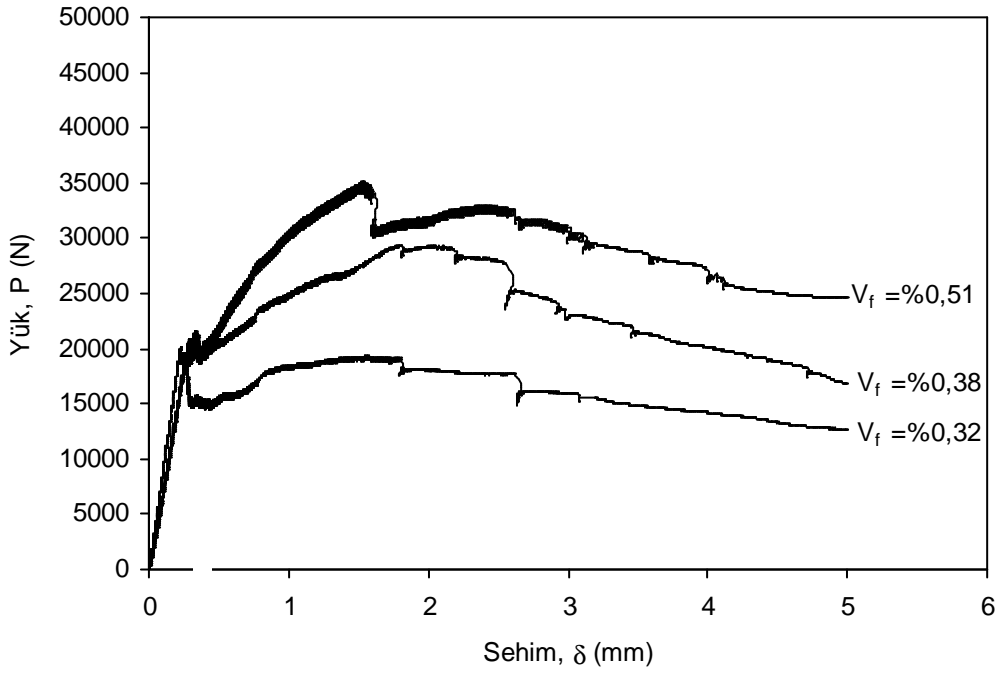
Şekil 5.13 : $S/C=0,65$ olan farklı lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.

Karışımlarda S/C ve çelik lif hacim oranı arttıkça numunelerin ilk çatlak sonrasındaki tepe yükü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte ÇLDB'lerin 5 mm'lik sehim sonunda taşıyabildikleri yük değerinin (eğilme dayanımının), matris dayanımı ve çelik lif hacim oranı yüksek olan numunelerde daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, yük-sehim eğrileri üzerinde S/C oranı ve çelik lif hacim oranının etkili olduğunu göstermektedir.

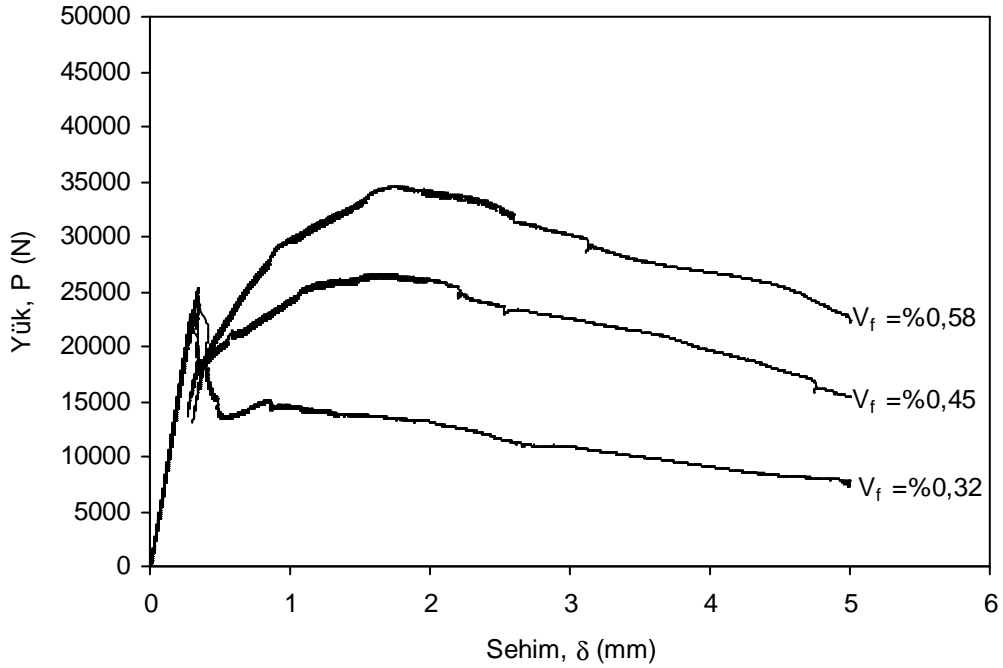
Aynı S/C oranındaki ($S/C=0,55$) karışıma farklı narinliğe sahip normal dayanımlı çelik liflerin tekli olarak eklenmesinin, ÇLDB'lerin yük-sehim eğrilerine etkisi; $L/d=80$ olan numunelerde Şekil 5.14'de, $L/d=65$ olan numunelerde Şekil 5.15'de ve $L/d=55$ olan numunelerde Şekil 5.16'da verilmektedir. Her bir ÇLDB numunelerine ait yük-sehim eğrileri de Ek D'de verilmektedir. $S/C=0,55$ olan karışımlara farklı narinlikteki çelik liflerin eklenmesiyle, numunelerin yük-sehim eğrilerinin altındaki alan artarak yalın betona göre belirgin oranda iyileşmeler gözlenmiştir. Bu iyileşmenin genellikle her bir lif narinliğinde karışıma giren çelik lif hacminin artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür.

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'e göre aynı lif hacim oranında ($V_f=%0,32$) narinliği yüksek olan liflerin ($L/d=80$) kullanılmasıyla yük-sehim eğrisi altındaki alanda daha fazla artış olduğu gözlenmiştir. Çelik lif narinliği ($L/d=55$) en düşük olan olan

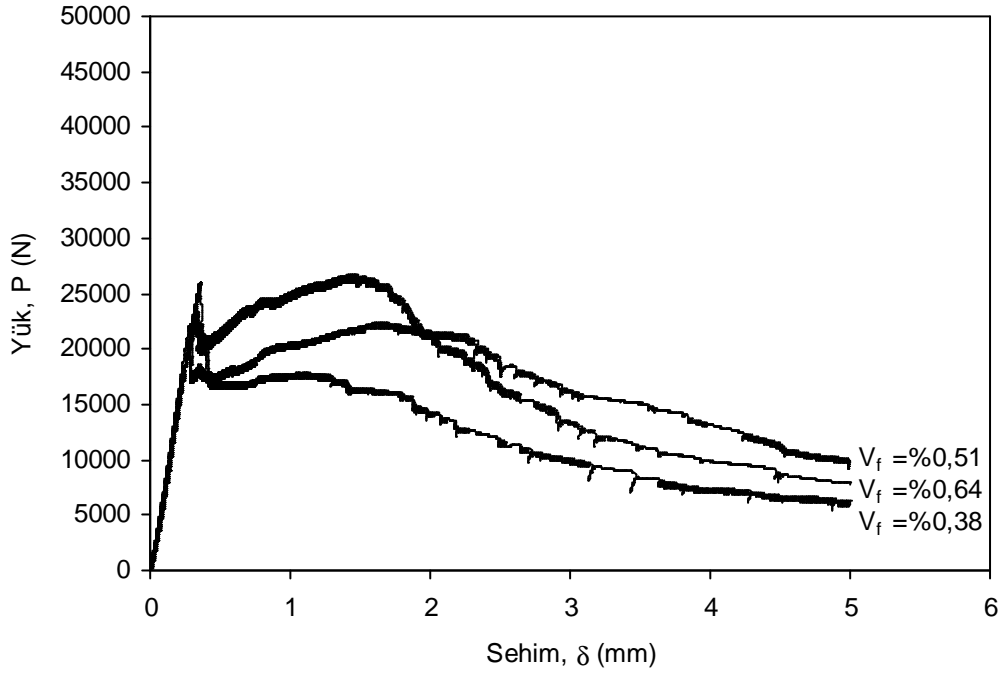
numunelerde, yük-sehim eğrilerinde meydana gelen iyileşmenin belirgin olarak daha az olduğu Şekil 5.16'da görülmektedir.



Şekil 5.14 : S/Ç=0,55 ve L/d=80 olan farklı lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



Şekil 5.15 : S/Ç=0,55 ve L/d=65 olan farklı çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



Şekil 5.16 : $S/\zeta=0,55$ ve $L/d=55$ olan farklı çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.

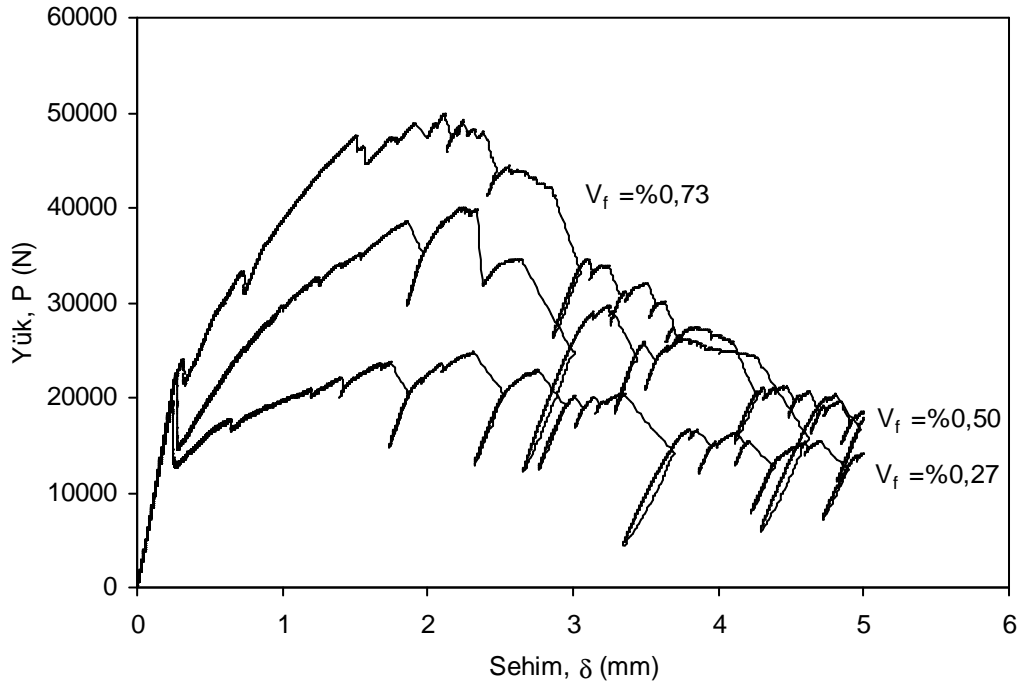
Bu sonuçlara göre toklukta artışa neden olan liflerin matristen sıyrılma mekanizmasına lif narinliği yüksek olan çelik liflerin daha fazla katkı sağlaması ile enerji yutma kapasitesi daha yüksek olan ÇLDB'ler elde edilmiştir.

Lif narinliği yüksek ve daha uzun çelik liflerin kullanıldığı numunelerde ilk çatlak sonrasında daha büyük tepe yükü değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte ÇLDB'lerin 5 mm'lik sehim sonunda taşıyabildikleri yük değerlerinin (eğilme dayanımının), lif narinliği ve hacim oranı yüksek olan numunelerde daha büyük olduğu görülmüştür. Bu nedenle numunelerin enerji yutma kapasitelerindeki iyileşme oranında çelik lif narinliği ve hacim oranının etkili olduğu söylenebilir.

Farklı matris dayanımındaki karışımlara aynı lif narinliğinde ($L/d=80$) farklı uzunlukta ($L=60$ mm, 40 mm ve 30 mm) yüksek dayanımlı çelik liflerin aynı lif hacim oranlarında karma olarak eklenmesinin yük-sehim eğrisi üzerindeki etkisi; $S/\zeta=0,32$ olan numunelerde Şekil 5.17'de, $S/\zeta=0,44$ olan numunelerde Şekil 5.18'de ve $S/\zeta=0,75$ olan numunelerde Şekil 5.19'da verilmektedir. Her bir karma ÇLDB numuneye ait yük-sehim eğrileri de Ek D'de verilmektedir.

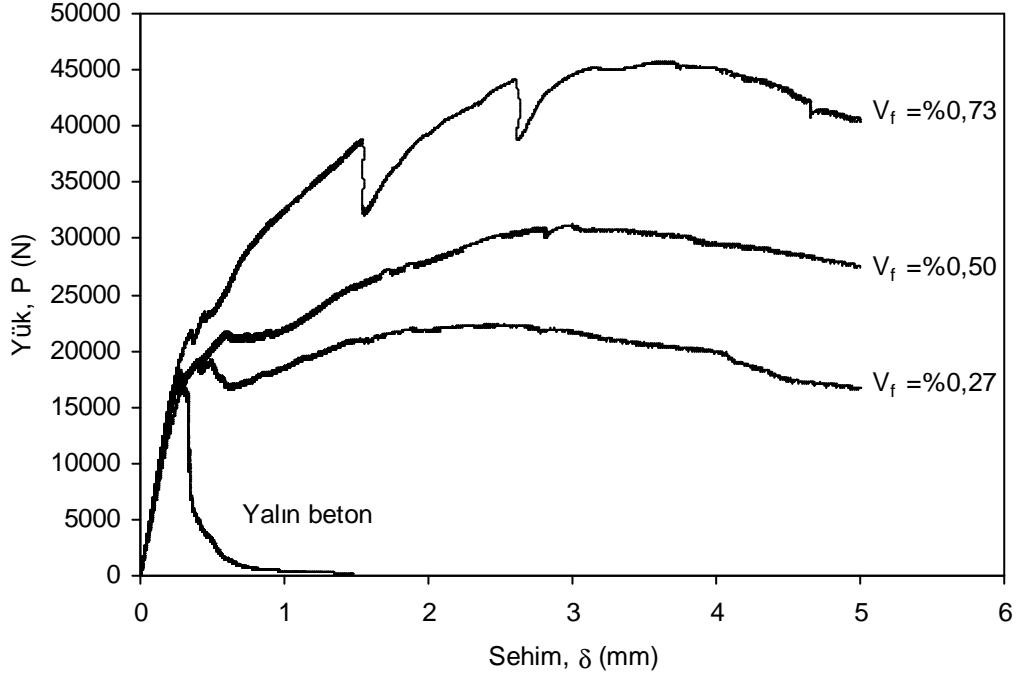
Karışımlarda çelik liflerin (YD) artan hacim oranlarında karma olarak kullanılmasıyla numunelerin yük-sehim eğrilerindeki en fazla iyileşme, lif hacim

oranı %0,73 ve $S/\zeta=0,44$ olan ÇLDB'lerde meydana gelmiştir. Aynı lif hacim oranında, S/ζ oranı yüksek olan ($S/\zeta=0,32$) numunelerde en büyük tepe yükü değerleri elde edilmiştir. Ancak bu numunelerin yük-sehim eğrilerinde tepe yükünden sonra diğer S/ζ oranındaki karışımlara göre daha ani azalmalar gözlenmiştir. Böylece $S/\zeta=0,32$ olan numunelerde artan çelik hacim oranına rağmen daha düşük tokluğa sahip ÇLDB'ler elde edilmiştir. Bu azalmanın, çelik liflerin (YD) yüksek dayanımlı matriste çekme dayanımına ulaştıktan sonra koparak kırılması ile boşalan yüksek enerjinin matris tarafından taşınamamasından kaynaklanabilir.

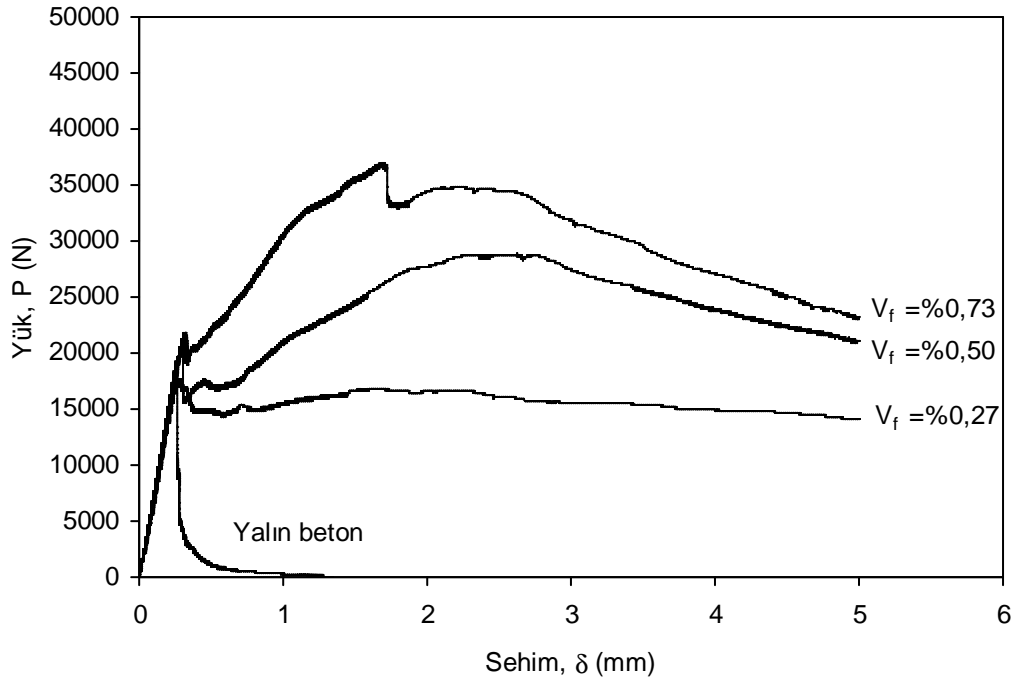


Şekil 5.17 : $S/\zeta=0,32$ ve $L/d=80$ olan farklı karma çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.

Karma ÇLDB'lerin yük-sehim eğrilerinde en yüksek tepe yükü değerleri, S/ζ oranı düşük olan numunelerde elde edilmiştir. Bununla birlikte aynı lif hacim oranındaki ÇLDB'lerin, 5 mm sehim sonunda taşıyabildikleri yük değerinin, $S/\zeta=0,44$ olan numunelerde en büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.18 : $S/\Ç=0,44$ ve $L/d=80$ olan farklı karma çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



Şekil 5.19 : $S/\Ç=0,75$ ve $L/d=80$ olan farklı karma çelik lif hacim oranlı kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.

Çelik liflerin eklenmesi, kiriş eğilme deneyinde betonun şekil değiştirme kapasitesinde ve yük-sehim eğrilerinin altında kalan alanı arttırarak toklukta önemli

oranda iyileşmelere neden olmuştur. Daha yüksek lif narinliğine ($L/d=80$) sahip ÇLDB'lerde, en düşük çelik lif hacim oranlı karışımlar haricindeki tüm karışımlarda, yük-sehim eğrilerinin ilk çatlak oluşumundan sonra tekrar yükselerek artan yönde bir iyileşme göstermiştir. Her bir lif narinliği için en düşük lif hacim oranında üretilen karışımlarda ise, yük-sehim eğrilerinde ilk çatlak sonrasında tekrar bir artış olmamakla birlikte yalın betona göre bir iyileşme gözlenmiştir. Bu durumun çelik lif hacminin yeterli oranda olmaması veya liflerin matriste etkili olabilmesi için gerekli kritik bir lif hacim oranından (V_{fkr}) daha küçük olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Farklı dayanım, narinlikte ve hacim oranında çelik lif kullanılması, betonun ilk çatlak yükü değerine etkisinden daha çok çatlak sonrası davranışını iyileştirdiği gözlenmiştir. Çatlak sonrası yük-sehim davranışındaki iyileşme üzerinde çelik lif hacim ve narinliğinin etkisi olduğu belirlenmiştir. Bu iyileşmenin, düşük narinliğindeki daha kısa ve çap olarak büyük çelik lifler kullanıldığında azaldığı görülmüştür.

Normal ve yüksek dayanımlı (ND ve YD) çelik lifli karışımlarda, lif hacim oranı arttıkça, yük-sehim eğrisinde ilk çatlak yükü değerinden sonra daha az oranda bir azalmadan sonra liflerin yük taşıyıp aktarmaya başlamasıyla tekrar bir artış meydana gelmektedir. Karma lifli karışımlarda ise ilk çatlak yükü sonrasında tek tip çelik lifli karışımlara göre daha az bir azalmanın ardından tekrar bir artış görülmüştür. Bu sonuç, farklı uzunlukta (aynı narinlikte) liflerin karma olarak kullanıldığı karışımlarda matris fazında boyutsal olarak daha homojen bir lif dağılımı nedeniyle sağlanan daha etkin çatlak kontrolünden kaynaklanabilir.

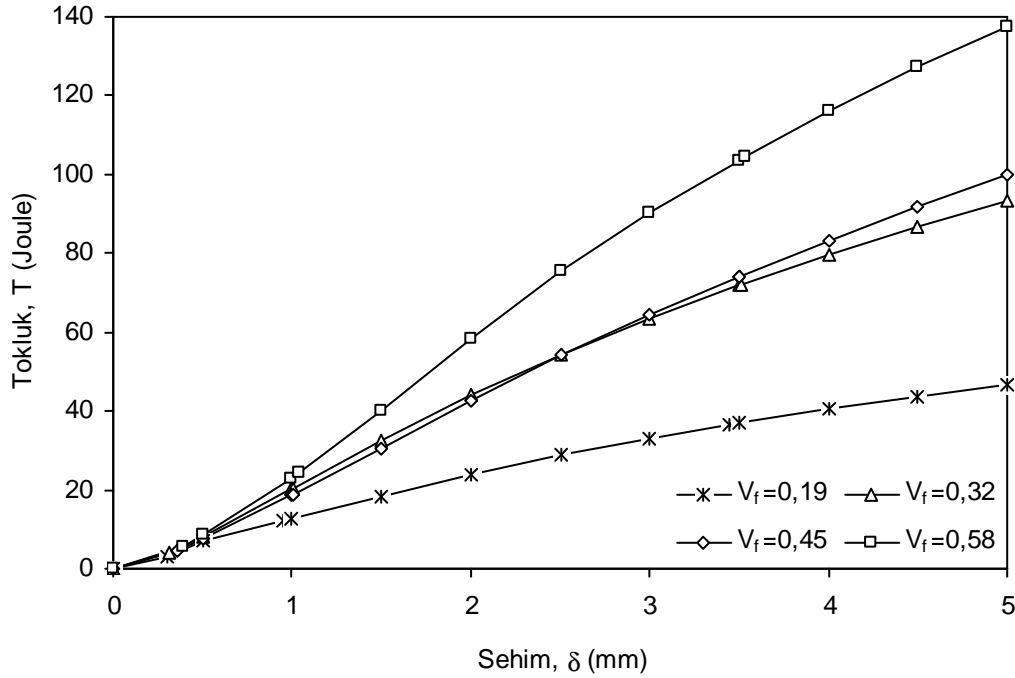
ÇLDB'lerin, yük-sehim eğrilerinden ilk çatlak yükü değerinden sonraki en büyük yük değerine kadar şekil değiştirme sertleşmesi, en büyük yük değerinden sonra ise şekil değiştirme yumuşaması sergilediği gözlenmiştir. Bu davranış, yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemelerin tipik bir özelliğidir.

5.1.4.2 Tokluk-sehim eğrileri

Tokluk veya enerji yutma kapasitesi çelik lif donatılı betonları yalın betonlardan ayıran en önemli özeldir. ÇLDB'lerin tokluk değerleri, 5 mm sehim değerine kadar yük-sehim eğrilerinin altında kalan alan kullanılarak elde edilmiştir. Tokluk değerleri, her bir seride üç adet kiriş numunesine ait değerlerin ortalaması alınarak

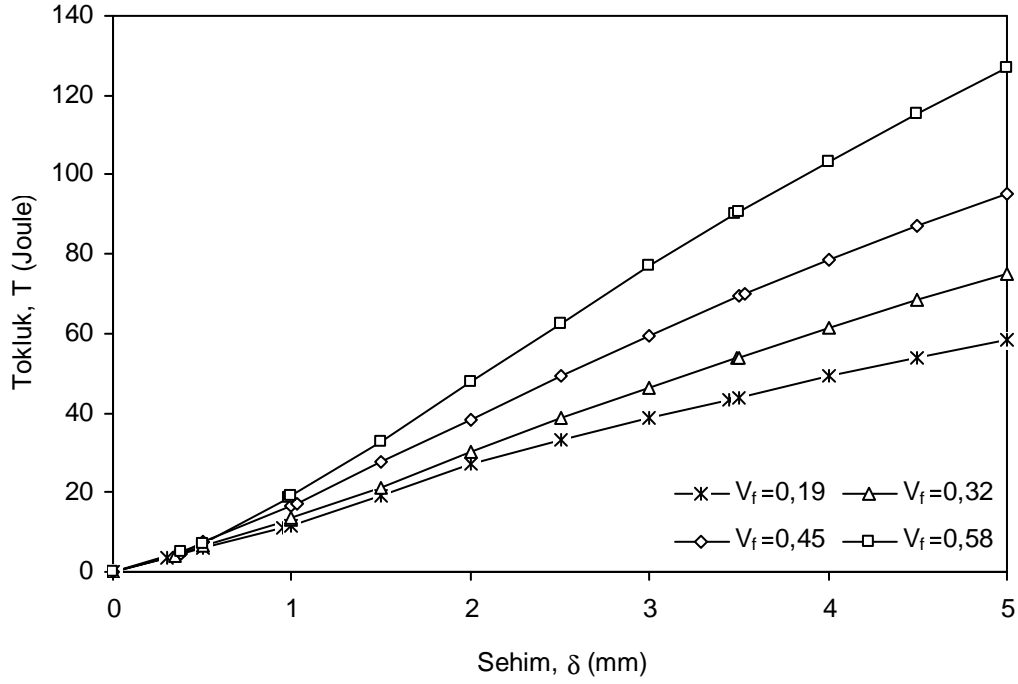
belirlenmiştir. Çelik lif donatılı kiriş numunelere ait tokluk sonuçları Çizelge 5.2’de verilmektedir.

Farklı S/Ç oranında ve aynı lif narinliğindeki normal dayanımlı çelik liflerin (ND) tekli olarak kullanıldığı karışımlarda tokluğun çelik lif hacmi ile değişimi, S/Ç=0,45 için Şekil 5.20’de, S/Ç=0,65 için Şekil 5.21’de verilmektedir. Karışımlarda, S/Ç ve normal dayanımlı çelik lif (ND) hacim oranının artmasıyla daha yüksek tokluk değerleri elde edilmiştir. En büyük tokluk değerleri, en yüksek lif hacim oranında ($V_f=0,58$) S/Ç=0,45 olan numunede 138 joule, S/Ç=0,65 olan numunede 128 joule olarak belirlenmiştir.

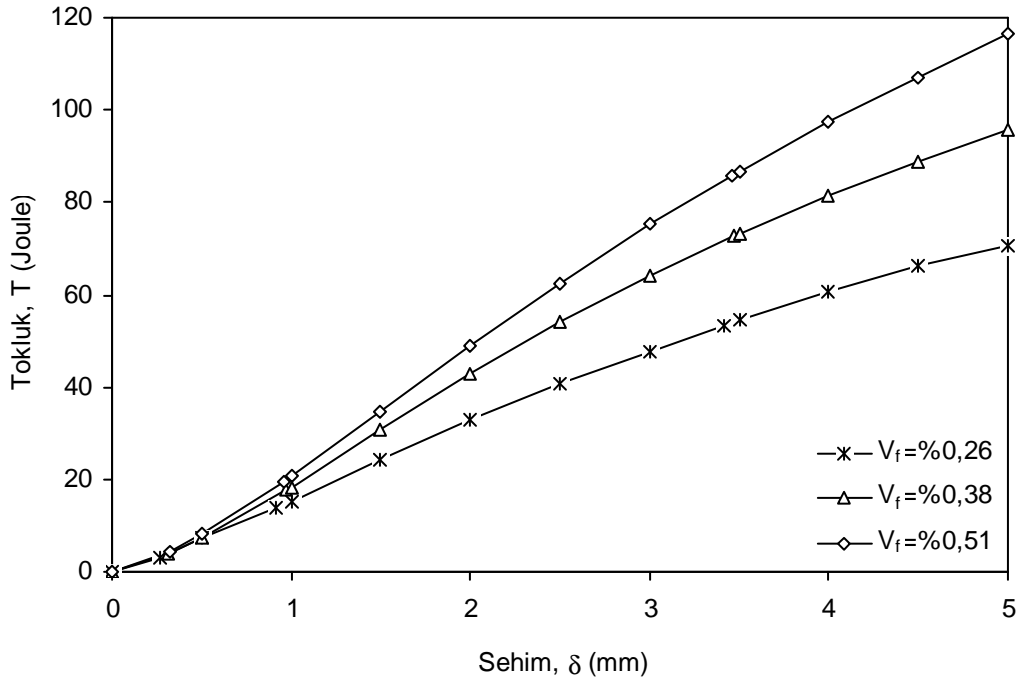


Şekil 5.20 : S/Ç=0,45 ve L/d=80 olan ÇLDB kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif (ND) hacim oranının etkisi.

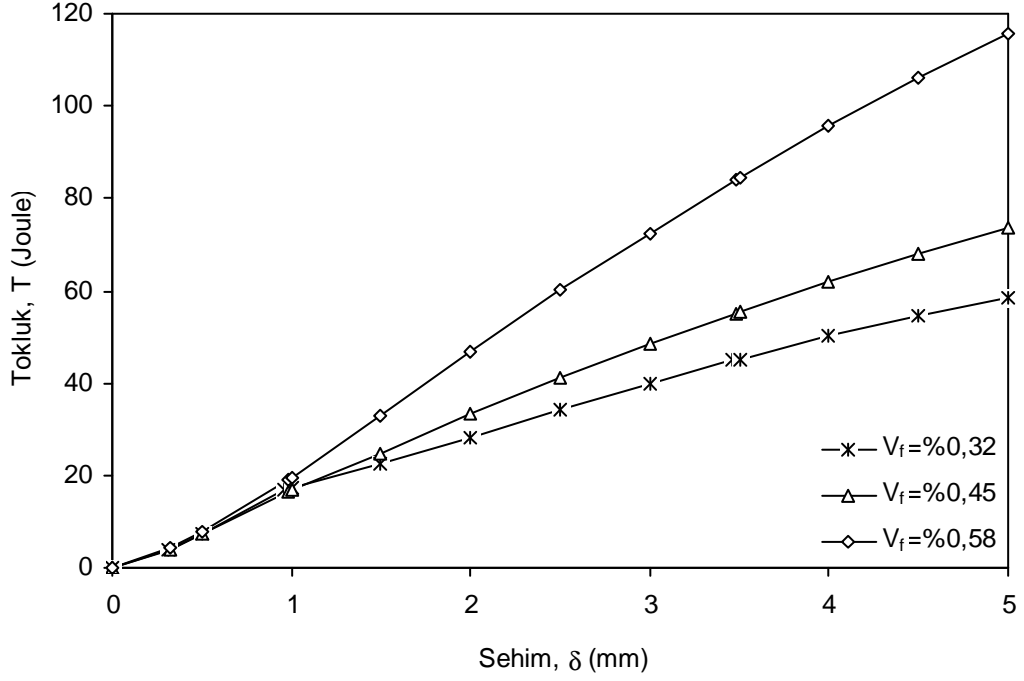
Aynı S/Ç oranındaki (S/Ç=0,55) karışımlarda farklı lif narinliğine sahip çelik liflerin tekli olarak kullanılmasının tokluk-sehim eğrisine etkisi; L/d=80 olan numunelerde Şekil 5.22’de, L/d=65 olan numunelerde Şekil 5.23’de ve L/d=55 olan numunelerde Şekil 5.24’de verilmektedir. Karışımlarda kullanılan çelik lif narinliği ve hacim oranı arttıkça daha yüksek tokluk değerleri elde edilmiştir. En büyük tokluk değeri, L/d=80 ve çelik lif hacim oranı %0,51 olan numunelerde 118 joule olarak belirlenmiştir. Lif narinliği ve uzunluğu büyük olan normal dayanımlı çelik liflerin kullanılmasının yüksek tokluğa sahip ÇLDB’lerin elde edilmesinde daha etkili olduğu görülmüştür.



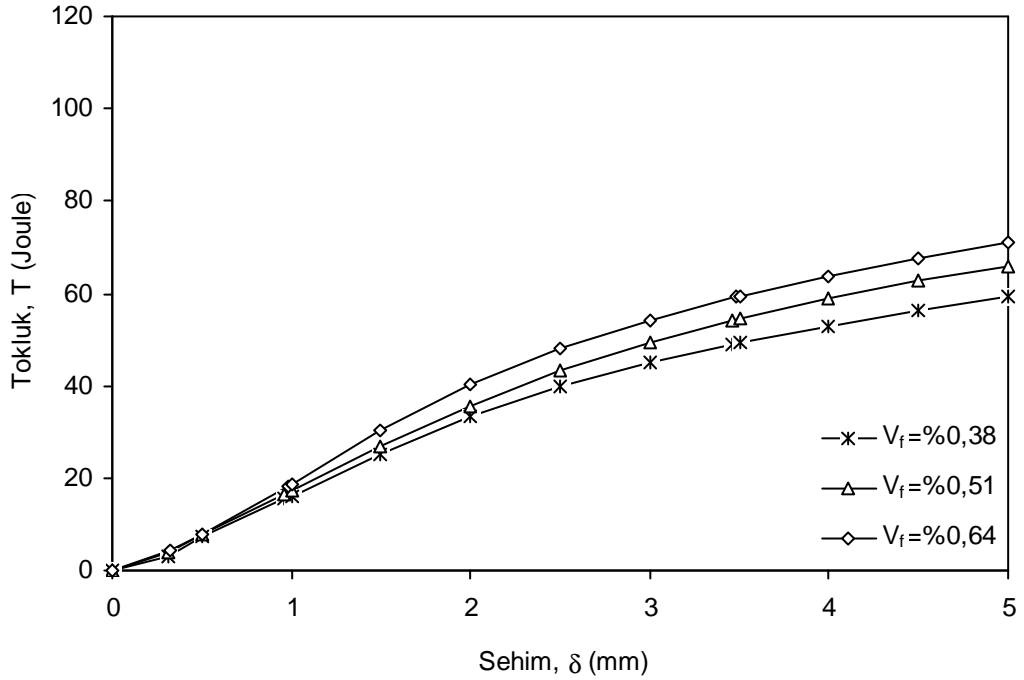
Şekil 5.21 : $S/C=0,65$ ve $L/d=80$ olan ÇLDB kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif (ND) hacim oranının etkisi.



Şekil 5.22 : $S/C=0,55$ ve $L/d=80$ olan kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi.



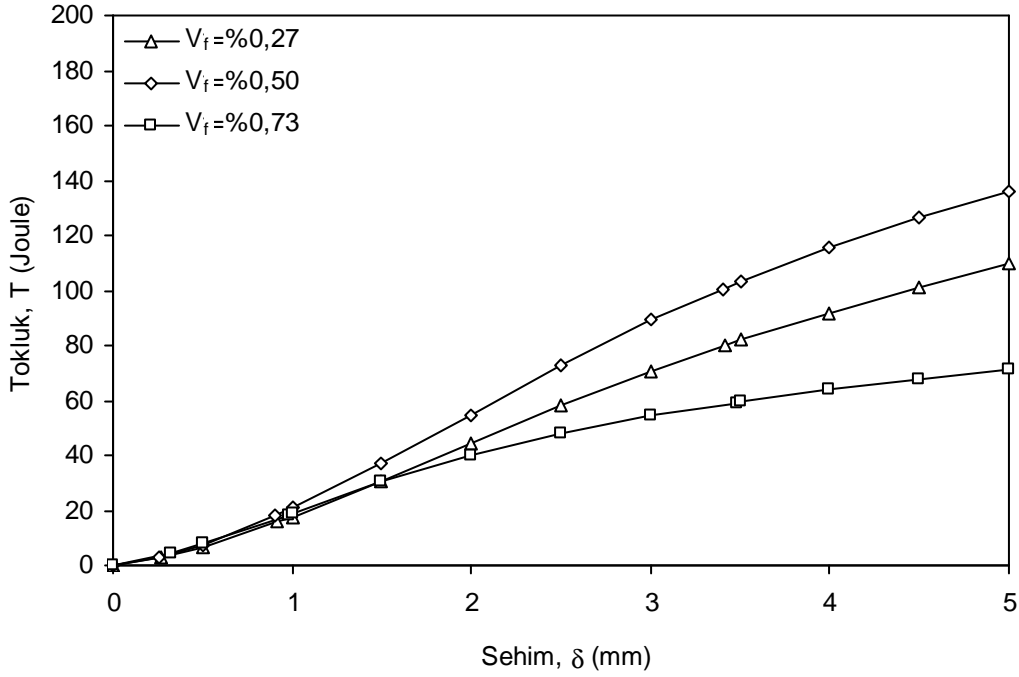
Şekil 5.23 : $S/\Ç=0,55$ ve $L/d=65$ olan kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi.



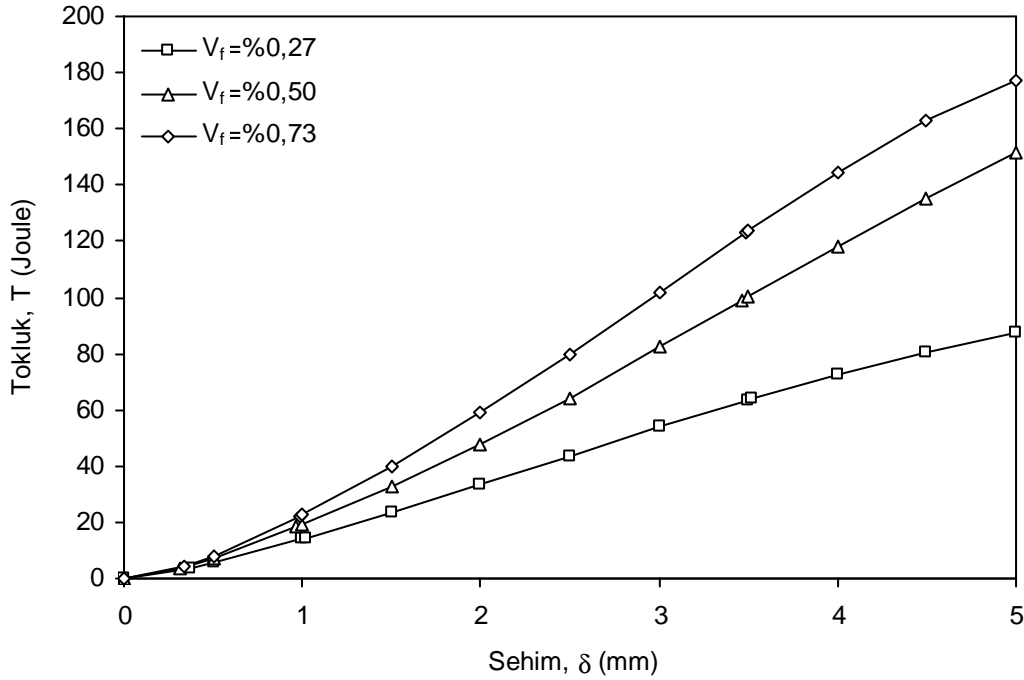
Şekil 5.24 : $S/\Ç=0,55$ ve $L/d=55$ olan kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi.

Yüksek dayanımlı çelik liflerin ($L/d=80$) farklı $S/\Ç$ oranındaki karışımlarda karma olarak kullanılmasının tokluk-sehim eğrisine etkisi, $S/\Ç=0,32$ olan numunelerde Şekil 5.25'de, $S/\Ç=0,44$ olan numunelerde Şekil 5.26'da ve $S/\Ç=0,75$ olan

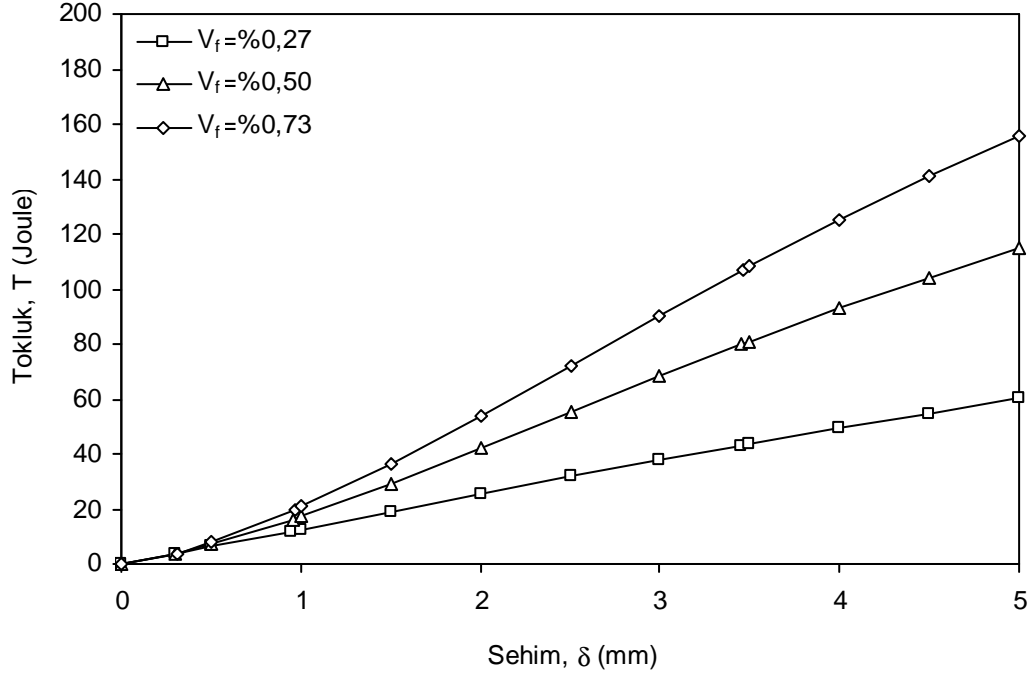
numunelerde Şekil 5.27’de verilmektedir. Karma çelik lifli karışımlarda, S/Ç ve çelik lif hacim oranı artmasıyla tokluk değerlerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 5.25: S/Ç=0,32 ve L/d=80 olan karma çelik lifli kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi.



Şekil 5.26 : S/Ç=0,44 ve L/d=80 olan karma çelik lifli kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi.



Şekil 5.27 : $S/\zeta=0,75$ ve $L/d=80$ olan karma çelik lifli kiriş numunelerin tokluk-sehim eğrilerine çelik lif hacim oranının etkisi.

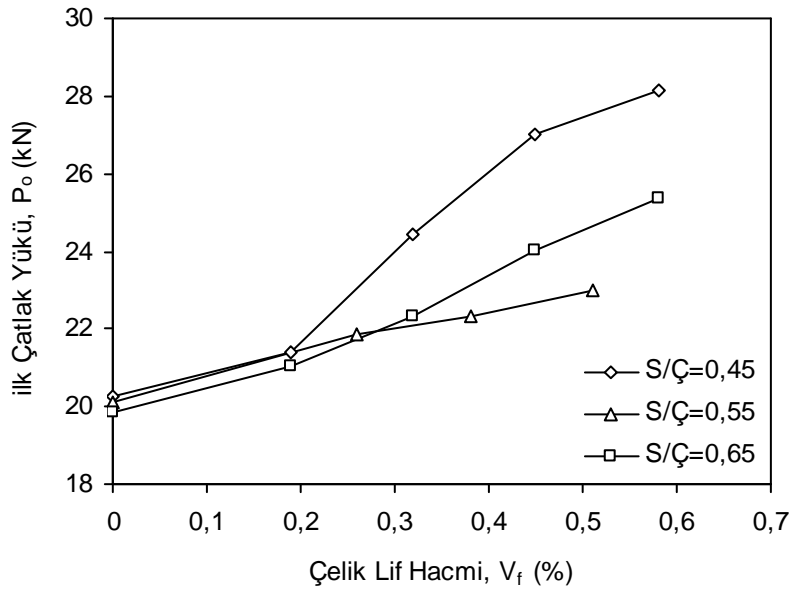
En büyük tokluk değeri, lif hacim oranı %0,73 ve $S/\zeta=0,44$ olan numunelerde 178 joule olarak belirlenmiştir. Diğer S/ζ oranındaki karışımlarda en büyük tokluk değerleri ise, $S/\zeta=0,32$ ve lif hacmi %0,50 olan numunelerde 140 joule, $S/\zeta=0,75$ ve lif hacmi %0,73 olan numunelerde 160 joule olarak elde edilmiştir. Karma çelik lifli karışımlarda en düşük tokluk değerinin en yüksek dayanımlı matriste elde edilmesinin nedeni, yük-sehim eğrisinde tepe yükü sonrasında enerjiyi karşılayabilecek aynı narinlikte ($L/d=80$) daha uzun lif ($L=60$ mm) hacminin karışımda yeterli oranda bulunmamasından ve liflerin koparak kırılması ile enerji yutma kapasitesinde meydana gelen azalmadan kaynaklanabilir. Bu nedenle karma lifli ve yüksek dayanımlı karışımlarda daha uzun lif hacim oranının daha kısa liflere göre belirli bir oranda daha fazla kullanılmasının daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.

5.1.4.3 İlk çatlak yükü

Farklı S/ζ oranındaki karışımlarda $L/d=80$ olan çelik liflerin tekli olarak farklı hacim oranlarında kullanılmasının kiriş numunelerin ilk çatlak yükü değerine etkisi Şekil 5.28'de ve aynı S/ζ oranındaki ($S/\zeta=0,55$) karışımlarda farklı lif narinliğine sahip çelik liflerin farklı hacim oranlarında kullanılmasının etkisi de Şekil 5.29'da

verilmektedir. Kiriş numunelere ait yük-sehim verileri kullanılarak belirlenen ilk çatlak yükü sonuçları Çizelge 5.2’de verilmektedir.

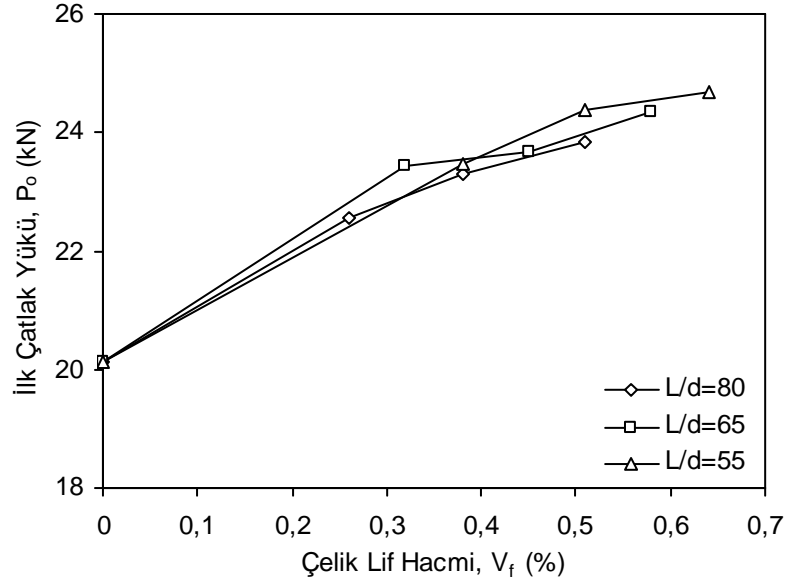
Her bir S/Ç oranındaki numunelerde artan lif hacim oranıyla birlikte ilk çatlak yükü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. İlk çatlak yükündeki en büyük artış, S/Ç=0,45 olan karışımlarda, L/d=80 ve çelik lif hacim oranı %0,57 olan numunelerde %45 olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre aynı narinlikte (L/d=80) ve lif hacim oranında matris dayanımı arttıkça daha yüksek ilk çatlak yükü değerleri elde edilmiştir.



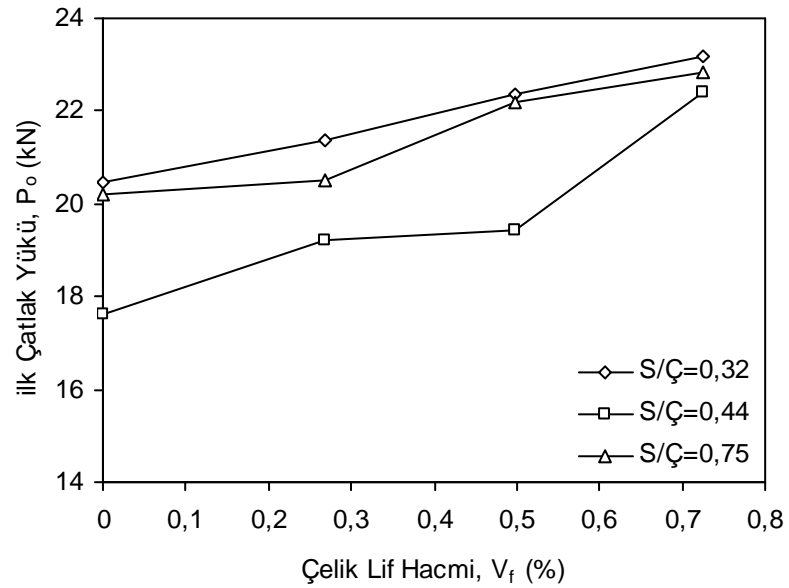
Şekil 5.28 : Farklı S/Ç oranlarında ve L/d= 80 olan çelik lifli kiriş numunelerin ilk çatlak yükü değerine çelik lif hacim oranının etkisi.

Aynı matris dayanımındaki (S/Ç=0,55) karışıma farklı narinlikteki çelik liflerin eklenmesinin ilk çatlak yükünü arttırdığı Şekil 5.29’da görülmektedir. İlk çatlak yükündeki bağıl olarak artış, L/d=55 olan çelik liflerin kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir. Genel olarak bu şekildeki ilişkide lif narinliğinden çok belirleyici olan lif hacmidir.

Farklı S/Ç oranındaki karışımlara L/d=80 olan farklı uzunluktaki çelik liflerin karma olarak eklendiği numunelerde ilk çatlak yükü değerlerine çelik lif hacim oranının etkisi Şekil 5.30’da verilmektedir. İlk çatlak yükü değerinde en büyük artış, S/Ç=0,44 ve V_f =%0,73 olan numunelerde %30 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.29 : $S/\zeta=0,55$ olan kiriş numunelerin ilk çatlak yükü değerine çelik lif narinliği ve hacim oranının etkisi.



Şekil 5.30 : Farklı S/ζ oranındaki karma çelik lifli kiriş numunelerin, ilk çatlak yükü değerine çelik lif hacim oranının etkisi.

Sonuç olarak, çelik liflerin tekli ve karma olarak karışımlara eklenmesi sonucu ilk çatlak yükü değerlerinde gözlenen artışlar matris dayanımı yüksek olan betonlarda daha fazla oranda meydana gelmiştir. Bu artışlar liflerin beton matriste ilk çatlak oluşumunu geciktirme etkisinden kaynaklandığı söylenebilir.

Çizelge 5.2 : ÇLDB numunelere ait ilk çatlak yükü ve tokluk sonuçları.

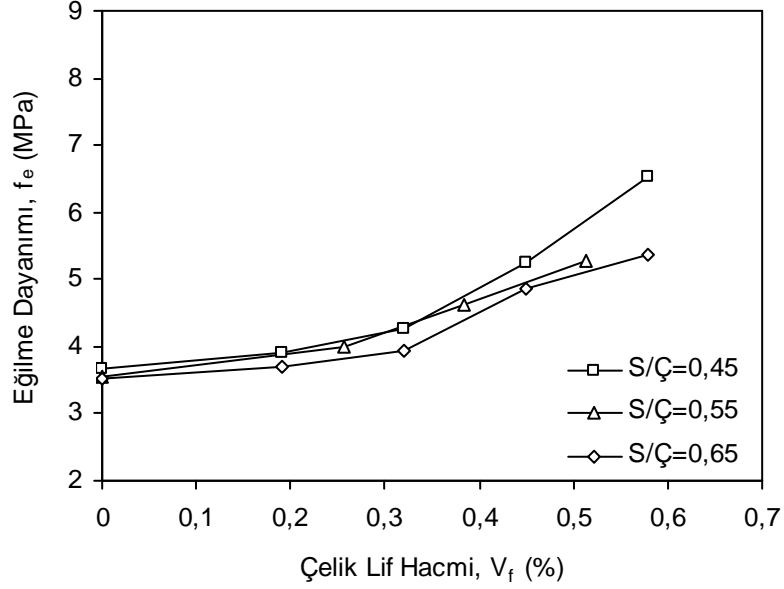
Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi %	Seri Kodu	İlk Çatlak Yükü, P ₀ kN	^a Tokluk T, Joule		
1	0,45	Yalın	-	45-NB	20,28	-		
		ND 80/60	0,19	45N80-19	21,39	47		
			0,32	45N80-32	24,44	93		
			0,45	45N80-45	27,02	100		
	0,58		45N80-58	28,17	138			
	0,65	Yalın	-	65-NB	19,87	-		
		ND 80/60	0,19	65N80-19	21,04	59		
			0,32	65N80-32	22,35	75		
			0,45	65N80-45	24,01	95		
	0,58		65N80-58	25,37	128			
	2	0,55	Yalın	-	55-NB	20,12	-	
			ND 80/60	0,26	55N80-26	22,55	71	
0,38				55N80-38	23,28	96		
0,51				55N80-51	23,84	118		
ND 65/60			0,32	55N65-32	23,43	59		
			0,45	55N65-45	23,68	74		
			0,58	55N65-58	24,35	116		
ND 55/30			0,38	55N55-38	23,47	59		
			0,51	55N55-51	24,40	66		
			0,64	55N55-64	24,68	71		
3			0,32	Yalın	-	32-NB	20,46	-
				YD 80/60	0,27	32Y80-27	21,39	110
	0,50	32Y80-50			22,38	140		
	0,73	32Y80-73			23,17	71		
	0,44	Yalın	-	44-NB	17,63	-		
		YD 80/40	0,27	44Y80-27	16,64	88		
			0,50	44Y80-50	19,45	152		
			0,73	44Y80-73	22,39	178		
	0,75	Yalın	-	75-NB	20,22	-		
		YD 80/30	0,27	75Y80-27	20,51	60		
			0,50	75Y80-50	22,17	115		
			0,73	75Y80-73	22,82	160		

^a 5mm'lik sehime kadar belirlenmiştir.

5.1.4.4 Eğilme dayanımı

Dört noktalı kiriş eğilme deneylerinden elde edilen en büyük yük değerleri kullanılarak numunelere ait eğilme dayanımları belirlenmiştir. Farklı tip ve dayanımlarda çelik liflerin kullanıldığı numunelere ait eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 5.3'de verilmektedir. Farklı S/Ç oranındaki kiriş numunelerin eğilme dayanımına, farklı narinlikte ve hacim oranlarında normal dayanımlı çelik liflerin (ND) tekli olarak eklenmesinin etkisi Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de, yüksek dayanımlı çelik liflerin (YD) karma olarak katılmasının etkisi Şekil 5.33'de verilmektedir.

Çelik liflerin ($L/d=80$) tekli olarak kullanıldığı karışımlarda lif hacminin %0,58'e kadar artmasıyla, eğilme dayanımında yalın betona göre en yüksek, $S/Ç=0,65$ olan numunelerde %46, $S/Ç=0,45$ olan numunelerde %70 oranında bir iyileşme meydana gelmiştir.

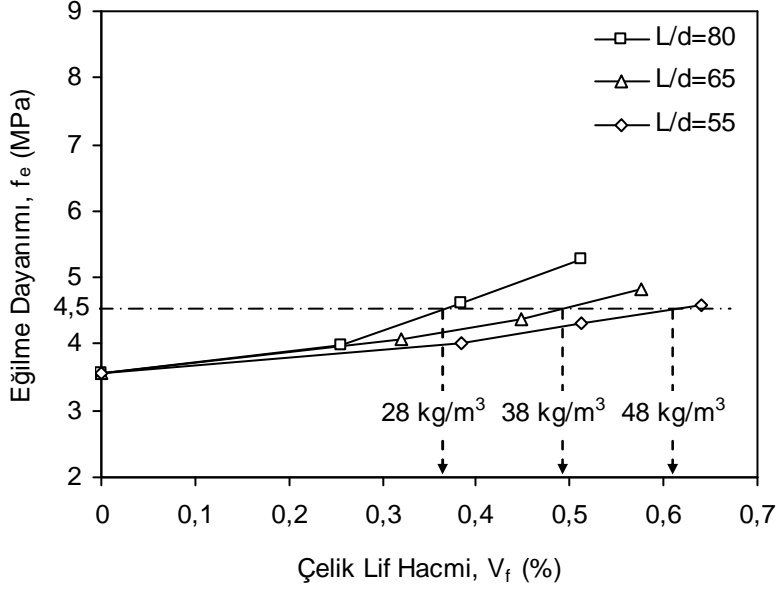


Şekil 5.31 : Farklı $S/Ç$ oranındaki karışımların eğilme dayanımına çelik lif hacminin etkisi.

Aynı $S/Ç$ oranındaki ($S/Ç=0,55$) karışımlarda Şekil 5.32'de görüldüğü gibi her bir farklı lif narinliğinde çelik lif hacminin artmasıyla eğilme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Farklı narinliğe sahip çelik lifli betonlar arasında yalın beton numunelere göre eğilme mukavemetinde en fazla artış, $L/d=80$ ve lif hacim oranı %0,51 olan numunelerde %48 oranında meydana gelmiştir. Diğer lif narinlikleri için eğilme dayanımlarında en fazla artışlar; $L/d=65$ olan numunelerde %35 ve $L/d=55$ olan numunelerde %28 olarak belirlenmiştir. Her bir lif narinliğinde en fazla artışlar en yüksek çelik lif hacim oranlarında elde edilmiştir. Artan çelik lif hacmiyle birlikte eğilme dayanımındaki artış oranı, daha küçük narinliğe sahip liflerin kullanıldığı numunelerde daha az olmuştur.

$S/Ç=0,55$ olan karışımlarda belirli bir eğilme dayanımına sahip beton elde edebilmek için lif narinliği azaldıkça daha fazla hacim oranlarında çelik lif kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Şekil 5.32'ye göre 4,5 MPa'lık bir eğilme dayanımı için narinliği 80 olan çelik lifden 28 kg/m^3 kullanılması yeterli olurken, narinliği 65 olan lifden 38 kg/m^3 ve narinliği 55 olan lifden 48 kg/m^3 kullanılması gerektiği görülmektedir. Buna benzer sonuçlar aynı narinlikteki liflerin tekli ve karma olarak

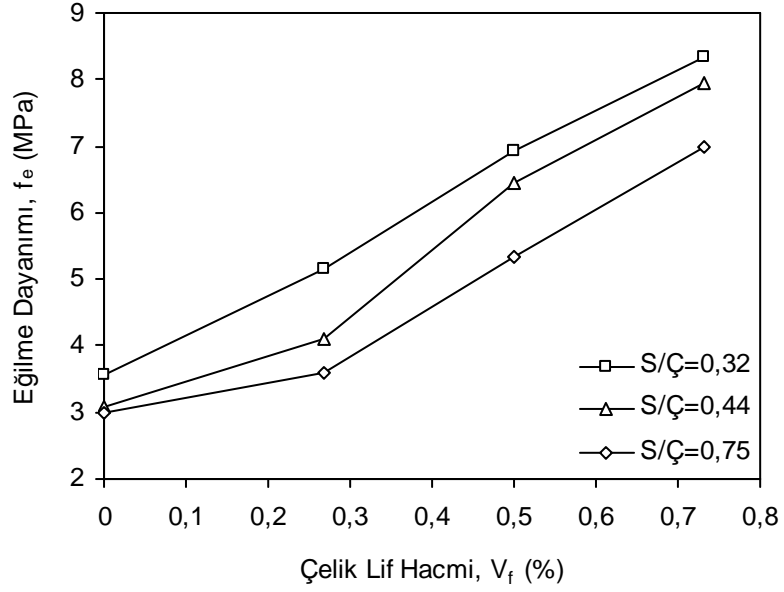
kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir. Benzer şekilde belirli bir eğilme dayanımı için tekli ve karma lifli karışımlarda matris dayanımı azaldıkça aynı narinlikteki lifden daha fazla hacim oranlarında kullanılması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 5.32 : $S/C_s=0,55$ olan numunelerde çelik lif narinliği ve hacim oranının eğilme dayanımına etkisi.

Yüksek lif dayanımına sahip çelik liflerin artan hacim oranlarında karma olarak karışımlarda kullanılmasıyla daha yüksek eğilme dayanımları elde edildiği Şekil 5.33'de görülmektedir. Aynı narinlikteki ($L/d=80$) yüksek dayanımlı çelik liflerin (YD, farklı uzunluklarda) karma olarak kullanıldığı karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı, $S/C_s=0,32$ ve çelik lif hacim oranı %0,73 olan numunelerde 8,35 MPa olarak belirlenmiştir. Eğilme çekme dayanımlarında yalnız betona göre en büyük artışlar; $S/C_s=0,32$ olan numunelerde %170, $S/C_s=0,44$ olan numunelerde %157 ve $S/C_s=0,75$ olan numunelerde %126 olarak elde edilmiştir.

Eğilme dayanımındaki artış, matris kırılmasından sonra lifler ve matris arasındaki ara yüzey bağlarının kırılması meydana geldiğinde betonun maruz kaldığı yükün lifler tarafından taşınması nedeniyle meydana gelmektedir. Çelik lifli betonların kırılma seyri; normal dayanımlı matriste, çatlak ilerlemesi oluşması sırasında liflerin matristen sıyrılmasından yüksek dayanımlı matriste ise lif ve matris arasındaki güçlü aderans nedeniyle liflerin kopmasından oluşmaktadır.



Şekil 5.33 : Farklı $S/\Ç$ oranındaki karma çelik lifli numunelerde, çelik lif hacim oranının eğilme dayanımına etkisi.

Sonuç olarak, $S/\Ç$ oranı, çelik lif dayanımı, lif narınlığı ve hacim oranının numunelerin eğilme dayanımını etkilediği görülmüştür. Çelik liflerin (ND ve YD) betonun eğilme dayanımında sağladığı artışın yarma çekme dayanımına göre daha etkili ve belirgin olduğu gözlenmiştir.

5.1.4.5 Özgül kırılma enerjisi

Dört noktali kiriş eğilme deneylerinden elde edilen yük-sehim değerleri kullanılarak ÇLDB kiriş numunelerin özgül kırılma enerjisi belirlenmiştir. Farklı tip ve dayanımlarda çelik liflerin kullanıldığı numunelere ait özgül kırılma enerjisi sonuçları Çizelge 5.3'de verilmektedir. Farklı lif narınlığında ve hacim oranlarında normal dayanımlı (ND) çelik liflerin tekli olarak eklenmesinin etkisi Şekil 5.34'de ve Şekil 5.35'de, yüksek dayanımlı (YD) çelik liflerin karma olarak eklenmesinin etkisi de Şekil 5.36'da verilmektedir.

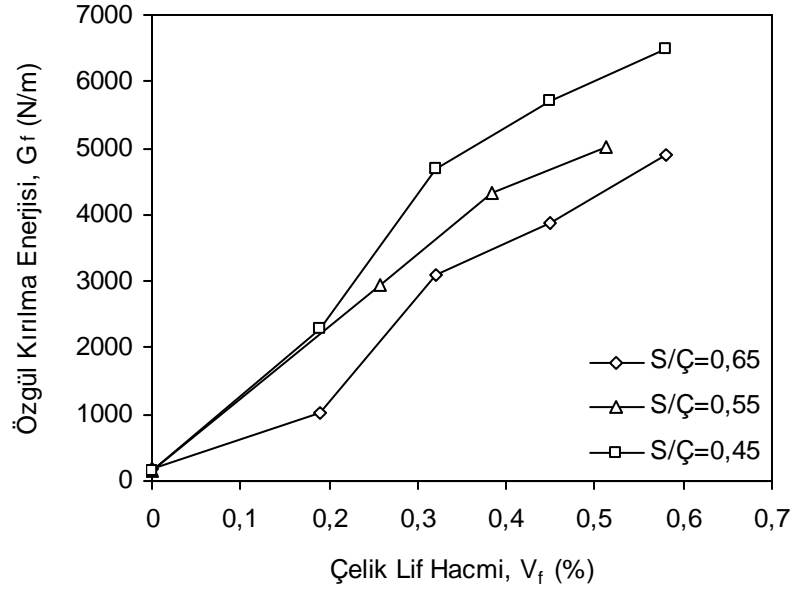
Aynı lif narınlığındeki ($L/d=80$) çelik liflerin artan hacim oranlarında farklı $S/\Ç$ oranındaki karışımlarda kullanılmasıyla yalın betona göre özgül kırılma enerjilerinde önemli oranda artışlar gözlenmiştir. Özgül kırılma enerjilerinde yalın betona göre en fazla artışlar, en yüksek lif hacim oranında ($V_f=\%0,58$) ve $S/\Ç=0,45$ olan numunelerde yaklaşık 44 kat, $S/\Ç=0,65$ olan numunelerde ise yaklaşık 28 kat olmuştur. Artan lif hacim oranına bağlı olarak daha yüksek kırılma enerjilerinin elde edilmesi, matriste daha yüksek hacim oranındaki liflerin çatlak birleşiminde daha

etkili bir köprü rolü oynamasına bağlanabilir. Daha düşük S/Ç oranındaki numunelerde özgül kırılma enerjisinin daha büyük olması, matris fazı ile çelik lifler arasında daha güçlü aderansın oluşmasından kaynaklanmaktadır. Kırılma enerjisindeki bu artış kırılma sürecinde çelik liflerin sıyrılması ile sağlanmaktadır.

Çizelge 5.3 : ÇLDB kiriş numunelere ait eğilme dayanımı ve özgül kırılma enerjisi sonuçları.

Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi %	Seri Kodu	Eğilme Dayanımı f_e , MPa	^a Özgül Kırılma Enerjisi G_f N/m	
1	0,45	Yalın	-	45-NB	3,67	^b 146	
		ND 80/60	0,19	45N80-19	3,91	2283	
			0,32	45N80-32	4,28	4693	
			0,45	45N80-45	5,24	5710	
			0,58	45N80-58	6,52	6496	
	0,65	Yalın	-	65-NB	3,52	^b 175	
		ND 80/60	0,19	65N80-19	3,69	1023	
			0,32	65N80-32	3,93	3368	
			0,45	65N80-45	4,87	3884	
			0,58	65N80-58	5,37	4910	
	2	0,55	Yalın	-	55-NB	3,56	^b 154
			ND 80/60	0,26	55N80-26	3,99	2935
0,38				55N80-38	4,61	4317	
0,51				55N80-51	5,26	5024	
ND 65/60			0,32	55N65-32	4,07	2685	
			0,45	55N65-45	4,38	3346	
			0,58	55N65-58	4,81	4396	
ND 55/30			0,38	55N55-38	4,03	2533	
			0,51	55N55-51	4,30	2995	
0,64			55N55-64	4,58	3206		
3		0,32	Yalın	-	32-NB	3,57	^b 160
			YD 80/60	0,27	32Y80-27	5,15	4454
	0,50			32Y80-50	6,93	6603	
	0,73			32Y80-73	8,35	7377	
	0,44	Yalın	-	44-NB	3,09	^b 242	
		YD 80/40	0,27	44Y80-27	3,74	3947	
			0,50	44Y80-50	6,44	5854	
			0,73	44Y80-73	7,95	7856	
	0,75	Yalın	-	75-NB	2,98	^b 177	
		YD 80/30	0,27	75Y80-27	3,60	2851	
			0,50	75Y80-50	5,33	5415	
			0,73	75Y80-73	6,98	7108	

^a5 mm sehime kadar, ^b kırıldığı sehime kadar

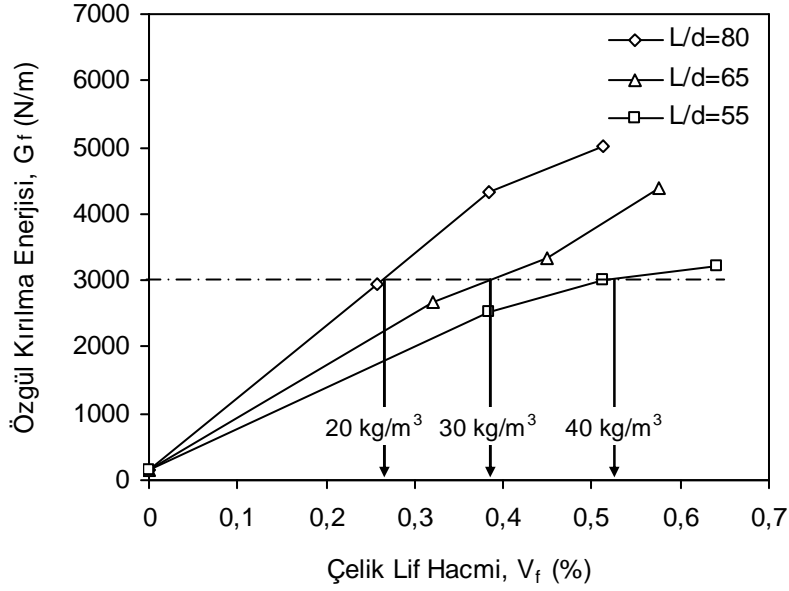


Şekil 5.34 : Farklı S/Ç oranındaki numunelerin özgül kırılma enerjisine çelik lif ($L/d=80$) hacminin etkisi.

Aynı S/Ç oranındaki ($S/\Ç=0,55$) numunelerde lif narınlığı daha yüksek ($L/d=80$) çelik liflerin kullanılmasının özgül kırılma enerjisi üzerinde daha etkili olduğu Şekil 5.35’de görülmektedir. $S/\Ç=0,55$ olan karışımların özgül kırılma enerjilerinde yalnız betona göre en fazla artışın, $L/d=80$ ve çelik lif hacim oranı %0,51 olan numunelerde yaklaşık 33 kat olduğu belirlenmiştir. Diğer farklı narınlıklarda çelik liflerin kullanıldığı karışımlarda en fazla artışlar ise; $L/d=65$ ve çelik lif hacim oranı %0,58 olan numunelerde 28 kat ve $L/d=55$ ve çelik lif hacim oranı %0,64 olan numunelerde 21 kat olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre daha düşük narınlığe sahip çelik liflerin kullanıldığı numunelerin özgül kırılma enerjilerinde daha az oranda artışlar meydana gelmiştir. Aynı zamanda çelik lif narınlığı düşük olan numunelerde artan lif hacim oranıyla özgül kırılma enerjisinde meydana gelen artış oranının, lif narınlığı yüksek olan numunelere göre daha az olduğu belirlenmiştir.

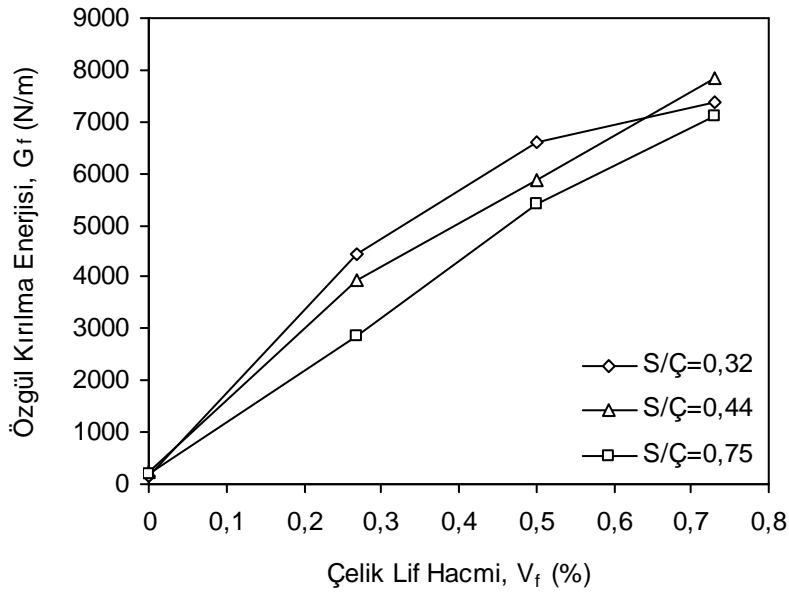
$S/\Ç=0,55$ olan karışımlarda belirli bir özgül kırılma enerjisine sahip beton elde edebilmek için lif narınlığı azaldıkça daha fazla hacim oranlarında çelik lif kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Şekil 5.35’e göre 3000 N/m’lik bir özgül kırılma enerjisi için narınlığı 80 olan çelik lifden 20 kg/m³ kullanılması yeterli olurken, narınlığı 65 olan lifden 30 kg/m³ ve narınlığı 55 olan lifden 40 kg/m³ kullanılması gerektiği görülmektedir. Buna benzer sonuçlar aynı narınlıktaki liflerin tekli ve karma olarak kullanıldığı karışımlarda da elde edilmiştir. Benzer şekilde

belirli bir özgül kırılma enerjisi için tekli ve karma lifli karışımlarda matris dayanımı azaldıkça aynı narinlikteki lifden daha fazla hacim oranlarında kullanılması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 5.35 : $S/\Ç=0,55$ olan numunelerde çelik lif narinliği ve hacim oranının özgül kırılma enerjisine etkisi.

Yüksek dayanımlı çelik liflerin ($L/d=80$) farklı toplam hacim oranlarında karma olarak kullanıldığı numunelerde Şekil 5.36'da görüldüğü gibi özgül kırılma enerjilerinde daha büyük oranda artışlar elde edilmiştir.



Şekil 5.36 : Farklı $S/\Ç$ oranlı karma çelik lifli numunelerde, çelik lif hacim oranının özgül kırılma enerjisine etkisi.

Karma çelik lifli karışımlarda özgül kırılma enerjisinde en yüksek değer, S/Ç=0,44 ve çelik lif hacim oranı %0,73 olan numunelerde 7,86 kN/m olarak belirlenmiştir. Diğer farklı S/Ç oranındaki karışımlarda en yüksek özgül kırılma enerjisi değerleri ise, S/Ç=0,32 olan numunelerde 7,38 kN/m ve S/Ç=0,75 olan numunelerde 7,11 kN/m olarak elde edilmiştir.

5.2 Performans Parametreleri (Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, Tokluk) Sonuçları

Çelik lif donatılı betonların günümüzde performansa dayalı tasarımlarının geliştirilmesi için farklı standartlarda/yöntemlerde performans parametresi olarak eşdeğer eğilme çekme dayanımı veya tokluk değerleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ÇLDB'lerin performans dayalı tasarımında ve sınıflandırılmasında kullanılan eşdeğer eğilme çekme dayanımı sonuçları Almanya Beton Birliği Yöntemi (ABBY) ve Japon standardına (JSCE-SF4) göre ve tokluk indisleri sonuçları ASTM C 1018 standardına göre aşağıda verilmektedir.

5.2.1 Almanya beton birliği yöntemine (ABBY) göre

Çelik lif donatılı betonlar için ABBY'de iki farklı sınır durumuna (sehim bölgesi) göre iki farklı eşdeğer eğilme çekme dayanımı tanımlanmaktadır. Her iki sınır durumu için belirlenen eşdeğer eğilme dayanımları aşağıda verilmektedir.

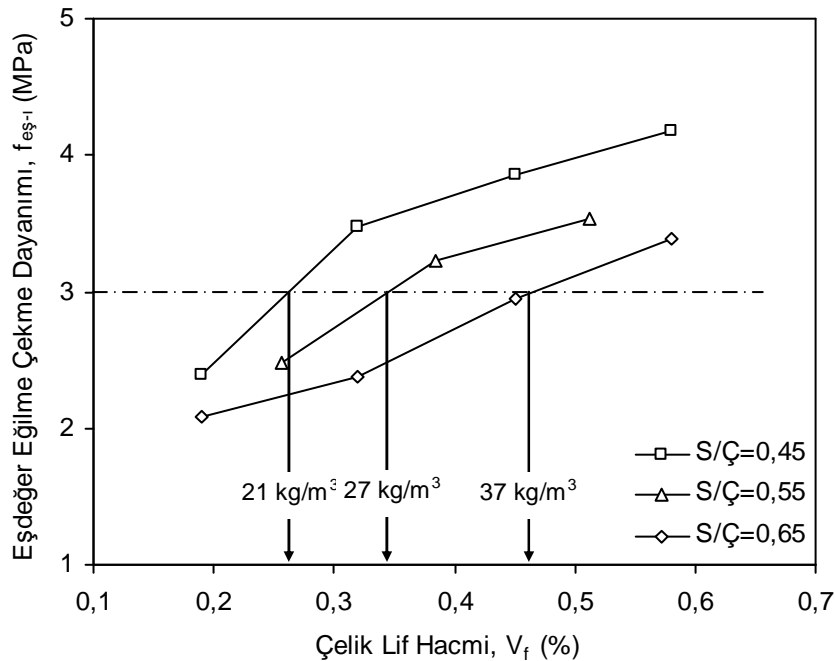
5.2.1.1 Kullanılabilirlik sınır durumu (KSD) için eşdeğer eğilme çekme dayanımı

ABBY'de kullanılabilir sınır durumu için eşdeğer eğilme çekme dayanımı, kiriş eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim verilerinin, $\delta_f = \delta_0 + 0,65$ mm (KSD, I. sehim bölgesi) sehim değerine kadar olan verileri kullanılarak belirlenmiştir. KSD'ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımına, karışımlarda tek tip normal dayanımlı çelik liflerin (ND) farklı narinlik ve hacim oranlarında kullanılmasının etkisi Şekil 5.37'de ve Şekil 5.38'de, yüksek dayanımlı çelik liflerin (YD) farklı hacim oranlarında karma olarak kullanılmasının etkisi de Şekil 5.39'da verilmektedir. ÇLDB kiriş numunelere ait kullanılabilirlik sınır durumuna göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımı sonuçları Çizelge 5.4'de verilmektedir.

Çelik liflerin (L/d=80) tekli olarak katıldığı numunelerde KSD'ye göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımı değerleri, her bir S/Ç oranında lif hacim oranının

artışıyla birlikte arttığı gözlenmiştir. KSD için matris dayanımı yüksek olan numunelerde daha yüksek eşdeğer eğilme çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Bu sınır durumunda, eşdeğer eğilme çekme dayanımlarında en yüksek değerler, %0,58 çelik hacim oranında; S/Ç=0,45 olan numunelerde 5,26 MPa, S/Ç=0,65 olan numunelerde 4,60 MPa olarak belirlenmiştir.

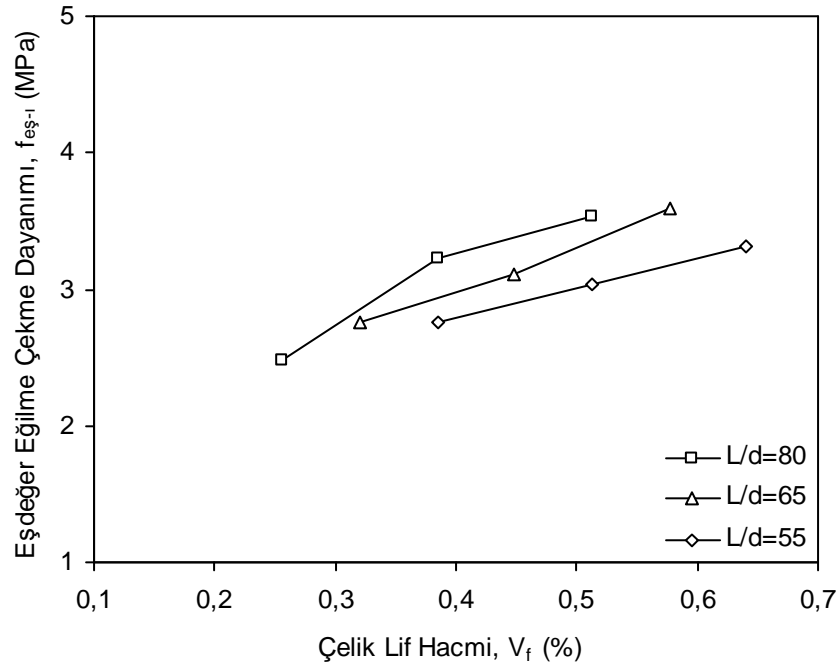
Aynı narinlikteki lifin ($L/d=80$) farklı matris dayanımlarında kullanıldığı karışımlarda KSD için belirli bir eşdeğer eğilme çekme dayanımına sahip beton elde edebilmek için matris dayanımı azaldıkça (S/Ç oranı arttıkça) daha fazla hacim oranlarında çelik lif kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Şekil 5.37'ye göre 3 MPa'lık bir eşdeğer eğilme çekme dayanımı için S/Ç=0,45 olan karışıma 21 kg/m^3 çelik lif eklenmesi yeterli olurken, S/Ç=0,55 olan karışıma 27 kg/m^3 ve S/Ç=0,65 olan karışıma 37 kg/m^3 çelik lif eklenmesi gerektiği görülmektedir. Buna benzer sonuçlar aynı matris dayanımındaki karışımlara farklı narinlikteki liflerin tekli ve aynı narinlikteki liflerin karma olarak kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir. Sonuç olarak, belirli bir eşdeğer eğilme çekme dayanımı için tek tip çelik lifli karışımlarda lif narinliği azaldıkça karma çelik lifli karışımlarda ise matris dayanımı azaldıkça daha fazla hacim oranlarında lif kullanılması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 5.37 : KSD için eşdeğer eğilme dayanımına, S/Ç oranı ve çelik lif ($L/d=80$) hacim oranının etkisi.

Aynı S/Ç (S/Ç=0,55) oranındaki numunelerin eşdeğer eğilme çekme dayanımında (KSD) Şekil 5.38'de görüldüğü gibi narinliği yüksek olan çelik liflerin etkisinin daha

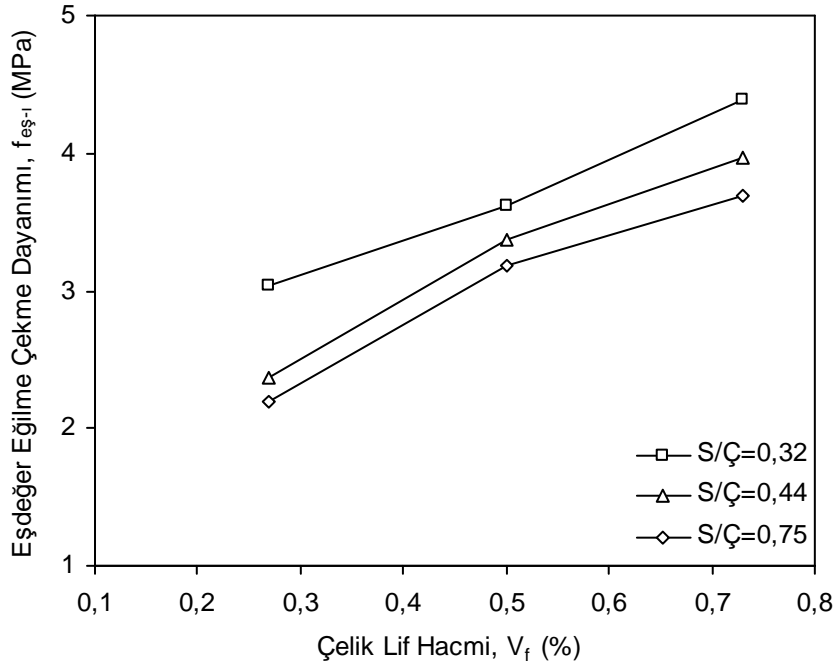
fazla olduğu belirlenmiştir. Farklı narinliğe sahip çelik lifli numuneler arasında KSD için en büyük eşdeğer eğilme çekme dayanımı, $L/d=80$ ve $V_f = \%0,51$ olan numunelerde 3,54 MPa olarak bulunmuştur. Farklı lif narinliğine sahip numuneler arasında aynı lif hacim oranına göre eşdeğer eğilme dayanımı değerlerinde (KSD) en fazla artış, narinliği 80 ve çelik lif hacim oranı $\%0,51$ olan betonlarda elde edilmiştir. Eşdeğer eğilme çekme dayanımlarında lif hacim oranının artmasıyla meydana gelen artış oranlarının, lif narinliği düşük olan numunelerde daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 5.38 : KSD için eşdeğer eğilme dayanımına çelik lif narinliği ve hacim oranının etkisi.

Yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak kullanıldığı karışımlarda $S/Ç$ ve çelik lif hacim oranı arttıkça daha yüksek eşdeğer eğilme çekme dayanımları (KSD) elde edilmiştir. En yüksek lif hacim oranında ($V_f = \%0,73$) KSD için eşdeğer eğilme dayanımı değerleri; $S/Ç=0,32$ olan numunelerde 4,39 MPa, $S/Ç=0,44$ olan numunelerde 3,96 MPa ve $S/Ç=0,75$ olan numunelerde 3,69 MPa olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak KSD'ye göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımı değerleri, $S/Ç$ oranı, çelik lif dayanımı, narinliği ve hacim oranının artmasıyla birlikte arttığı gözlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar yarı kırılğan bir malzeme olan betonun, çelik liflerin eklenmesi ile sünek kompozit bir malzemeye dönüştüğünü göstermektedir.

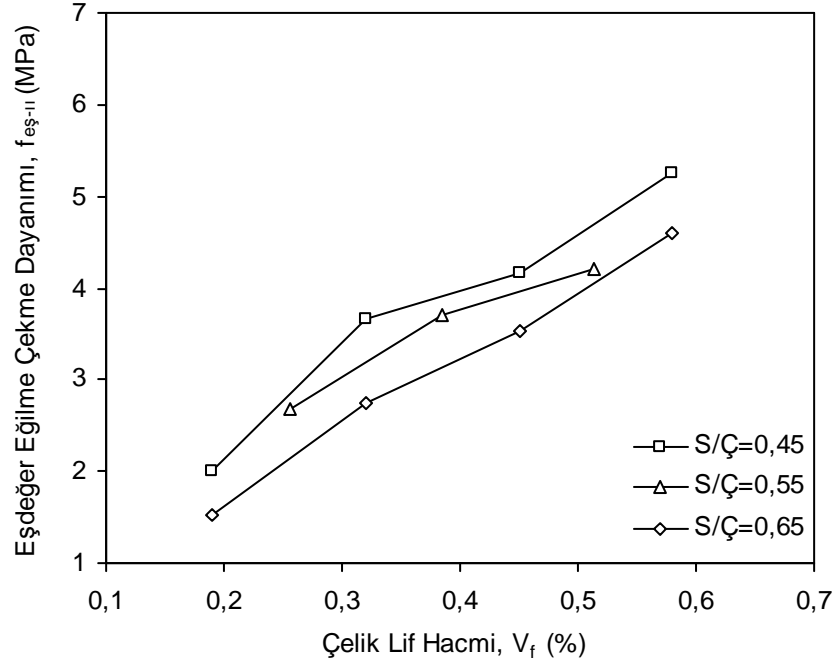


Şekil 5.39 : KSD için eşdeğer eğilme dayanımına, S/Ç oranı ve karma çelik lif hacim oranının etkisi.

5.2.1.2 Taşıma gücü sınır durumu (TSD) için eşdeğer eğilme çekme dayanımı

ABBY’de taşıma gücü sınır durumu için eşdeğer eğilme çekme dayanımı, kiriş eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim verilerinin, $\delta_{II}=\delta_0+3,15$ mm (TSD, II. sehim bölgesi) sehim değerine kadar olan verileri kullanılarak belirlenmiştir. KSD’ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımına, karışımlarda tek tip çelik liflerin (ND) farklı narinlikte ve hacim oranlarında kullanılmasının etkisi Şekil 5.40’da ve Şekil 5.41’de, çelik liflerin (YD) farklı hacim oranlarında karma olarak kullanılmasının etkisi de Şekil 5.42’de verilmektedir. ÇLDB kiriş numunelere ait taşıma gücü sınır durumuna göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımı sonuçları Çizelge 5.4’de verilmektedir.

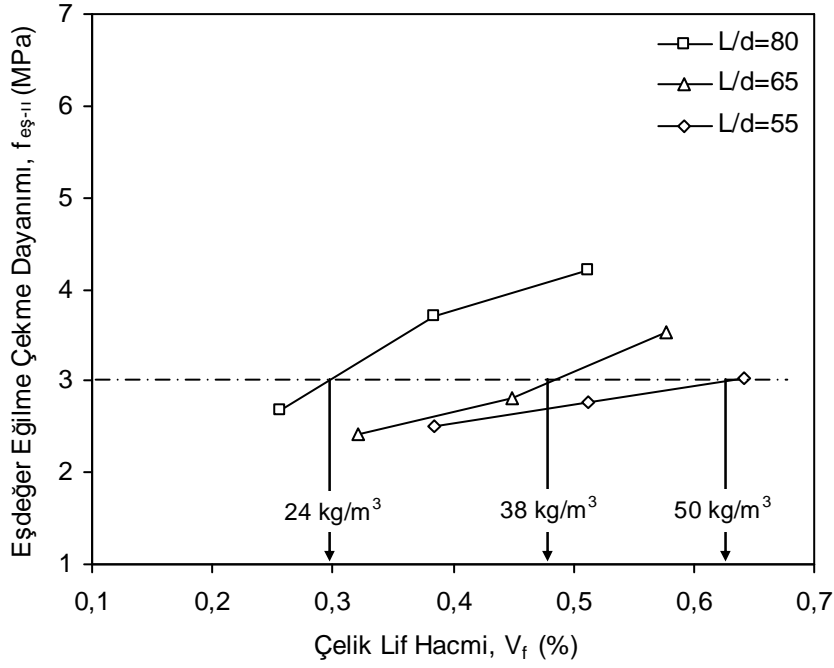
Normal dayanımlı çelik liflerin tekli olarak kullanıldığı karışımlarda TSD’ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımları, tüm S/Ç oranlarında çelik lif hacim oranının artmasıyla birlikte arttığı belirlenmiştir. ÇLDB’lerin TSD’ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımının, KSD’de olduğu gibi düşük S/Ç oranına sahip numunelerde daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5.40 : TSD için eşdeğer eğilme dayanımına, S/C oranı ve çelik lif hacim oranının etkisi.

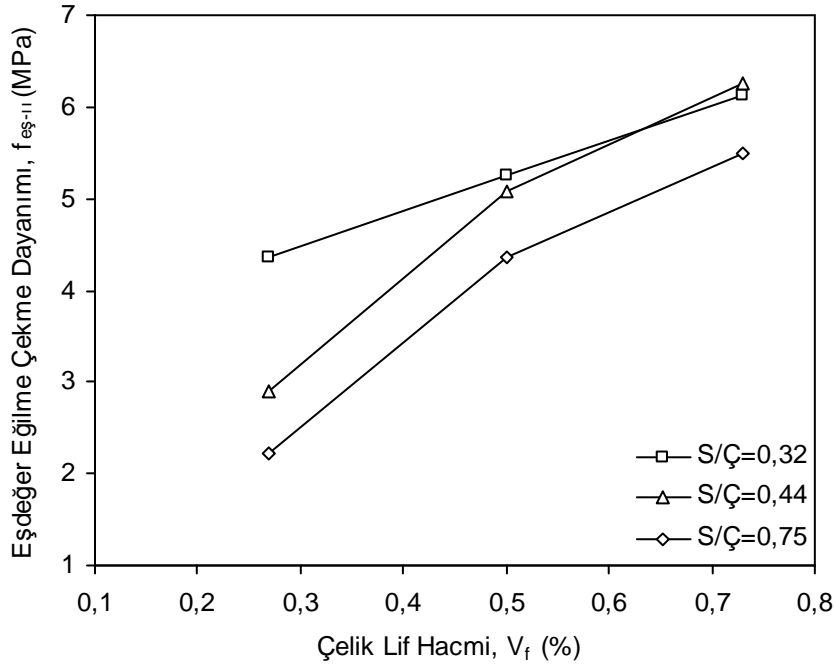
Aynı matris dayanımında ($S/C=0,55$) Şekil 5.41’de görüldüğü gibi çelik lif narinliği azaldıkça, TSD’ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımının artan lif hacmiyle birlikte daha az oranda arttığı gözlenmiştir. En düşük lif hacim oranındaki değerlere göre en fazla artışlar; $L/d=80$ olan çelik lifli numunelerde %57, $L/d=65$ olan çelik lifli numunelerde %46 ve $L/d=55$ olan numunelerde %21 oranında en yüksek lif hacim oranlarında meydana gelmiştir. Bu sonuca göre yüksek narinliğe sahip çelik liflerin, TSD’ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımı üzerinde daha etkili olduğu söylenebilir.

$S/C=0,55$ olan karışımlarda TSD’ye göre belirli bir eşdeğer eğilme çekme dayanımına sahip betonlar elde edebilmek için lif narinliği azaldıkça daha fazla oranlarda çelik lif kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Şekil 5.41’e göre TSD için 3 MPa’lık bir eşdeğer eğilme çekme dayanımı halinde narinliği 80 olan çelik liften 24 kg/m^3 kullanılması yeterli olurken, narinliği 65 olan liften 38 kg/m^3 ve narinliği 55 olan liften 50 kg/m^3 kullanılması gerektiği görülmektedir. Buna benzer sonuçlar, aynı narinlikteki liflerin tekli ve karma olarak kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir. Benzer şekilde, TSD’ye göre belirli bir eşdeğer eğilme çekme dayanımı için tekli ve karma lifli karışımlarda matris dayanımı azaldıkça aynı narinlikteki lifden daha fazla hacim oranlarında kullanılması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 5.41 : TSD için eşdeğer eğilme dayanımına, çelik lif narınlığı ve hacim oranının etkisi.

Yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak kullanıldığı karışımlarda, S/Ç ve lif hacim oranı arttıkça TSD'ye göre daha yüksek eşdeğer eğilme çekme dayanımları elde edilmiştir.



Şekil 5.42 : TSD için eşdeğer eğilme dayanımına, S/Ç ve çelik lif hacim oranının etkisi.

Farklı matris dayanımındaki karışımlarda, en yüksek çelik lif hacim oranında ($V_f = \%0,73$) TSD'ye göre en yüksek eşdeğer eğilme çekme dayanımı değerleri; $S/Ç=0,32$ olan numunelerde 6,13 MPa, $S/Ç=0,44$ olan numunelerde 6,26 MPa ve $S/Ç=0,75$ olan numunelerde 5,49 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre en yüksek matris dayanımlı ($S/Ç=0,32$) numunelerde, artan lif hacmine rağmen TSD'ye göre daha düşük eşdeğer eğilme çekme dayanımı elde edilmesi numunelerde tepe yükü sonrasında liflerde meydana kopma kırılmaları nedeniyle eğrisel olarak daha ani şekil değiştirme yumuşaması göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.4 : ÇLDB kırıç numunelere ait kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumlarına göre eşdeğer eğilme çekme dayanımı sonuçları.

Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi V_f , %	Seri Kodu	Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, MPa		
					KSD ($f_{eş-I}$)	TSD ($f_{eş-II}$)	
1	0,45	Yalın	-	45-NB	-	-	
		ND 80/60	0,19	45N80-19	2,39	2,00	
			0,32	45N80-32	3,48	3,67	
			0,45	45N80-45	3,86	4,16	
			0,58	45N80-58	4,18	5,26	
	0,65	Yalın	-	65-NB	-	-	
		ND 80/60	0,19	65N80-19	2,08	1,53	
			0,32	65N80-32	2,38	2,75	
			0,45	65N80-45	2,94	3,53	
			0,58	65N80-58	3,38	4,60	
	2	0,55	Yalın	-	55-NB	-	-
			ND 80/60	0,26	55N80-26	2,49	2,68
0,38				55N80-38	3,22	3,70	
0,51				55N80-51	3,54	4,21	
ND 65/60			0,32	55N65-32	2,75	2,42	
			0,45	55N65-45	3,11	2,82	
			0,58	55N65-58	3,60	3,53	
ND 55/30			0,38	55N55-38	2,76	2,51	
			0,51	55N55-51	3,03	2,78	
0,64			55N55-64	3,32	3,02		
3		0,32	Yalın	-	32-NB	-	-
			YD 80/60	0,27	32Y80-27	3,04	4,37
	0,50			32Y80-50	3,62	5,26	
	0,73			32Y80-73	4,39	6,13	
	0,44	Yalın	-	44-NB	-	-	
		YD 80/40	0,27	44Y80-27	2,37	2,90	
			0,50	44Y80-50	3,37	5,08	
			0,73	44Y80-73	3,96	6,26	
		0,75	Yalın	-	75-NB	-	-
	YD 80/30		0,27	75Y80-27	2,19	2,23	
			0,50	75Y80-50	3,19	4,35	
			0,73	75Y80-73	3,69	5,49	

Her iki deformasyon bölgesine göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımı değerleri, her bir lif narinliğinde çelik lif hacim oranının artmasıyla birlikte arttığı gözlenmiştir. Farklı narinliğe sahip çelik lifli betonlar arasında aynı lif hacim oranına göre her iki eşdeğer eğilme çekme dayanımı değerlerinde en fazla artış, narinliği 80 ve lif hacim oranı %0,51 olan betonlarda meydana gelmiştir. Karma ÇLDB'lerde liflerin tekli olarak kullanıldığı numunelere göre her iki eşdeğer eğilme çekme dayanımlarında daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu sonuçta, karma lifli karışımlarda kullanılan çelik lifin çekme dayanımının daha yüksek olmasının yanında liflerin karma olarak kullanılmasının etkisi olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak, KSD ve TSD'ye göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımlarının S/Ç oranı, lif dayanımı, narinliği ve hacim oranı ile etkilendiği belirlenmiştir. Genel olarak matris dayanımı, lif dayanımı, narinliği ve hacim oranı arttıkça KSD ve TSD için daha yüksek eşdeğer eğilme çekme dayanımları elde edilmiştir.

5.2.2 ASTM standardına (ASTM C 1018) göre

ASTM C 1018 standardında ÇLDB'lerin yük-sehim eğrileri altındaki alan kullanılarak tokluk indisleri ve kalıcı dayanım faktörleri tanımlanmaktadır. Tokluk indisi değerlerinin düşük olması numunede ilk çatlak sonrası dayanımdaki azalmanın daha büyük ve enerji yutma kapasitesinin daha az olduğunu göstermektedir. Çatlak sonrasındaki farklı aşamalarda numunedeki hasar derecesi kalıcı dayanım faktörü ile tanımlanabilmektedir. Bu standarda göre kalıcı dayanım faktörlerine bağlı olarak ÇLDB'lerin kalıcı dayanım sınıfları belirlenebilmektedir. Farklı S/Ç oranına sahip karışımlara farklı dayanımda, narinlikte ve hacim oranlarında çelik liflerin tekli ve karma olarak eklenmesinin ÇLDB'lerin tokluk indisleri ve kalıcı dayanım faktörlerine etkisi Çizelge 5.5'de verilmektedir.

Farklı S/Ç oranına sahip karışımlarda kullanılan her bir lif narinliğinde hacim oranındaki artışla birlikte Çizelge 5.5'de görüldüğü gibi ÇLDB'lerin tokluk indisleri ve kalıcı dayanım faktörlerinin arttığı gözlenmiştir. Tokluk indisleri ve kalıcı dayanım faktörlerinin, matris dayanımı ve lif narinliği yüksek olan numunelerde genelde daha büyük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak farklı S/Ç oranındaki karışımlara farklı narinlikte ve hacim oranlarında normal ve yüksek dayanımlı çelik liflerin eklenmesiyle, betonun tokluğunun arttığı ve çatlak sonrasında daha az hasar gördüğü belirlenmiştir.

Çizelge 5.5 : ÇLDB'lerin ASTM C 1018'e göre tokluk indisleri ve kalıcı dayanım faktörleri.

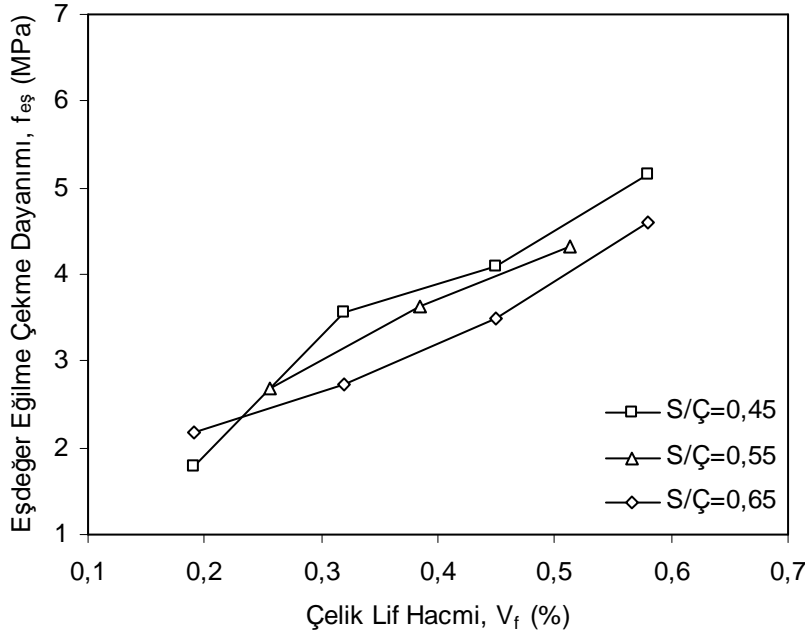
Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi, V_f , %	Tokluk İndisleri			Kalıcı Dayanım Faktörleri, %	
				I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
1	0,45	ND 80/60	0,19	3,52	6,08	10,20	51,05	41,23
			0,32	4,75	9,80	18,20	101,09	83,95
			0,45	4,80	10,17	19,39	107,41	92,21
			0,58	4,85	10,66	19,64	116,05	89,84
	0,65		0,19	3,53	7,12	13,89	71,97	67,64
			0,32	3,69	7,46	14,68	75,44	72,26
			0,45	3,72	7,73	15,10	80,14	73,75
			0,58	4,44	9,81	21,03	107,40	112,23
2	0,55	ND 80/60	0,26	4,03	7,87	14,77	76,79	69,01
			0,38	4,50	9,53	17,99	100,58	84,68
			0,51	4,79	10,29	20,84	109,97	105,54
		ND 65/60	0,32	4,41	6,62	11,30	44,27	46,73
			0,45	3,95	7,24	13,31	65,86	60,61
			0,58	4,31	9,13	15,77	96,31	66,45
		ND 55/30	0,38	3,91	7,50	12,28	71,77	47,78
			0,51	4,07	7,80	13,25	74,64	54,45
			0,64	4,33	8,58	13,78	85,00	51,92
	0,73		4,68	10,43	22,45	115,08	120,19	
3	0,32	YD 80/60 80/40 80/30	0,27	4,05	8,47	17,32	88,53	88,44
			0,50	5,08	11,26	26,78	123,42	155,22
			0,73	5,21	12,04	28,32	136,60	162,77
	0,44		0,27	2,97	5,53	10,62	51,15	50,90
			0,50	4,68	10,43	22,45	115,08	120,19
			0,73	5,32	12,26	27,63	138,91	153,68
	0,75		0,27	4,49	10,32	22,62	116,41	123,00
			0,50	5,08	12,06	28,85	139,63	167,88
			0,73	5,69	14,06	28,75	167,39	146,92
			0,73	5,69	14,06	28,75	167,39	146,92

5.2.3 Japon standardına (JSCE-SF4) göre

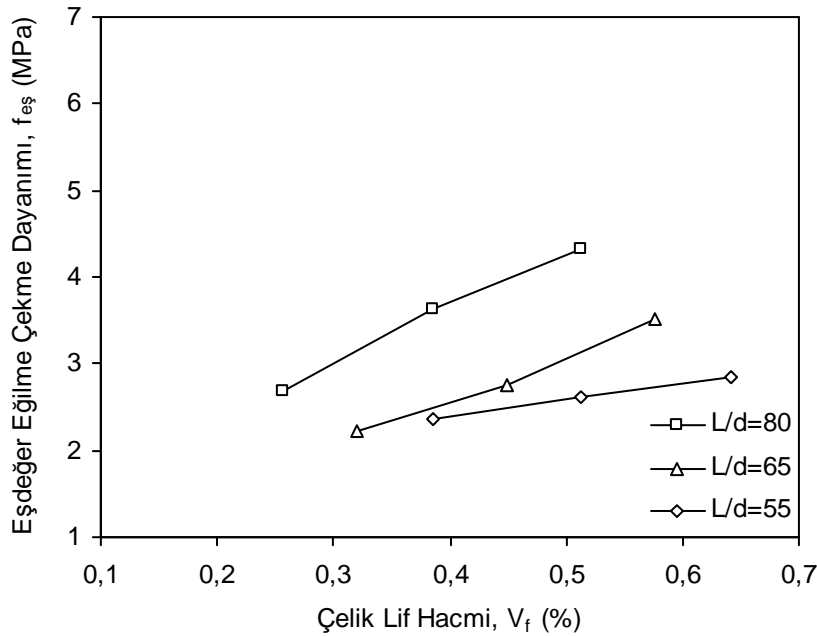
Japon standardında (JSCE-SF4), ÇLDB'ler için yük-sehim eğrisinde kiriş açıklığının 1/150'sine karşılık gelen sehim değerine kadar olan yük-sehim değerleri kullanılarak belirlenen tek bir eşdeğer eğilme çekme dayanımı tanımlanmaktadır. Japon standardına göre farklı S/Ç oranında, farklı dayanım, narinlikte ve hacim oranlarında çelik liflerin tekli olarak kullanıldığı numunelerde eşdeğer eğilme dayanımının lif hacim oranı ile değişimi Şekil 5.43'de ve Şekil 5.44'de, çelik liflerin karma olarak kullanıldığı numunelerde eşdeğer eğilme dayanımının lif hacim oranı ile değişimi Şekil 5.45'de verilmektedir. Ayrıca her bir ÇLDB numuneye ait belirlenen tokluk ve eşdeğer eğilme dayanımı değerleri Çizelge 5.6'da verilmektedir.

Her bir farklı S/Ç oranındaki karışımlarda, çelik lif dayanımı, narinliği ve hacim oranı arttıkça eşdeğer eğilme dayanımının arttığı belirlenmiştir. Eşdeğer eğilme

dayanımı değerinin, tek lifli karışımlarda en düşük S/Ç oranında ($S/\text{Ç}=0,45$) ve lif narinliği 80 olan numunelerde en fazla olduğu görülmüştür.



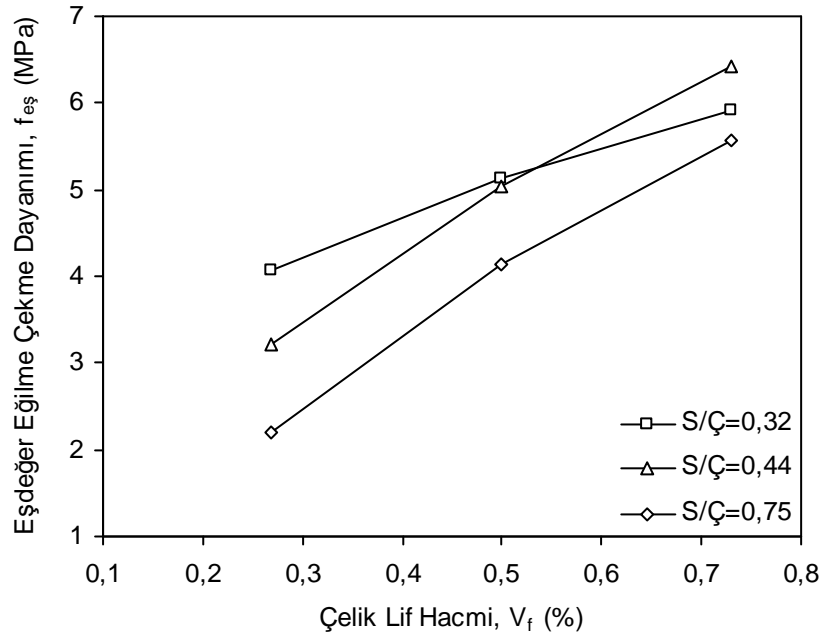
Şekil 5.43 : JSCE standardına göre eşdeğer eğilme dayanımına, S/Ç ve çelik lif hacim oranının etkisi.



Şekil 5.44 : JSCE standardına göre eşdeğer eğilme dayanımına çelik lif narinliği ve hacim oranı ile değişimi.

Çelik liflerin farklı matris dayanımlı karışımlarda karma olarak kullanıldığı numunelerde eşdeğer eğilme çekme dayanımının lif hacim oranının artmasıyla

birlikte arttığı belirlenmiştir. Karma lifli karışımlarda, en yüksek lif hacim oranında ($V_f=0,73$) en fazla artış $S/Ç=0,44$ olan numunelerde, en az artış $S/Ç=0,75$ olan numunelerde elde edilmiştir. En yüksek matris dayanımlı karışımlarda belirli bir lif hacim oranından sonra eşdeğer eğilme çekme dayanımındaki artış oranının azaldığı gözlenmiştir. Bu yüksek matris dayanımlı karma lifli karışımlarda belirli bir lif hacim oranından sonra tepe yükü sonrasında ani bir şekil değiştirme yumuşaması göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.45: JSCE standardına göre eşdeğer eğilme dayanımına $S/Ç$ oranı ve çelik lif narinliğinin etkisi.

ABBY'ye göre farklı lif dayanımında, narinlikte ve hacim oranlarında eşdeğer eğilme çekme dayanımlarında belirlenen değişime paralel bir değişim, Japon standardı içinde elde edilmiştir. Ayrıca, bu yöntemle belirlenen eşdeğer eğilme dayanımı değerlerinin ABBY'de taşıma gücü sınır durumuna göre belirlenen değerlere göre biraz daha büyük olduğu görülmüştür. Bu, Japon standardına göre eşdeğer eğilme çekme dayanımının belirlenmesinde kullanılan sehim değerinin ABBY'deki sehim değerlerinden daha büyük olması nedeniyle hesaplamalarda yük-sehim eğrisi altındaki daha fazla alanın kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.6: Japon standardına göre tokluk ve eşdeğer eğilme çekme dayanımı sonuçları.

Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi, V_f , %	Tokluk, T Nm	Eşdeğer Eğilme Çekme, $f_{eş}$, MPa
1	0,45	ND 80/60	0,19	40,33	1,79
			0,32	79,82	3,55
			0,45	92,17	4,09
			0,58	116,05	5,16
	0,65		0,19	49,17	2,18
			0,32	61,29	2,72
			0,45	78,72	3,50
			0,58	103,47	4,60
2	0,55	ND 80/60	0,26	60,54	2,69
			0,38	81,47	3,62
			0,51	97,29	4,32
		ND 65/60	0,32	50,13	2,22
			0,45	61,99	2,75
			0,58	79,10	3,51
		ND 55/60	0,38	52,98	2,35
			0,51	58,99	2,62
			0,64	63,81	2,83
			0,27	91,18	4,08
3	0,32	YD 80/60 80/40 80/30	0,50	115,30	5,12
			0,73	132,89	5,90
			0,27	72,32	3,21
	0,44		0,50	113,12	5,02
			0,73	144,54	6,42
			0,27	49,52	2,20
	0,75		0,50	92,92	4,13
			0,73	125,34	5,57

5.3 Çelik Lif Donatılı Betonların Performans Sınıfı Sonuçları

5.3.1 Almanya beton birliği yöntemine (ABBY) göre

ABBY'ye göre ÇLDB'lerin performans sınıfları, küçük (KSD) ve büyük sehim (TSD) durumuna göre hesaplanan eşdeğer eğilme çekme dayanımları kullanılarak belirlenebilir. Çelik lif donatılı betonlar için ABBY'ye göre belirlenen performans sınıfları Çizelge 5.7'de verilmektedir. Örneğin, S/Ç oranı 0,55 ve L/d=80 olan normal dayanımlı çelik liflerin % 0,51 oranında kullanıldığı 55N80-51 kodlu karışımın performans sınıfı, Çizelge 5.7'de verildiği gibi C 35/45 NSF 3,54/4,21 şeklinde yazılabilir. Bu gösterimde; C35/40, ÇLDB'nin basınç dayanım sınıfını, NDL ile normal çekme dayanımlı çelik lif olduğunu 3,54/4,21 ile sırasıyla KSD ve

TSD'ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımı değerlerini belirtmektedir. Benzer gösterimle 32Y80-27 kodlu karışım için performans sınıfı; C90/105 YDL 3,04/4,37 şeklinde yazılabilir. Burada YDL ile yüksek çekme dayanımlı çelik lif olduğu ifade edilmektedir.

Çizelge 5.7 : ÇLDB'lerin ABBY'ye göre performans sınıfları.

S/Ç Oranı	Beton Sınıfı	Lif Tipi	Lif Hacmi $V_f, \%$	Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı MPa		Performans sınıfı
				KSD $f_{eş-I}$	TSD $f_{eş-II}$	
0,45	C40/45	ND	0,19	2,39	2,00	C40/45 NDL 2,39/2,00
			0,32	3,48	3,67	C40/45 NDL 3,48/3,67
			0,45	3,86	4,16	C40/45 NDL 3,86/4,16
			0,58	4,18	5,26	C40/45 NDL 4,18/5,26
0,65	C30/37	80/60	0,19	2,08	1,53	C30/37 NDL 2,08/1,53
			0,32	2,38	2,75	C30/37 NDL 2,38/2,75
			0,45	2,94	3,53	C30/37 NDL 2,94/3,53
			0,58	3,38	4,60	C30/37 NDL 3,38/4,60
0,55	C35/40	ND 80/60	0,26	2,49	2,51	C35/40 NDL 2,49/2,51
			0,38	3,22	3,70	C35/40 NDL 3,22/3,70
			0,51	3,54	4,21	C35/40 NDL 3,54/4,21
		ND 65/60	0,32	2,75	2,42	C35/40 NDL 2,75/2,42
			0,45	3,11	2,82	C35/40 NDL 3,11/2,82
			0,58	3,60	3,53	C35/40 NDL 3,60/3,53
		ND 55/60	0,38	2,76	2,37	C35/40 NDL 2,76/2,37
			0,51	3,03	2,78	C35/40 NDL 3,03/2,78
0,32	C90/105	YD	0,27	3,04	4,37	C90/105 YDL 3,04/4,37
			0,50	3,62	5,26	C90/105 YDL 3,62/5,26
			0,73	4,39	6,13	C90/105 YDL 4,39/6,13
0,44	C60/75	80/60	0,27	2,37	2,90	C60/75 YDL 2,37/2,90
			0,50	3,37	5,08	C60/75 YDL 3,37/5,08
			0,73	3,96	6,26	C60/75 YDL 3,96/6,26
0,75	C30/37	80/40	0,27	2,19	2,23	C30/37 YDL 2,19/2,23
			0,50	3,19	4,35	C30/37 YDL 3,19/4,35
			0,73	3,69	5,49	C30/37 YDL 3,69/5,49

Belirli bir sehim durumu için belirli bir sünekliği ifade eden istenilen bir eşdeğer eğilme çekme dayanımı değeri için farklı çelik lifli karışım tasarımları belirlenebilir. Örneğin; daha küçük sehim durumunu ifade eden KSD'ye göre 3,5 MPa üzerinde bir eşdeğer eğilme dayanımı istendiğinde Çizelge 5.7'ye göre farklı ÇLDB karışım çözümleri belirlenebilir. Bu karışım çözümleri içerisinde istenilen beton basınç dayanımı ve çelik lif tipine göre de en uygun çözüm seçilebilir. Böylece belirli bir

basınç dayanımına ve süneklığe sahip belirli bir işlenebilirlikte betonların elde edilmesi mümkün olabilecektir.

5.3.2 ASTM standardına (ASTM C 1018) göre

Farklı dayanım ve narinlikteki çelik liflerin kullanıldığı ÇLDB'lerin ASTM C1018 standardına göre belirlenen kalıcı dayanım faktörlerine bağlı olarak sınıflandırması ve performansı Çizelge 5.8'de verilmektedir.

Çizelge 5.8 : ÇLDB'lerin ASTM C 1018 standardına göre sınıfları.

S/Ç Oranı	Beton Sınıfı	Lif Tipi	Lif Hacmi $V_f, \%$	Kalıcı Dayanım Faktörleri		Kalıcı Dayanım Sınıfı	Performans
				$R_{5,10}$	$R_{10,20}$		
0,45	C40/45	ND 80/60	0,19	51,05	41,23	II	Orta
			0,32	101,09	83,95	II-III	Orta-iyi
			0,45	107,41	92,21	IV	Mükemmel
			0,58	116,05	89,84	IV	Mükemmel
0,65	C30/37		0,19	71,97	67,64	II	Orta
			0,32	75,44	72,26	IV	Mükemmel
			0,45	80,14	73,75	IV	Mükemmel
			0,58	107,40	112,23	IV	Mükemmel
0,55	C35/40	ND 80/60	0,58	76,79	69,01	IV	Mükemmel
			0,38	100,58	84,68	III-IV	İyi-Mükemmel
			0,51	109,97	105,54	IV	Mükemmel
		ND 65/60	0,32	44,27	46,73	II	Orta
			0,45	65,86	60,61	IV	Mükemmel
			0,58	96,31	66,45	IV	Mükemmel
		ND 55/60	0,38	71,77	47,78	II-III	Orta-iyi
			0,51	74,64	54,45	IV	Mükemmel
0,64	85,00		51,92	II-IV	İyi		
0,32	C90/105	YD 80/60 80/40 80/30	0,26	88,53	88,44	IV	Mükemmel
			0,50	123,42	155,22	IV	Mükemmel
			0,73	136,60	162,77	IV	Mükemmel
0,44	C60/75		0,26	51,15	50,90	II	Orta
			0,50	115,08	120,19	IV	Mükemmel
			0,73	138,91	153,68	IV	Mükemmel
0,75	C30/37		0,26	116,41	123,00	IV	Mükemmel
			0,50	139,63	167,88	IV	Mükemmel
			0,73	167,39	146,92	IV	Mükemmel

Farklı matris dayanımlarındaki betona farklı narinlikte ve hacim oranında çelik lifler eklenmesiyle ÇLDB'nin kalıcı dayanım faktörlerine göre performans sınıflarının yükseldiği görülmüştür. Böylece çatlak sonrası daha az hasara uğrayan sünek ÇLDB'ler elde edilmiştir.

6. DENEY SONUÇLARININ MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

6.1 Optimizasyonun Amacı ve Kapsamı

Optimizasyonun amacı;

- a) Seçilen bağımsız değişkenlere “faktörlere” bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarını “tepkilerini” temsil eden en iyi modellerin belirlenmesi,
- b) Bu modellere optimizasyon yöntemleri uygulanması sonucu belirlenen amaç fonksiyonlarına bağlı olarak optimum sonuçların elde edilmesidir.

Bu çalışmada, farklı narinlikte ve hacim oranlarında lif içeren farklı matris dayanımlı ÇLDB’lerin mekanik özellikleri ve performans parametreleri elde edilmiştir. Seçilen bağımsız değişkenlere (S/Ç oranı, lif narinliği ve hacim oranına) bağlı olarak elde edilen bağımlı değişkenler (yarma çekme, KSD ve TSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımı ve özgül kırılma enerjisi) arasında oluşturulan modellere çok amaçlı optimizasyon uygulanarak her bir faktör ve tepki için belirlenen amaç fonksiyonlarına göre ÇLDB’lerin optimum karışım tasarımları elde edilmiştir. Deney sonuçlarının modellenmesi ve optimizasyonu, matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin ortak kullanılması esasına dayanan Tepki Yüzeyi Yöntemi (TY Y) Faktöriyel Tasarım Metodu ile Design-Expert 6.0.7 programı kullanılarak yapılmıştır.

6.2 Tepki yüzeyi yöntemi (TY Y)

Mühendisler genellikle optimum sonuç veren tepkilerin veri giriş parametrelerinin değerlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Optimizasyon, verilerin dağılım özelliklerine göre belirlenen bir fonksiyonun minimumu veya maksimumu olabilmektedir. TY Y, günümüzde tepkilerin optimizasyonunda yaygın olarak kullanılan optimizasyon tekniklerinden biridir [132]. TY Y ile ilgili çalışmalar 1930’lu yıllara kadar dayanmaktadır. Bu yöntemin kullanılmaya başlanması, Box ve Wilson’nın (1951)

yapmış olduğu çalışmanın istatistik komitesi tarafından kabul edilmesiyle başlamıştır.

TYY’de matematiksel modeller ve istatistiksel teknikler kullanılarak optimum sonuçların elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemde optimize edilmek istenen değişkenler grubu olan bağımlı değişkenler “tepkiler” ve seçilebilir grup olan bağımsız değişkenler “faktörler” olmak üzere iki değişken grubu arasındaki ilişki araştırılmaktadır. Uygulanması kolay ve deney sayısını azaltması nedeniyle ekonomik olan TY Y, pek çok araştırmacı tarafından modelleme aşamasında kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [133].

TY Y, uygulamalı kimya, fizik, biokimya, biyoloji, kimya mühendisliği ve kalite mühendisliği gibi çeşitli bilimsel ve teknik alanlarda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Geleneksel optimizasyon metodunun sınırlamaları, tüm faktörlerin deneysel akış düzeni üzerinde birlikte değiştiği deneylerin istatistiksel tasarımından oluşan TY Y’nin uygulanması ile aşılabilmektedir. TY Y, karmaşık etkileşimlerin varlığında bile çeşitli faktörlerin birbirine göre önemini değerlendirmek için kullanılan geliştirme, iyileştirme ve optimizasyon amaçları için matematiksel ve istatistiksel tekniklerin ortak kullanıldığı bir yöntemdir. Deneysel verilerden uygun tepki yüzeyi modelinin tanımlanması ve geliştirilmesi, regresyon modeli ve optimizasyon tekniklerinin kullanımı kadar modelleme öncesinde deneylerin tasarımı ve bazı istatistiksel tasarım esaslarının kullanımını gerektirir. Tepki Yüzeyi Yöntemi’nde de istatistiksel deney tasarımı, regresyon modeli teknikleri ve optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır.

TY Y, tek değişkenli istatistiksel t-testi tekniğinin kullanıldığı klasik deneysel veya optimizasyon metodları ile karşılaştırıldığında aşağıda belirtilen bazı üstünlüklere sahiptir. Bunlar;

- 1) TY Y, az sayıdaki deneyden önemli düzeyde bilgi verebilmektedir. Klasik yöntemler ise çok zaman almakta ve sistemin davranışını açıklamak için çok sayıda deney gerektirmektedir.
- 2) TY Y’de tepki üzerinde faktörlerin ikili olarak etkisini incelemek mümkündür. Faktörlerin ikili kombinasyonlarının etkileri denklem modeli ile kolaylıkla açıklanabilmektedir [134].

Bu yöntemde, tepkinin modellenmesi ve analiz problemlerinde etkili olan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin ortak kullanılması ile tepkinin yüzeyi elde edilmektedir. TYY, tepki üzerinde tekli ve kombinasyon halinde faktörlerin etkilerini de tanımlamaktadır. Bu yöntem, faktörlerin etkilerinin analiz edilmesinin yanında bir matematiksel modelde üretmektedir. Bu matematiksel model, optimizasyonda amaç fonksiyonu olarak tanımlanmakta ve optimum sonuçları elde etmek için çeşitli matematiksel veya sayısal yaklaşımlar kullanılarak optimize edilebilmektedir. Matematiksel modelin grafiksel gösterimi, TYY'ni ortaya koymaktadır. Tepki ve faktörler arasındaki genel bağıntı Denklem 6.1'de verilmektedir.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + e \quad (6.1)$$

Y : Tepki

f : Tepkinin bilinmeyen fonksiyonu

x_k : Faktörler (x_1, x_2, \dots, x_k)

k : Faktör sayısı

e : İstatistiksel hata

Tepki yüzey yönteminde modeller sadece polinom formu ile sınırlı olmasa bile basitliğinden dolayı genellikle bu form kullanılmaktadır. Kuadratik polinom durumu için tepki yüzeyi Denklem 6.2'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_{jj}^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (6.2)$$

Burada k, tasarım değişkenlerinin sayısını göstermektedir. İki değişken durumunda tepki yüzeyi Denklem 6.3'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2 \quad (6.3)$$

$X_3 = X_1^2$, $X_4 = X_2^2$, $X_5 = X_1 X_2$ ile yer değiştirilmesiyle Denklem 6.4'de görüldüğü gibi lineer regresyon modeline dönüşmektedir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 \quad (6.4)$$

Burada; β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 ve β_5 regresyon katsayılarını, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 bağımsız değişkenleri göstermektedir.

TYT kullanılarak bir optimizasyon çalışmasını üç aşamaya ayırmak mümkündür.

- 1) Bağımsız parametrelerin ve seviyelerinin belirlendiği ön çalışma aşaması.
- 2) Verilerin elde edilmesi, tahmini model denkleminin belirlenmesi ve kontrol edilmesi.
- 3) Bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonu olarak tepkinin, tepki yüzeyi eğrisi ve izdüşümünün elde edilmesi ve optimum noktaların belirlenmesidir.

Tasarım metodu seçilmesinden sonra model denklemini tanımlanmakta ve model denkleminin katsayıları regresyon metotları kullanılarak belirlenmektedir. Regresyon modelinin genel gösterimi Denklem 6.5’de ve matris gösterimi Denklem 6.6’da verilmektedir.

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (6.5)$$

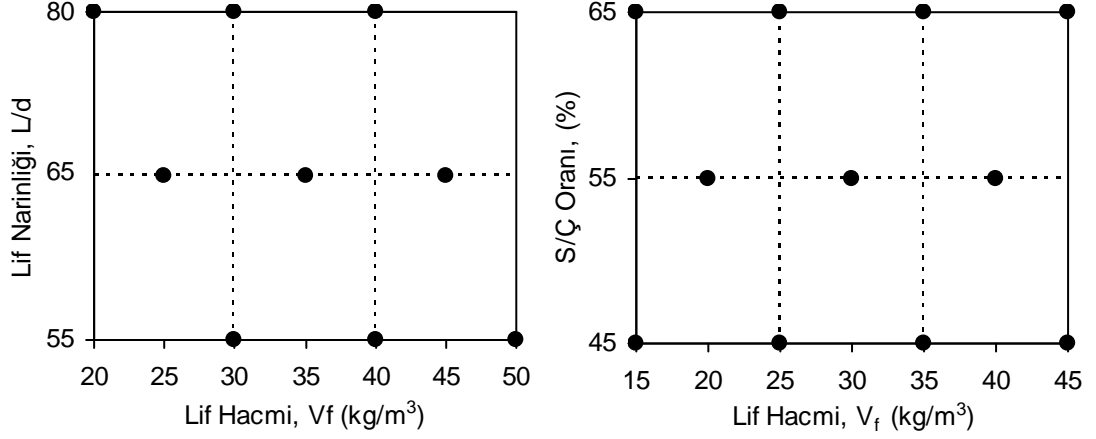
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Yukarıda verilen denklem sistemi çoklu regresyon tekniği olan en küçük kareler metodu kullanılarak çözülmektedir [133].

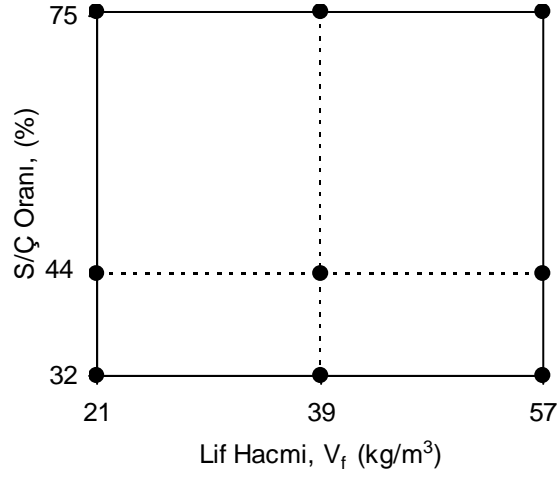
Tepki yüzeyi yöntemi ile deneysel veriler arasındaki etkileşimi en iyi temsil edecek modelin belirlenmesi için bağımsız değişkenlerin sayısına, deney sayısına (deney tasarım noktalarına) ve tasarım probleminin tipine göre bir çok tasarım bulunmaktadır. Bu tasarımların bazıları aşağıda verilmektedir.

- a) Merkezi Kompozit
- b) Box-Behnken
- c) Üç seviyeli Faktöriyel
- d) Karışım Tasarımı
- e) D-Optimal Tasarım
- f) Kullanıcı Tanımlı Tasarım

Bu çalışmada, üç seviyeli faktöriyel tasarıma göre belirlenen modeller esas alınarak her bir tepki için tepki yüzeyleri ve optimum karışım çözümleri belirlenmiştir. Her bir grup için kullanılan üç seviyeli-iki faktörlü deney noktaları ve seçilen faktörlerin alt ve üst sınır değerleri Şekil 6.1’de verilmektedir.



a) $L/d=80$ olan çelik lifli karışımlar (1.Grup) b) $S/Ç=0,55$ olan çelik lifli karışımlar (2.Grup)



c) Karma çelik lifli karışımlar (3.Grup)

Şekil 6.1 : Deney veri noktaları.

$L/d=80$ olan çelik lifli karışımlarda Şekil 6.1a'da gösterilen 12 adet, $S/Ç=0,55$ olan çelik lifli karışımlar için Şekil 6.1b'de gösterilen 9 adet ve karma çelik lifli karışımlar için Şekil 6.1c'de gösterilen 9 adet deney noktalarında belirlenen değerlere göre tepkilerin modellenmesi ve optimizasyonu yapılmıştır. Her bir tepki için tepki modelinin belirlenmesinde kullanılan deney veri noktalarındaki değerler ise her bir grup için Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'de verilmektedir.

Çizelge 6.1 : L/d=80 olan çelik lifli karışımlara ait deney noktaları (1.Grup).

Faktörler		Tepkiler			
S/Ç Oranı %	Lif Hacmi, V_f kg/m^3	Yarma Çekme Dayanımı, f_y MPa	Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, $f_{eş-I}$ (KSD) MPa	Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, $f_{eş-II}$ (TSD) MPa	Özgül Kırılma Enerjisi, G_f kN/m
45	15	5,22	2,39	2,00	2,14
45	25	5,44	3,48	3,67	4,69
45	35	5,87	3,86	4,16	5,71
45	45	6,29	4,18	5,26	6,50
55	20	4,47	2,49	2,51	2,93
55	30	4,51	3,22	3,70	4,32
55	40	4,70	3,54	4,21	5,02
65	15	4,28	2,08	1,53	1,02
65	25	4,39	2,38	2,75	3,37
65	35	4,53	2,94	3,53	3,88
65	45	4,64	3,38	4,60	4,91

Çizelge 6.2 : S/Ç=0,55 olan çelik lifli karışımlara ait deney noktaları (2.Grup).

Faktörler		Tepkiler			
Lif Narinliği L/d	Lif Hacmi, V_f kg/m^3	Yarma Çekme Dayanımı, f_y MPa	Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, $f_{eş-I}$ (KSD) MPa	Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, $f_{eş-II}$ (TSD) MPa	Özgül Kırılma Enerjisi, G_f kN/m
80	20	4,47	2,49	2,68	2,94
80	30	4,51	3,22	3,70	4,32
80	40	4,77	3,54	4,21	5,02
65	25	4,32	2,75	2,42	2,69
65	35	4,44	3,11	2,82	3,34
65	45	4,48	3,60	3,53	4,39
55	30	4,41	2,76	2,51	2,53
55	40	4,51	3,03	2,78	2,99
55	50	4,56	3,32	3,02	3,20

Çizelge 6.3 : Karma çelik lifli karışımlara ait deney noktaları (3.Grup).

Faktörler		Tepkiler			
S/Ç Oranı (%)	Lif Hacmi, V_f kg/m^3	Yarma Çekme Dayanımı, f_y MPa	Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, $f_{e\text{-I}}$ (KSD) MPa	Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, $f_{e\text{-II}}$ (TSD) MPa	Özgül Kırılma Enerjisi, G_f kN/m
32	21	6,85	3,04	4,37	4,45
32	39	8,04	3,62	5,26	6,60
32	57	8,91	4,39	6,13	7,37
44	21	5,76	2,37	2,90	3,94
44	39	6,41	3,37	5,08	5,85
44	57	7,38	3,96	6,35	8,14
75	21	3,92	2,19	2,23	2,85
75	39	4,06	3,19	4,35	5,41
75	57	4,31	3,69	5,49	7,10

6.3 Çok Amaçlı Optimizasyon

Çeşitli parametrelerin aynı anda değerlendirilmesini sağlayan sayısal yöntemler kullanılarak yapılan optimizasyon, çok amaçlı optimizasyon olarak tanımlanmaktadır. Birden fazla tepkinin optimizasyonu, genel olarak mühendislik alanında arzu edirlilik fonksiyonunun kullanılmasıyla yapılabilmektedir. Bu fonksiyon, sayısal optimizasyon metotlarında bazı uygulamalarda kullanılmaktadır.

Çok amaçlı problemlerin çözümünde, her bir tepki için kontur çizgisi, sınırlandırılmış optimizasyon problemleri ve arzu edirlilik yöntemi gibi pek çok istatistiksel teknik kullanılmaktadır. Arzu edirlilik yöntemi, bilgisayar yazılımının elde edilebilirliği, kolaylığı ve her bir tepki için verilen önem ve etki ağırlığının değiştirilebilir olması nedeniyle tavsiye edilmektedir [132].

6.3.1 Arzu edirlilik (desirability) yöntemi

Myers ve Montgomery tarafından arzu edirlilik olarak isimlendirilen çoklu tepki yöntemi tanımlanmıştır [135]. Arzu edirlilik yöntemi, tahmin edilen her bir tepkinin (Y_i), $0 < d_i < 1$ arasında sınırlandırılmış birimsiz bir değer olan arzu edirlilik değerine dönüştürülmesini içermektedir. Daha yüksek d_i değeri, daha uygun tepki (Y_i) değerinin olduğunu göstermektedir. Arzu edirlilik değerinin sıfır olması ($d_i=0$) ise istenilmeyen bir tepki değeri anlamına gelmektedir. Her bir tepkinin ayrı ayrı arzu edirlilik (d_i) değeri, Denklem 6.6, Denklem 6.7 ve Denklem 6.8'deki amaç fonksiyonları kullanılarak hesaplanmaktadır. Amaç fonksiyonunun tipi, etki ağırlık düzeyine göre her bir hedef için değişebilmektedir. Etki ağırlık düzeyi, alt ve üst

sınırlara daha fazla etki vermek için veya hedef değerine yakın tutabilmek için kullanılmaktadır. Etki ağırlık düzeyleri, 0.1-10 arasında değişmektedir. Daha fazla önem için etki ağırlığı 1'den daha büyük, daha az önem için 1'den daha küçük değer verilmektedir. Etki ağırlığı 1'e eşit olduğunda d_i , lineer bir biçimde 0'dan 1'e doğru değişmektedir. Toplam arzu edilirlilik amaç fonksiyonunda (D), her bir tepki için farklı önem (r) verilebilmektedir. Önem değişimleri, '+' ile gösterilen en küçük önem değeri olan 1'den '+++++' ile gösterilen en büyük önem değeri olan 5'e kadar değişmektedir.

Maksimum hedef için arzu edilirlilik fonksiyonu:

$$d_i = \begin{cases} 0 & Y_i \leq \min f_i \\ \left(\frac{Y_i - \min f_i}{\text{maks } f_i - \min f_i} \right)^{wt_i} & \min f_i < Y_i < \text{maks } f_i \\ 1 & Y_i \geq \text{maks } f_i \end{cases} \quad (6.6)$$

Minimum hedef için arzu edilirlilik fonksiyonu:

$$d_i = \begin{cases} 1 & Y_i \leq \min f_i \\ \left(\frac{\text{maks } f_i - Y_i}{\text{maks } f_i - \min f_i} \right)^{wt_i} & \min f_i < Y_i < \text{maks } f_i \\ 0 & Y_i \geq \text{maks } f_i \end{cases} \quad (6.7)$$

Bir hedef amacı için arzu edilirlilik fonksiyonu:

$$d_i = \begin{cases} \left(\frac{Y_i - \min f_i}{T_i - \min f_i} \right)^{wt_{1i}} & \min f_i < Y_i < T_i \\ \left(\frac{Y_i - \text{maks } f_i}{T_i - \text{maks } f_i} \right)^{wt_{2i}} & T_i < Y_i < \text{maks } f_i \\ 0 & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (6.8)$$

Burada d_i , Y_i , $\min f_i$, T_i ve wt_i sırasıyla i.'ninci tepkinin; arzu edilirlilik fonksiyonu, TYY ile bulunan değeri, deneysel olarak elde edilen en küçük ve en büyük değerleri, hedef değeri ve etki ağırlık düzeyini göstermektedir. Farklı tepkilere değişik önem

dereceleri belirtilmesi halinde toplam amaç fonksiyonu Denklem 6.9'da gösterilmektedir [133].

$$D = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{r_i} \right)^{1/\sum r_i} \quad (6.9)$$

n : Tepki sayısı

d_i : Her bir tepkinin arzu edilirlilik değeri

r_i : Her bir tepkinin önem seviyesi

Bu yöntemde her bir tepki için belirlenen amaç fonksiyonuna göre elde edilen arzu edilirlilik değerleri, çoklu tepkilerin toplam arzu edilirlilik değeri (D) olarak tanımlanan bir boyutsuz performans değerine dönüştürülmektedir. Toplam arzu edilirlilik değeri, tepkilere ait ayrı ayrı arzu edilirlilik değerinin ağırlıklı geometrik ortalaması ile hesaplanmaktadır. Tepkiler veya faktörlerin herhangi biri arzu edilirlilik aralığının dışına çıkarsa toplam fonksiyon sıfır olmaktadır. Toplam arzu edilirlilik değeri Denklem 6.10'a göre belirlenmektedir [135].

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6.10)$$

D : Çok amaçlı arzu edilirlilik değeri

d_i : Her bir tepkinin arzu edilirlilik değeri

n : Tepki sayısı

6.4 Regresyon Analizi ve Sonuçları

Bu çalışmada, ÇLDB'nin her bir grup deneysel çalışma programında farklı bağımsız değişkenlere (S/Ç oranı, lif narinliği ve hacmi) bağlı olarak elde edilen bağımlı değişkenleri (yarma çekme dayanımı, KSD ve TSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımları ve özgül kırılma enerjisi) veren lineer ve polinom türü matematiksel modeller Design-Expert 6.0.7 programı kullanılarak belirlenmiştir. Her bir tepkiyi temsil eden en iyi modelin belirlenmesi için program tarafından farklı modeller analiz edilmektedir. Bu modeller:

- Linear Model: Faktörlerin tekli olarak kullanıldığı model (A, B, C gibi).
- 2FI (İkili faktörlü etkileşim) Modeli: Faktörlerin tekli ve ikili olarak kullanıldığı model (AB, AB, AC gibi).

- c) Kuadratik Model: Faktörlerin tekli, ikili olarak ve tekli terimlerin karelerinin de kullanıldığı model (AB, AC, BC, A², B², C² gibi).
- d) Kübik Model: Faktörlerin tekli, ikili, üçlü olarak kullanıldığı model (ABC, A²B, A²C, AB², A³, B³, C³ gibi).

En iyi model türü program tarafından belirlendikten sonra bu modeldeki terimlerin anlamlılığı varyans analizi (ANOVA) ile kontrol edilerek ($\alpha=0,05$) anlamlılık düzeyinin dışında kalan terimler modelden çıkarılmaktadır. Eşdeğer eğilme çekme dayanımları tepkileri için program tarafından önerilen en iyi regresyon modelleri Çizelge 6.4’de ve modellere ait korelasyon katsayıları Çizelge 6.5’de verilmektedir.

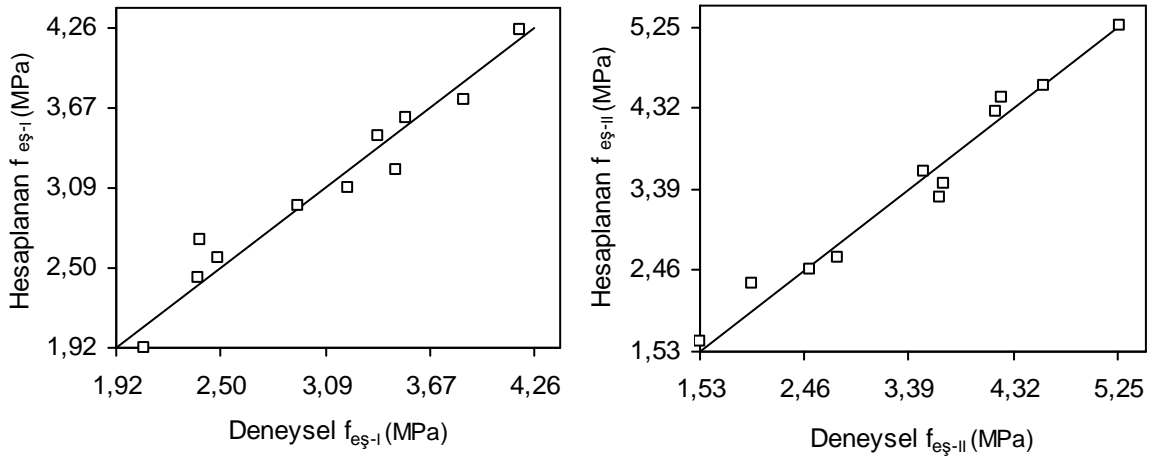
Çizelge 6.4 : Regresyon Modelleri.

Model Türü	Modeller
1) L/d=80 olan çelik lifli karışımlar (1.Grup)	
Kuadratik	$f_y = 21,12 + 0,09 V_f - 0,60 S / \zeta + 0,005 (S / \zeta)^2 - 0,001 (V_f)(S / \zeta)$
Lineer	$f_{e\zeta-I} = 3,69 + 0,05 V_f - 0,04 S / \zeta$
Lineer	$f_{e\zeta-II} = 2,33 + 0,1 V_f - 0,03 S / \zeta$
Kuadratik	$G_f = 4,39 + 0,40 V_f - 0,22 S / \zeta - 0,004 V_f^2 + 0,001 (S / \zeta)^2$
2) S/Ç=0,55 olan farklı narinlikte çelik liflerin kullanıldığı karışımlar (2.Gup)	
Lineer	$f_y = 3,57 + 0,01 V_f + 8,36 L / d$
2FI	$f_{e\zeta-I} = 3,05 - 0,032 V_f - 0,020 L / d + 0,0010 (V_f)(L / d)$
2FI	$f_{e\zeta-II} = 1,49 - 0,054 V_f - 0,0032 L / d + 0,0016 (V_f)(L / d)$
2FI	$G_f = 2,13 - 0,10 V_f - 0,017 L / d + 0,0027 (V_f)(L / d)$
3) Karma çelik lifli karışımlar (3.Grup)	
Kuadratik	$f_y = 9,42 + 0,092 V_f - 0,14 S / \zeta + 0,00093 (S / \zeta)^2 - 0,0010 (V_f)(S / \zeta)$
Kuadratik	$f_{e\zeta-I} = 4,28 + 0,041 V_f - 0,091 S / \zeta + 0,00071 (S / \zeta)^2$
Lineer	$f_{e\zeta-II} = 3,15 + 0,078 V_f - 0,029 S / \zeta$
Lineer	$G_f = 2,84 + 0,10 V_f - 0,024 S / \zeta$

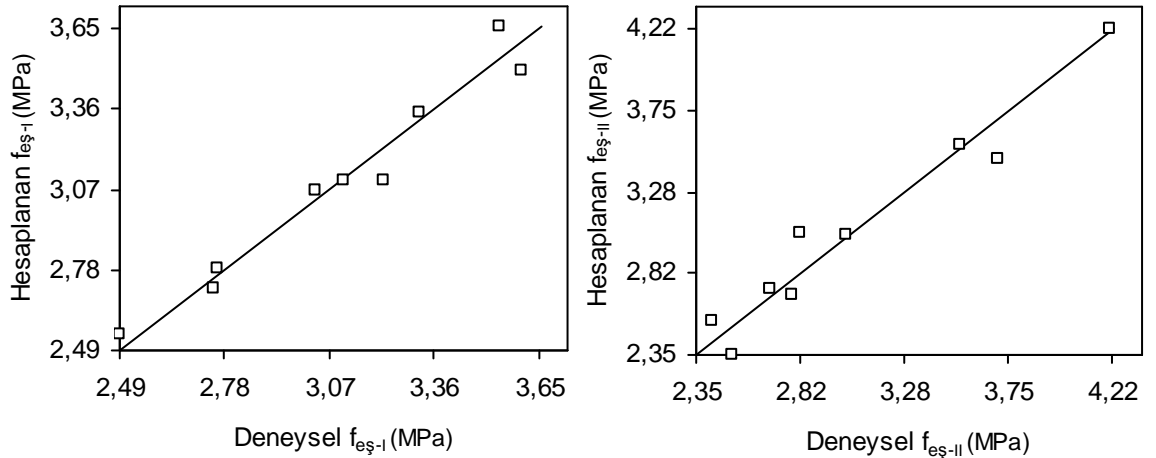
Çizelge 6.5 : Modellere ait çoklu korelasyon katsayıları.

Grup No	Korelasyon Katsayıları, R			
	Yarma Çekme Dayanımı, f_y	KSD için Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, $f_{eş-I}$	TSD için Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı, $f_{eş-II}$	Özgül Kırılma Enerjisi, G_f
1	0,992	0,966	0,981	0,980
2	0,827	0,967	0,956	0,975
3	0,998	0,963	0,947	0,970

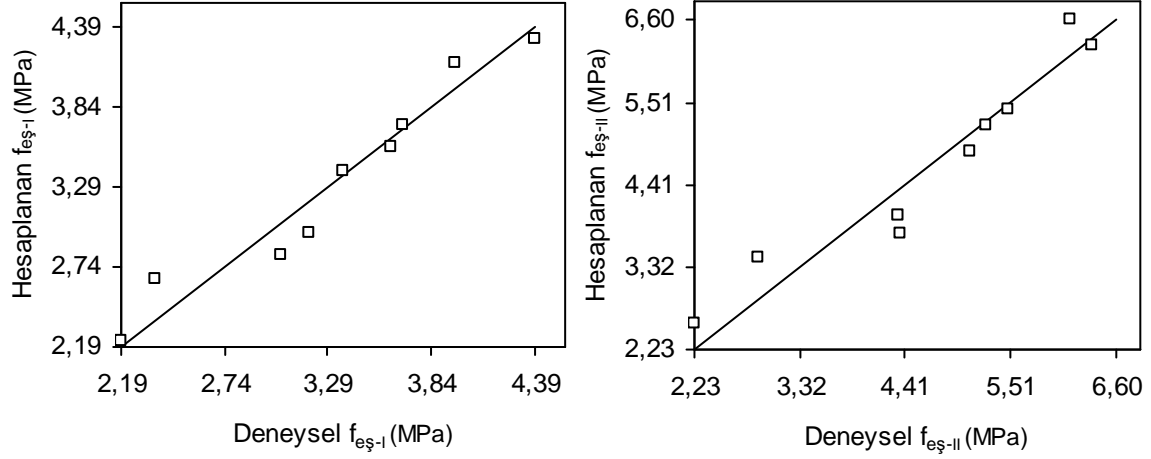
ÇLDB'lerin eşdeğer eğilme çekme dayanımlarını tahmin eden en uygun regresyon modelleri kullanılarak hesaplanan değerler ile deneysel olarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması her bir grup için Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4'de verilmektedir.



Şekil 6.2 : L/d=80 olan çelik lifli karışımlar için deneysel ve modelle bulunan sonuçlar.

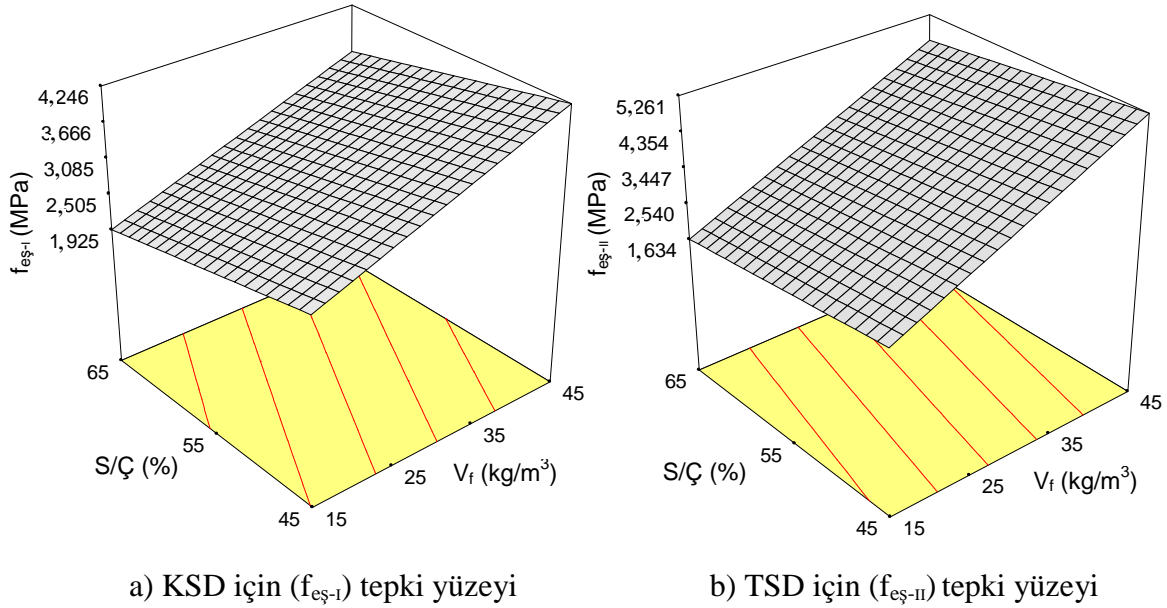


Şekil 6.3 : S/Ç=0,55 olan farklı narinlikte çelik liflerin kullanıldığı karışımlar için deneysel ve modelle bulunan sonuçlar.

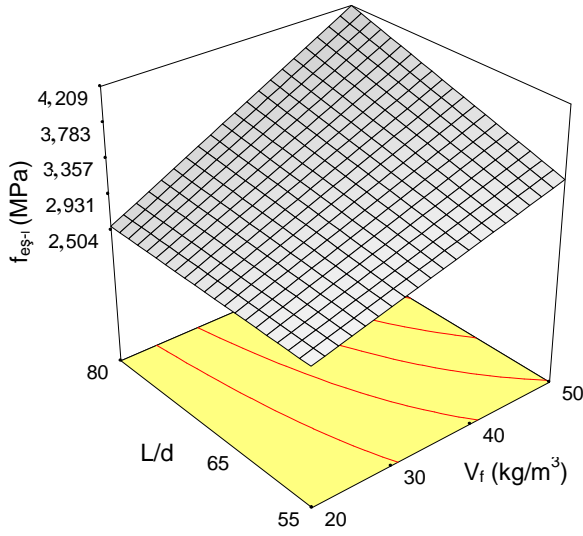


Şekil 6.4 : Karma çelik lifli karışımlar için deneysel ve modelle bulunan sonuçlar.

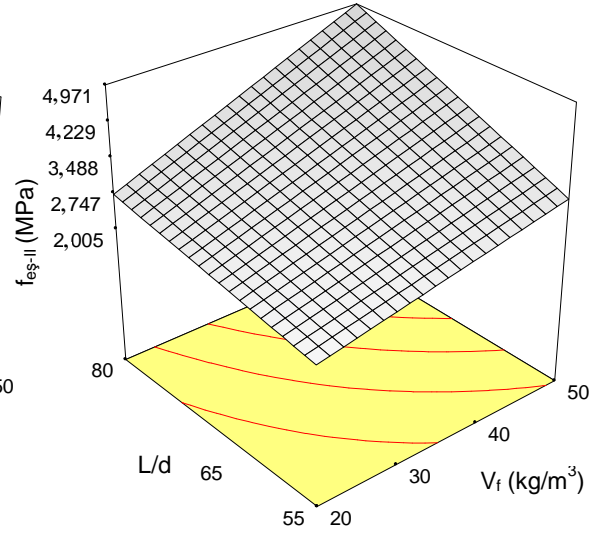
Farklı S/Ç oranı, lif narinliği ve hacim oranına bağlı olarak kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumları için eşdeğer eğilme çekme dayanımlarını temsil eden tepki yüzeyleri ise Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de verilmektedir.



Şekil 6.5 : L/d=80 çelik lifli karışımların eşdeğer eğilme çekme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri.

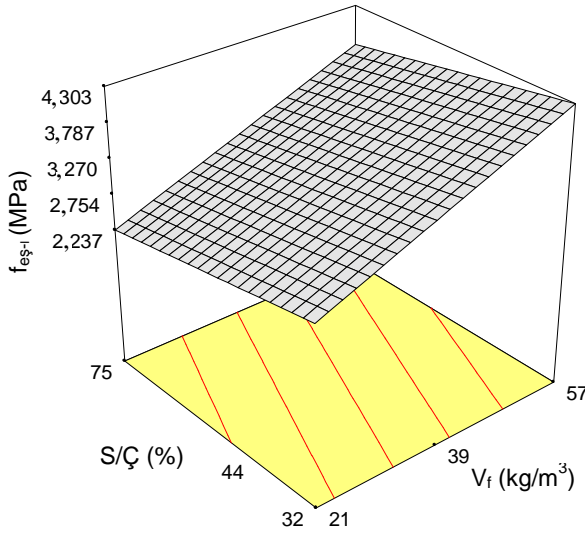


a) KSD için ($f_{e\check{s}-I}$) tepki yüzeyi

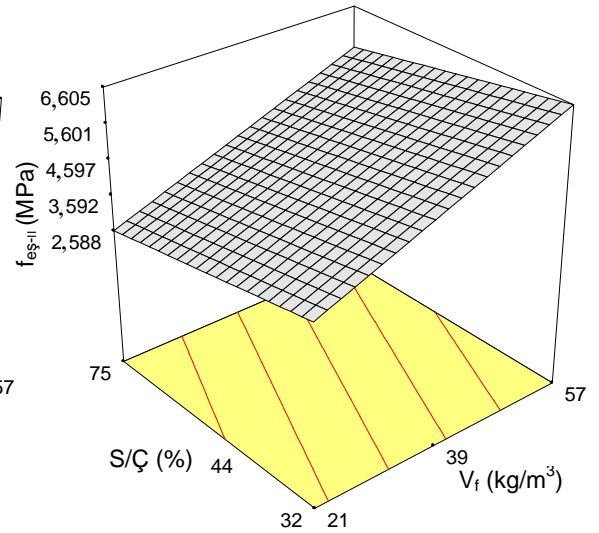


b) TSD için ($f_{e\check{s}-II}$) tepki yüzeyi

Şekil 6.6 : $S/\check{C}=0,55$ olan farklı narinlikte çelik lifli karışımların eşdeğer eğilme çekme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri.



a) KSD için ($f_{e\check{s}-I}$) tepki yüzeyi



b) TSD için ($f_{e\check{s}-II}$) tepki yüzeyi

Şekil 6.7 : Karma çelik lifli karışımların eşdeğer eğilme çekme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri.

6.5 ÇLDB'lerin Optimum Karışım Tasarımı ve Sonuçları

Genel olarak karışım optimizasyonları, elde edilen tepkilerin veya faktörlerin istenilen optimizasyon koşullarına göre (maksimum, minimum veya hedef değerlere göre) en uygun çözümlerin bulunmasını amaçlamaktadır. Birden fazla faktör ve tepkinin gözönüne alınması durumunda çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon, deneysel olarak belirlenen her bir tepki

için hesaplanan arzu edilirlık fonksiyonunu (d_i) kullanan sayısal optimizasyon teknikleri ile uygulanmaktadır. Çelik lifler, artan lif miktarıyla birlikte betona kazandırdığı yüksek süneklik özelliği ve mekanik özelliklerinin yanında betonun karışım maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle yüksek performans özelliklerine sahip daha ekonomik karışım çözümlerini belirlemek amacıyla yapılan çoklu optimizasyonlarda karışım maliyeti tepki olarak optimizasyona katılmıştır. Karışımlarda kullanılan çimento miktarı, lif narinliği ve hacim oranına bağlı olarak belirlenen karışım maliyetleri Çizelge 6.6'da verilmektedir.

Bu çalışmada, daha yüksek süneklığe ve mekanik özelliklere sahip olmakla birlikte daha ekonomik ÇLDB karışımlar elde edebilmek için karışım maliyetini en düşük yapan çelik lif hacmi ve narinliğinin en küçük olduğu optimum çözümler araştırılmıştır.

Çizelge 6.6 : Çelik lif donatılı karışımlara ait maliyetler.

Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi kg/m^3	Çimento Miktarı kg/m^3	^a Karışım Maliyeti TL/ m^3	Birim Karışım Maliyeti
1	0,45	ND 80/60	0	400	48	-
			15		102,81	1,16
			25		139,35	1,58
			35		175,89	1,99
			45		212,43	2,40
	0,65		0	280	34	-
			15		88,41	1,00
			25		124,95	1,41
			35		161,49	1,83
			45		198,03	2,24
2	0,55	ND 80/60	0	350	42	-
			20		115,08	1,30
			30		151,62	1,71
			40		188,16	2,13
		ND 65/60	25		121,65	1,38
			35		153,51	1,74
			45		185,37	2,10
		ND 55/30	30		157,56	1,78
			40		196,08	2,22
			50		234,6	2,65

^a 2008 fiyatlarına göre belirlenmiştir

Çizelge 6.6 (Devamı) : Çelik lif donatılı karışımlara ait maliyetler.

Grup No	S/Ç Oranı	Lif Tipi	Lif Hacmi kg/m ³	Çimento Miktarı kg/m ³	^a Karışım Maliyeti TL/m ³	Birim Karışım Maliyeti
3	0,32	YD 80/60	0	570	68	-
			21		169,20	1,91
			39		255,60	2,89
			57		342,00	3,87
	0,44		0	450	54	-
			21		154,80	1,75
			39		241,20	2,73
			57		327,60	3,71
	0,75		0	270	32	-
			21		133,20	1,51
			39		219,60	2,48
			57		306,00	3,46

^a 2008 fiyatlarına göre belirlenmiştir

Çelik lifli betonların mekanik ve performans parametreleri olan yarma çekme dayanımı, özgül kırılma enerjisi ve eşdeğer eğilme çekme dayanımlarını temsil eden en iyi modellere çok amaçlı optimizasyon teknikleri uygulanarak her bir grup için optimum karışım tasarımları belirlenmiştir. Optimum karışım tasarımı, maksimum süneklik (özgül kırılma enerjisi, eşdeğer eğilme çekme dayanımları), maksimum yarma çekme dayanımı ve en düşük karışım maliyeti koşulunu sağlayan minimum lif hacmi ve lif narinliğinin elde edilmesini içermektedir. Optimizasyonda, kullanılan her bir tepkiye ait ağırlık etkisi eşit olarak alınmıştır. Her bir grup için faktörler ve tepkilere ait deneysel alt ve üst sınır değerleri Çizelge 6.7’de verilmektedir. Çok amaçlı optimizasyon Çizelge 6.7’de faktörler ve tepkiler için verilen sınır koşullarında yapılarak optimum karışım çözümleri belirlenmiştir.

Her bir grupta optimizasyona katılan tepkiler aynı olmakla birlikte, faktörler uygulanan deneysel programa göre farklıdır. Her grup için çoklu optimizasyona eş zamanlı olarak katılan toplam faktör ve tepki sayısına göre toplam arzu edilirlilik fonksiyonu Denklem 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.7 : Faktörler ve tepkilere ait alt ve üst sınır değerleri.

Grup No	Değişkenler	Faktörler ve Tepkiler	Alt Sınır	Üst Sınır
1	Faktörler	S/Ç Oranı, %	45	65
		Lif Hacmi (V_f), kg/m^3	15	45
	Tepkiler	Karışım Maliyeti, birim	1,00	2,40
		Yarma Çekme Dayanımı, (f_y), MPa	4,28	6,29
		Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı KSD ($f_{eş-I}$), MPa	2,08	4,18
		Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı TSD ($f_{eş-II}$), MPa	1,53	5,26
		Özgül Kırılma Enerjisi (G_f), kN/m	1,02	6,50
2	Faktörler	Lif Narinliği (L/d)	55	80
		Lif Hacmi (V_f), kg/m^3	20	50
	Tepkiler	Karışım Maliyeti, birim	1,30	2,65
		Yarma Çekme Dayanımı, (f_y), MPa	4,32	4,77
		Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı KSD ($f_{eş-I}$), MPa	2,49	3,60
		Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı TSD ($f_{eş-II}$), MPa	2,42	4,21
		Özgül Kırılma Enerjisi (G_f), kN/m	2,53	5,02
3	Faktörler	S/Ç Oranı (%)	32	75
		Lif Hacmi (V_f), kg/m^3	21	57
	Tepkiler	Karışım Maliyeti, birim	1,51	3,87
		Yarma Çekme Dayanımı, (f_y), MPa	3,92	8,91
		Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı KSD ($f_{eş-I}$), MPa	2,19	4,39
		Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı TSD ($f_{eş-II}$), MPa	2,23	6,35
		Özgül Kırılma Enerjisi (G_f), kN/m	2,85	8,14

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4 \times d_5 \times d_6)^{1/6} \quad (6.11)$$

Burada;

d_1 Yarma çekme dayanımı tepkisine ait arzu edilirlilik değeri

d_2 : KSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımı ($f_{eş-I}$) tepkisine ait arzu edilirlilik değeri

d_3 : TSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımı ($f_{eş-II}$) tepkisine ait arzu edilirlilik değeri

d_4 : Özgül kırılma enerjisi tepkisine ait arzu edilirlilik değeri

d_5, d_6 : Her bir grupta belirlenen iki faktöre (1. ve 3. grup için S/Ç oranı ve lif hacmi, 2. grup için lif narinliği ve lif hacmi) ait arzu edilirlilik değerleri.

Her bir gruptaki karışımlar için yapılan optimizasyonda, belirlenen amaç koşullarında optimum çözümlerle birlikte her bir S/Ç oranı ve lif narinliği için çözümler elde edilmiştir. Tahmin edilen optimum çözümler %95 güven aralığında belirlenmiştir.

Her bir faktör ve tepki için seçilen optimizasyon amaç koşulları ve belirlenen optimum karışım çözümleri, L/d=80 olan farklı S/Ç oranındaki karışımlar için Çizelge 6.8’de, S/Ç=0,55 olan farklı narinlikte liflerin kullanıldığı karışımlar için Çizelge 6.9’da ve karma lifli karışımlar için Çizelge 6.10’da verilmektedir.

Çizelge 6.8 : L/d=80 olan çelik lifli karışımlara ait optimum karışım çözümleri (1. Grup)

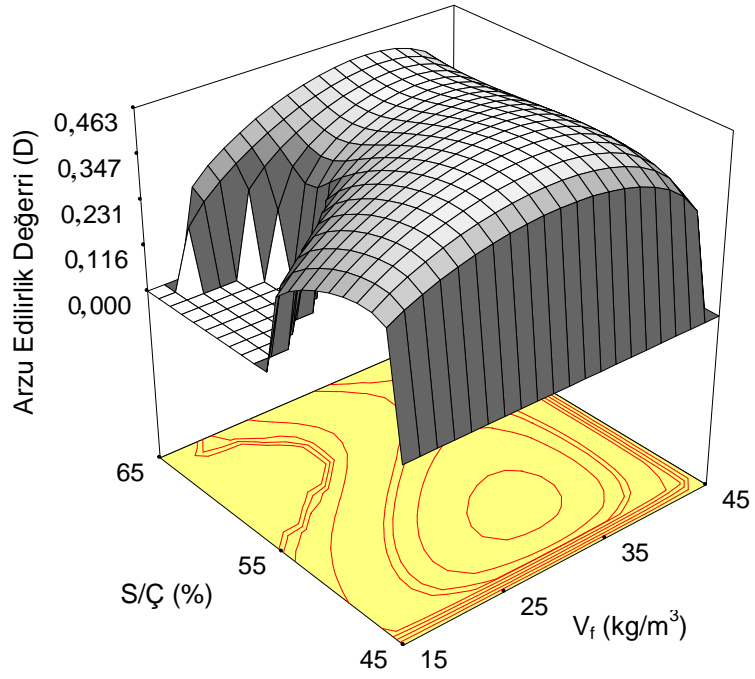
Faktörler ve Tepkiler		Amaç	Optimum	S/Ç Oranına Göre Optimum Çözümler		
Faktörler	Su/Çimento Oranı (S/Ç), %	Maksimum	49,84	45	55	65
	Lif Hacmi (V_f), kg/m^3	Minimum	31,98	30,25	34,39	35,88
Tepkiler	Karışım Maliyeti, birim	Minimum	1,83	1,79	1,89	1,86
	Eşdeğer Eğilme Çekme Gerilmesi ($f_{e\text{-I}}$), N/mm^2	Maksimum	3,38	3,48	3,31	2,99
	Eşdeğer Eğilme Çekme Gerilmesi ($f_{e\text{-II}}$), N/mm^2	Maksimum	3,81	3,80	3,87	3,69
	Yarma Çekme Dayanımı (f_v), N/mm^2	Maksimum	5,05	5,67	4,64	4,49
	Özgül Kırılma Enerjisi (G_f), kN/m	Maksimum	5,00	5,27	4,82	4,32
	Çok Amaçlı Arzu Edilirlik Değeri (D)	-	0,463	0,601	0,425	0,351

Eşdeğer eğilme çekme dayanımları, özgül kırılma enerjisi, yarma çekme dayanımını ve daha iyi işlenebilirlik için S/Ç oranının en büyük, lif hacim oranı ve karışım maliyetinin en küçük olduğu koşullarda farklı S/Ç oranındaki L/d=80 olan çelik lifli karışımlar için yapılan çoklu optimizasyon sonucunda, Çizelge 6.8’de görüldüğü gibi optimum çözüm, S/Ç=0,49, $V_f = 31,9 \text{ kg/m}^3$ ve optimum maliyet 1,83br olarak elde edilmiştir. Bu optimum çözüme karşılık gelen eşdeğer eğilme çekme dayanımları, özgül kırılma enerjisi ve yarma çekme dayanımı değerleri sırasıyla; 3,38 MPa ($f_{e\text{-I}}$), 3,81 MPa ($f_{e\text{-II}}$), 5,00 kN/m ve 5,05 MPa’dır. Ayrıca S/Ç oranı 0,45, 0,55 ve 0,65 olan karışımlar için optimum çelik lif hacim oranları sırasıyla; 30,2 kg/m^3 , 34,3

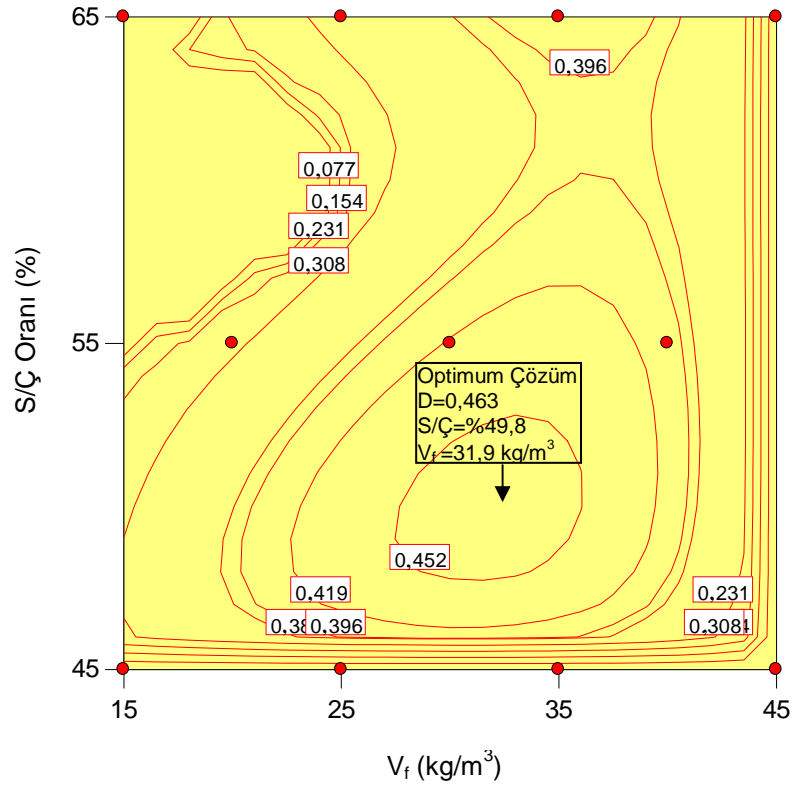
kg/m^3 ve $35,9 \text{ kg/m}^3$ 'dür. Bu optimum oranlara karşılık gelen karışım maliyeti, özgül kırılma enerjisi ve yarma çekme dayanımı değerleri sırasıyla; $S/C=0,45$ için 1,79 br, 5,27 kN/m ve 5,67 MPa, $S/C=0,55$ için 1,89 br, 4,82 kN/m ve 4,64 MPa, $S/C=0,65$ için 1,86 br, 4,32 kN/mm ve 4,49 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, aynı amaç koşullarında karışımında S/C oranı arttıkça daha sünek bir beton elde edebilmek için daha fazla miktarlarda çelik lif kullanılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır.

$L/d=80$ olan çelik lifli karışımlar için Denklem 6.11 göre hesaplanan kompozit arzu edilirlilik değerinin (D) faktörlere göre değişimini gösteren tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü grafikleri Şekil 6.8a ve Şekil 6.8b'de verilmektedir. Optimum karışım çözümü, tepki yüzeyi grafiklerinde en yüksek olduğu nokta ile tanımlanmakta olup $L/d=80$ olan karışımlar için Şekil 6.8b'de gösterilmiştir. Elde edilen tepki yüzeyi grafiklerinde arzu edilirlilik değerlerinin (D) sıfır olduğu bölgeler, her bir tepki ve faktör için belirlenen amaç koşullarında çözümün olmadığı faktör değerlerini tanımlayan bölgelerdir.

Aynı S/C oranında ($S/C=0,55$) farklı narinlikte çelik liflerin kullanıldığı karışımlarda eşdeğer eğilme çekme dayanımları, özgül kırılma enerjisi ve yarma çekme dayanımını en büyük, karışım maliyeti, lif narinliği ve hacim oranının en küçük olduğu koşullarda yapılan çoklu optimizasyon sonucunda, Çizelge 6.9'da görüldüğü gibi optimum çözüm; $L/d=72,2$, $V_f=40,9 \text{ kg/m}^3$ ve karışım maliyeti 1,97 olarak elde edilmiştir. Bu optimum orandaki KSD ve TSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımları, özgül kırılma enerjisi ve yarma çekme dayanımı değerleri sırasıyla; 3,51 MPa ($f_{eş-1}$), 3,80 MPa ($f_{eş-II}$), 4,56 kN/m ve 4,60 MPa'dır. Ayrıca L/d oranı 55, 65 ve 80 olan liflerin kullanıldığı karışımlar için optimum çelik lif hacim oranları sırasıyla; $43,1 \text{ kg/m}^3$, $41,9 \text{ kg/m}^3$ ve $38,4 \text{ kg/m}^3$ 'dür. Bu optimum oranlara karşılık gelen karışım maliyeti, özgül kırılma enerjisi ve yarma çekme dayanımı değerleri sırasıyla; $L/d=55$ için 2,34 br, 3,04 kN/mm ve 4,48 MPa, $L/d=65$ için 2,01 br, 3,95 kN/mm ve 4,55 MPa ve $L/d=80$ için 2,04 br, 5,02 kN/mm ve 4,64 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, aynı amaç koşullarında daha sünek bir beton elde edebilmek için karışımında kullanılan çelik lif narinliği azaldıkça daha fazla hacim oranında lif kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır.



a) Tepki yüzeyi



b) Tepki yüzeyi izdüşümü

Şekil 6.8 : L/d=80 olan çelik lifli karışımlar için çok amaçlı optimizasyona ait tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü.

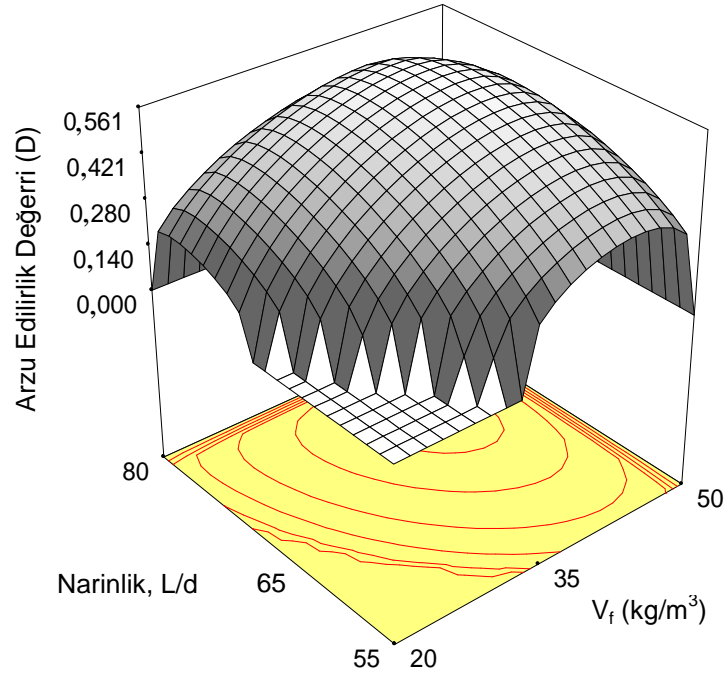
Çizelge 6.9 : $S/\zeta=0,55$ olan çelik lifli karışımlara ait optimum karışım çözümleri (2. grup)

Faktörler ve Tepkiler		Amaç	Optimum	Lif Narinliğine Göre Optimum Çözümler		
Faktörler	Lif Narinliği (L/d)	Minimum	72,24	55	65	80
	Lif Hacmi (V_f), kg/m^3	Minimum	40,92	43,15	41,92	38,44
Tepkiler	Karışım Maliyeti, birim	Minimum	1,97	2,34	2,01	2,04
	Eşdeğer Eğilme Çekme Gerilmesi ($f_{e\zeta-I}$), N/mm^2	Maksimum	3,51	3,15	3,37	3,56
	Eşdeğer Eğilme Çekme Gerilmesi ($f_{e\zeta-II}$), N/mm^2	Maksimum	3,80	2,80	3,40	4,10
	Yarma Çekme Dayanımı (f_y), N/mm^2	Maksimum	4,60	4,48	4,55	4,64
	Özgül Kırılma Enerjisi (G_f), kN/m	Maksimum	4,56	3,04	3,95	5,02
	Çok Amaçlı Arzu Edilirlik Değeri (D)	-	0,561	0,282	0,505	0,696

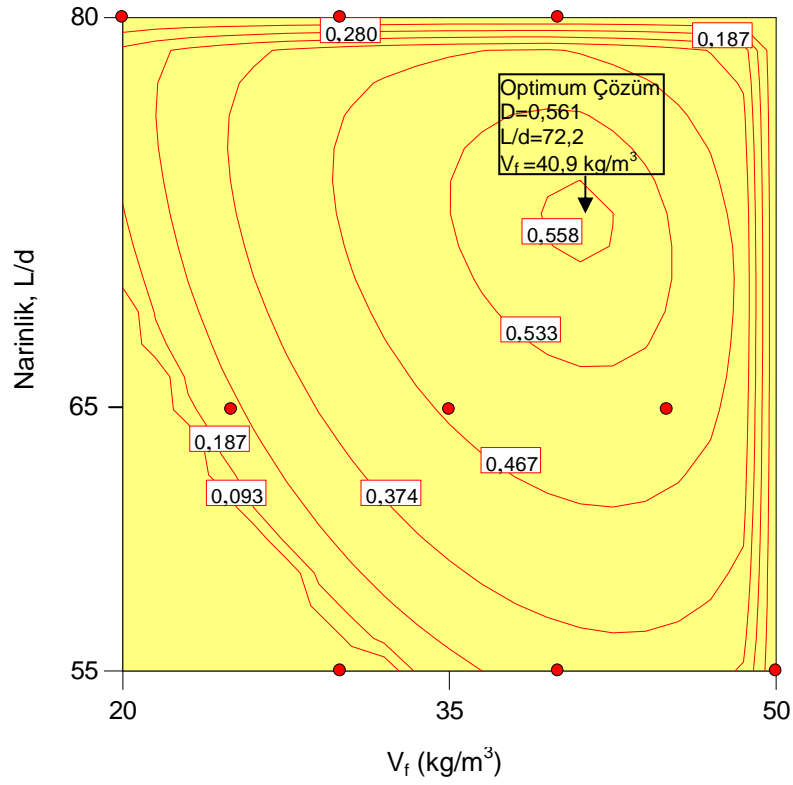
$S/\zeta=0,55$ olan farklı narinlikte çelik liflerin kullanıldığı karışımlar için belirlenen koşullarda yapılan optimizasyon sonucunda belirlenen tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü grafikleri Şekil 6.9a ve Şekil 6.9b’de verilmektedir.

Çalışmanın bir diğer bölümünde, karma çelik lifli karışımlarda lif hacminin en düşük, sünekliğin en yüksek olduğu optimum karışım çözümleri araştırılmıştır. Eşdeğer eğilme çekme dayanımları, özgül kırılma enerjisi, yarma çekme dayanımını ve daha iyi işlenebilirlik için S/ζ oranının en büyük, lif hacim oranı ve karışım maliyetinin en küçük olduğu koşullarda farklı S/ζ oranındaki $L/d=80$ olan karma çelik lifli karışımlar için yapılan çoklu optimizasyon sonucunda, Çizelge 6.10’da görüldüğü gibi optimum çözüm, $S/\zeta=0,46$, $V_f=41,2 \text{ kg/m}^3$ ve optimum maliyet 2,73br olarak elde edilmiştir. Bu optimum çözüme karşılık gelen KSD ve TSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımları, özgül kırılma enerjisi ve yarma çekme dayanımı değerleri sırasıyla; 3,45 MPa ($f_{e\zeta-I}$), 4,96 MPa ($f_{e\zeta-II}$), 6,06 kN/m ve 6,33 MPa’dır. Ayrıca S/ζ oranı 0,32, 0,44 ve 0,75 olan karışımlar için optimum çelik lif hacim oranları sırasıyla; 39,2 kg/m^3 , 40,9 kg/m^3 ve 46,5 kg/m^3 ’dür. Bu optimum oranlara karşılık gelen karışım maliyeti, özgül kırılma enerjisi ve yarma çekme dayanımı değerleri sırasıyla; $S/\zeta=0,32$ için 2,67 br, 6,21 kN/m ve 7,93 MPa, $S/\zeta=0,44$ için

2,72 br, 6,09 kN/m ve 6,58 MPa, $S/\zeta=0,75$ için 2,91 br, 5,92 kN/mm ve 4,16 MPa olarak belirlenmiştir.



a) Tepki yüzeyi



b) Tepki yüzeyi izdüşümü

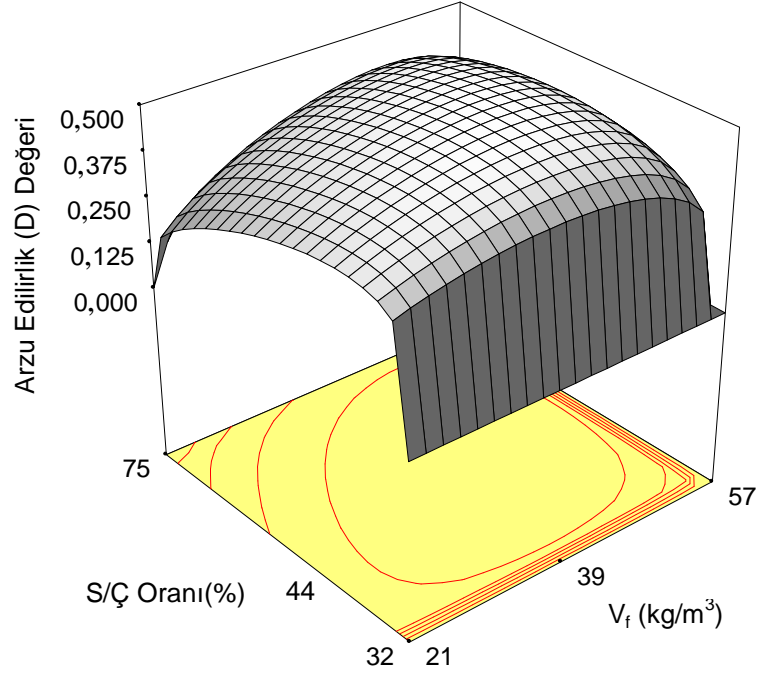
Şekil 6.9 : $S/\zeta=0,55$ olan farklı narinlikteki çelik lifli karışımlar için tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü.

Çizelge 6.10 : Karma çelik lifli karışımlara ait optimum karışım çözümleri (3. Grup).

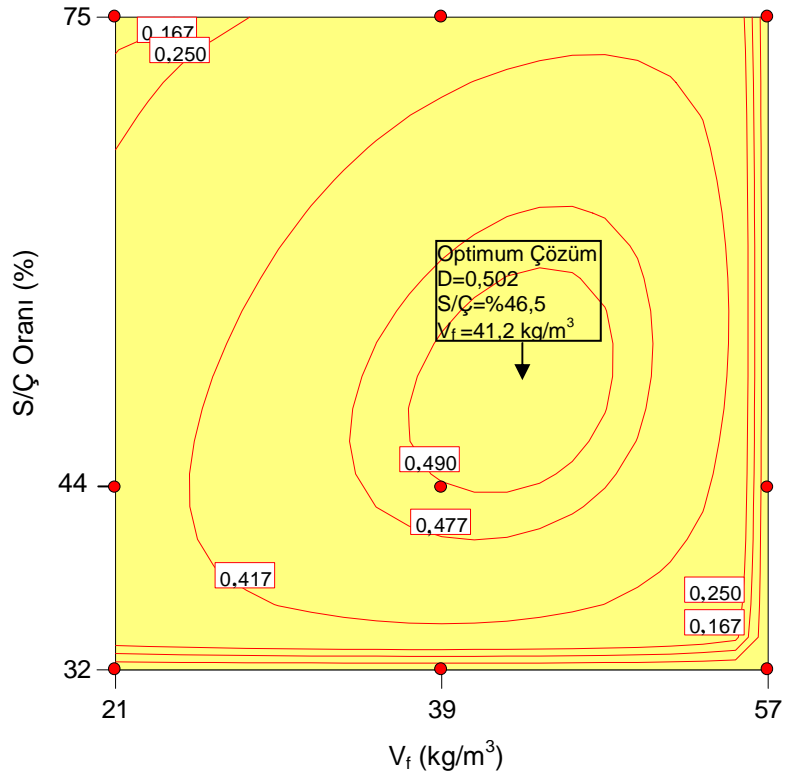
Faktörler ve Tepkiler		Amaç	Optimum	S/Ç Oranına göre Optimum Çözümler		
Faktörler	Su/Çimento Oranı (S/Ç), %	Maksimum	46,56	32	44	75
	Lif Hacmi (V_f), kg/m^3	Minimum	41,23	39,18	40,87	46,49
Tepkiler	Karışım Maliyeti, birim	Minimum	2,73	2,67	2,72	2,91
	Eşdeğer Eğilme Çekme Gerilmesi ($f_{eş-I}$), N/mm^2	Maksimum	3,45	3,57	3,47	3,28
	Eşdeğer Eğilme Çekme Gerilmesi ($f_{eş-II}$), N/mm^2	Maksimum	4,96	5,20	5,00	4,58
	Yarma Çekme Dayanımı (f_y), N/mm^2	Maksimum	6,33	7,93	6,58	4,16
	Özgül Kırılma Enerjisi (G_f), kN/m	Maksimum	6,06	6,21	6,09	5,92
	Çok Amaçlı Arzu Edilirlik Değeri (D)	-	0,502	0,622	0,551	0,315

Farklı S/Ç oranında ve $L/d=80$ olan karma çelik lifli karışımlar için belirlenen amaç koşullarındaki tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü grafikleri Şekil 6.10a ve Şekil 6.10b’de verilmektedir.

Bu sonuçlara göre, karma çelik lifli karışımlarda S/Ç oranı azaldıkça belirli bir mekanik özelliklere ve süneklığe sahip betonların daha az miktarda lif eklenerek elde edileceği belirlenmiştir. Bununla birlikte belirlenen optimum çözümlere göre (Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.10) karma lifli karışımlarda tek tip lif kullanılan karışımlara göre aynı tip lifin ($L/d=80$) daha az miktarda karma olarak kullanılmasıyla daha yüksek dayanımlara (basınç, yarma çekme dayanımı) ve süneklığe sahip çelik lif donatılı betonlar elde edilmiştir. Bu sonuçta, karma lifli karışımlarda kullanılan aynı narinlikteki çelik lifin yüksek dayanımlı olmasının yanında liflerin karma olarak kullanılmasının etkisi de olduğu söylenebilir.



a) Tepki yüzeyi



b) Tepki yüzeyi izdüşümü

Şekil 6.10 : Karma çelik lifli karışımların çok amaçlı optimizasyon sonucunu gösteren tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü.

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, normal ve yüksek dayanımlı uçları kancalı çelik liflerin farklı narinlikte ve hacim oranlarında kullanıldığı ÇLDB'ler tasarlandı ve üretildi. Üç farklı narinlikte normal dayanımlı çelik lifler, farklı S/Ç oranındaki karışımlara farklı lif hacim oranlarında tekli olarak eklendi. Aynı narinliğe sahip ($L/d=80$), farklı uzunluk ve çaplarda olan üç tip yüksek dayanımlı çelik lifler ise, farklı S/Ç oranındaki karışımlarda aynı lif hacim oranlarında karma olarak kullanıldı. Üretilen ÇLDB numunelerin mekanik ve performans özelliklerini belirlemek için basınç, elastisite modülü, yarmada çekme ve kiriş eğilme deneyleri yapıldı.

ÇLDB'lerin performansa dayalı tasarım ile performans sınıflarının ve sayısal optimizasyon teknikleri kullanılarak optimum karışımların belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerden elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1) Normal dayanımlı çelik liflerin tek tür olarak kullanıldığı farklı matris dayanımındaki tüm karışımlarda, çelik lif narinliğinin ve hacim oranı artışının betonun basınç dayanımı ve elastisite modülünü etkilemediği görüldü. Ancak, yüksek dayanımlı aynı narinlikte fakat farklı uzunluktaki çelik liflerin karma olarak kullanıldığı en yüksek matris dayanımlı ($S/Ç=0,32$) karışımda, lif hacim oranının artmasıyla basınç dayanımında belirgin artışlar gözlemlendi. Yüksek dayanımlı karma çelik lifli karışımlarda, artan lif hacmine bağlı olarak daha yüksek basınç tokluğuna sahip betonlar elde edildi. Bu nedenle yüksek matris dayanımlı karışımlarda yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak kullanılmasının daha etkili olduğu söylenebilir. Bu, yüksek dayanımlı matris ile yüksek dayanımlı çelik lif arasındaki birlikte çalışma uyumundan kaynaklanabilir.
- 2) Normal ve yüksek dayanımlı çelik liflerin kullanıldığı tüm karışımlarda, lif narinliğinin ve hacim oranının artmasıyla daha yüksek yarma çekme dayanımları elde edildi. Matris dayanımı yüksek olan normal dayanımlı tek tür çelik lifli ve yüksek dayanımlı karma çelik lifli karışımlarda, yüksek çelik lif hacim oranına

sahip numunelerde daha yüksek yarma çekme dayanımları belirlendi. Yüksek matris dayanımlı betonlarda, daha yüksek değerler elde edilmesi betonda daha güçlü lif-matris ara yüzey bağının oluşmasından kaynaklandığı anlaşıldı. Yüksek dayanımlı karma çelik lifli betonlarda, normal dayanımlı tek tür çelik lifli betonlara göre daha yüksek yarma-çekme dayanımı değerleri elde edildi. Daha yüksek yarma-çekme dayanımının elde edilmesinde karma lifli karışımlarda kullanılan çelik lifin çekme dayanımının daha yüksek olmasının yanında liflerin karma olarak kullanılmasının da etkisi olduğu söylenebilir.

- 3) Genelde çelik liflerin betona katılması sonucu ÇLDB kırış eğilme numunelerinin;
 - a) İlk çatlak yükü,
 - b) Belirli bir lif hacim oranı üzerinde ilk çatlak sonrası en büyük yük,
 - c) Yük-sehim eğrisi altındaki alan (tokluk),
 - d) 5 mm'lik sehim değerinde taşıyabileceği yük,değerlerinin artan matris dayanımı, lif narinliği ve hacim oranıyla birlikte arttığı görüldü.
- 4) Çelik liflerin eklenmesi, genel olarak betonun şekil değiştirme kapasitesinde ve yük-sehim eğrilerinin altında kalan alanı arttırarak toklukta önemli oranda artışa neden oldu. Yüksek lif narinliğine sahip ÇLDB'lerde, en düşük çelik lif hacim oranlı karışımlar dışındaki tüm karışımlarda, yük-sehim eğrilerinin ilk çatlak oluşumundan sonra tekrar yükselerek artan yönde bir iyileşme gösterdiği sonucuna varıldı. Her bir lif narinliğinde en düşük lif hacim oranında üretilen karışımlarda ise, yük-sehim eğrilerinde ilk çatlak sonrasında tekrar bir artış olmamakla birlikte yalın betona göre bir iyileşme gözlemlendi. Bu durumun çelik lif hacminin karışımda yeterli oranda olmaması veya liflerin matriste etkili olabilmesi için gereken lif hacim oranından daha düşük olmasından kaynaklandığı sonucuna varıldı. Farklı dayanımda, narinlikte ve hacim oranında çelik lif kullanılması, betonun ilk çatlak yükü değerine etkisinden çok çatlak sonrası davranışını iyileştirdiği gözlemlendi. İlk çatlak sonrası yük-sehim davranışında, lif narinliği ve hacim oranının önemli bir etkisi olduğu belirlendi.
- 5) Karışımlarda belirli bir lif hacim oranından daha düşük oranda lif kullanıldığında, ÇLDB'lerin ilk çatlak yükünden sonra şekil değiştirme yumuşaması, daha yüksek oranda lif kullanıldığında ise ilk çatlak yükü değerinden tepe yükü değerine kadar şekil değiştirme sertleşmesi, tepe yükü değerinden sonra da şekil değiştirme

yumuşaması sergilediği gözlemlendi. Kritik bir lif hacim oranından daha yüksek oranda lif kullanıldığında ÇLDB'nin sergilediği davranış, yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemelerin tipik bir özelliğine sahip olduğu görüldü.

- 6) Normal ve yüksek dayanımlı çelik lifli karışımlarda, lif hacim oranı arttıkça, yük-sehim eğrisinde ilk çatlak yükü değerinden sonra daha az oranda bir azalmadan sonra liflerin yük taşıyıp aktarmaya başlamasıyla tekrar bir artış meydana geldi. Karma lifli karışımlarda ise ilk çatlak yükü sonrasında tek tip çelik lifli karışımlara göre biraz azalmanın ardından tekrar artış görüldü. Bu sonuç, aynı narinlikte ve farklı uzunluktaki liflerin kullanıldığı karma lifli karışımlarda matris fazında boyutsal olarak daha homojen bir lif dağılımı nedeniyle sağlanan daha etkin çatlak kontrolünden kaynaklanabileceği sonucuna varıldı.
- 7) Tüm karışımlarda çelik lif dayanımı, lif narinliği ve hacim oranının artışıyla eğilme dayanımının belirgin ölçüde arttığı belirlendi. Çelik liflerin betona eklenmesiyle yarma çekme dayanımına göre eğilme dayanımında meydana gelen artışın daha belirgin olduğu görüldü. Artan çelik lif hacmiyle birlikte eğilme dayanımındaki artış oranı, lif narinliği düşük olan numunelerde daha az meydana geldi. Aynı narinlikte ve farklı uzunluklardaki yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak kullanıldığı numunelerde daha yüksek eğilme çekme dayanımları elde edildi.
- 8) Farklı narinlikte ve hacim oranlarında normal ve yüksek dayanımlı çelik liflerin eklendiği ÇLDB'lerde, yalın betona göre özgül kırılma enerjilerinde önemli oranda artışlar gözlemlendi. Bu artışlar, normal dayanımlı çelik lif narinliği ve hacim oranı yüksek olan numunelerde daha fazla seviyede oluştu. Bu karışıma giren çelik liflerin, artan lif hacmine bağlı olarak çatlak birleşiminde daha etkili bir köprü rolü oynamasına bağlanabilir.
- 9) KSD ve TSD için performans parametreleri olan eşdeğer eğilme çekme dayanımlarını, matris dayanımı, çelik lif dayanımı, lif narinliği ve lif hacim oranı etkilemektedir. ÇLDB'lerde matris dayanımı, lif narinliği ve hacim oranı arttıkça KSD ve TSD için daha yüksek eşdeğer eğilme çekme dayanımları elde edildi. Eşdeğer eğilme çekme dayanımlarında en yüksek değerler, yüksek dayanımlı karma çelik lif içeren karışımlarda bulundu. Çelik lif narinliği 80 olan her bir matris dayanımındaki karışımlarda, TSD'ye göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımlarının KSD'ye göre ilk lif hacim oranı haricinde daha büyük

olduğu görüldü. Bu lif hacim oranının artışıyla ilk çatlak sonrası davranıştaki iyileşmenin artmasından kaynaklandığı anlaşıldı. Bununla birlikte, $S/\zeta=0,55$ olan karışımlarda, $L/d= 65$ ve $L/d=55$ olan numunelerde kullanılan tüm lif hacim oranlarında TSD'ye göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımlarının KSD'ye göre daha küçük olduğu görüldü. Sonuçta, yük-sehim eğrisinde lif narinliğinin azalmasıyla ilk çatlak sonrası davranıştaki iyileşmenin daha az olmasından kaynaklandığı anlaşıldı.

- 10) Normal ve yüksek dayanımlı çelik liflerin tekli ve karma olarak kullanıldığı karışımlarda belirli bir mekanik (yarma çekme ve eğilme dayanımı) ve süneklik (özgül kırılma enerjisi, KSD ve TSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımı) özeliğine sahip beton elde edebilmek için matris dayanımı ve lif narinliği azaldıkça daha fazla hacim oranlarında lif kullanılması gerektiği belirlendi. Bu, ÇLDB'lerin maliyetini etkileyen karışımdaki lif hacim oranının azaltılmasında matris dayanımı ve lif narinliğinin etkili olduğunu göstermektedir.
- 11) Farklı matris dayanımındaki betonlara, farklı dayanım (ND ve YD), narinlikte ve hacim oranlarında çelik liflerin eklenmesiyle, ÇLDB'nin kalıcı dayanım faktörlerine göre performans sınıflarının yükseldiği görüldü ve daha sünek betonlar elde edildi. Bu süneklik artışında, kırılma sürecinde çelik liflerin sıyrılması ve çatlakların birleşiminde bir köprü rolü oynamasının etkisi oldu. Kırılma sürecinde çelik liflerin matristen sıyrılması, kopması ve çatlakların birleşimindeki köprüleme etkisi ile ilgili fotoğraflar Ek-G'de verilmektedir.
- 12) Aynı narinlikte farklı uzunlukta yüksek dayanımlı çelik liflerin daha az hacim oranlarında karma olarak kullanılması sonucu, yüksek mekanik (yarma çekme, eğilme) dayanım, enerji yutma kapasitesi ve eşdeğer eğilme çekme dayanımına sahip sünek betonlar elde edildi.
- 13) ÇLDB'lerin üretiminde kullanılan çelik liflerin maliyeti uygulanabilirlik açısından önemlidir. Çelik lif dayanımı ve narinliği arttıkça, çelik liflerin maliyeti de yükselmektedir. ÇLDB'lerin maliyeti göz önüne alınarak en düşük maliyet ve en yüksek performans koşullarında yapılan çok amaçlı sayısal optimizasyon sonucunda, matris dayanımı ve lif narinliği arttıkça daha sünek beton elde edebilmek için daha az hacim oranında çelik lif kullanılmasının yeterli olabileceği gösterildi.

14) Bu çalışmada, ÇLDB'lerin şekil değiştirme kapasitelerine göre belirlenen performans parametreleri kullanılarak; beton sınıfı, çelik lif dayanımı, lif narinliği ve hacim oranına göre performans sınıflarının elde edilebileceği anlaşıldı. Böylece, bu çabanın ÇLDB'lerin yapısal tasarım ve uygulamalarda kullanılabilmesine yönelik çalışmalarda performans sınıflarının belirlenmesine katkı sağladığı sonucuna varıldı.

Çelik liflerin betonlar üzerinde yaptığı iyileşmelerin belirlenmesi ve ÇLDB'lerin performans sınıflarının geliştirilmesine yönelik yapılacak ileri çalışmalar için aşağıdaki öneriler sıralanabilir.

- 1) Çelik lif narinliği ve hacim oranı, lif çekme dayanımı ve lifin matristen sıyrılma dayanımı ÇLDB'lerin mekanik özelliklerini etkileyen lif ile ilgili faktörlerdir. Farklı çekme dayanımındaki liflerin farklı dayanımlardaki matristen sıyrılma dayanımlarının, ÇLDB'lerin mekanik ve süneklik özelliklerine olan etkisinin belirlenmesi için aynı tip ve narinlikte (aynı uzunlukta) farklı çekme dayanımındaki çelik liflerin, aynı işlenebilirlikte ve farklı matris dayanımlarındaki karışımlarda kullanıldığı daha ileri deneysel çalışmalar yanında modellemeler de yapılabilir. Böylece bu faktörlerin, ÇLDB'lerin yük-sehim eğrileri ve performans parametreleri üzerindeki etkisi belirlenebilir ve modellemelerde davranışın daha iyi anlaşılmasına katkı sağlanır.
- 2) Yüksek narinlikte ve lif hacim oranlarında normal ve yüksek dayanımlı çelik lif içeren belirli işlenebilirlikteki farklı matris dayanımlı karışımların performans parametrelerine lif dağılımı, yönlendirmesinin ve farklı çevresel koşulların etkisi belirlenerek ÇLDB'ler için farklı faktörlerin etkisinin birlikte dikkate alındığı daha genel performans sınıfları belirlenebilir.
- 3) Genellikle çelik lif içermeyen taze beton karışımların işlenebilirliğinin belirlenmesinde pratik ve kolay bir yöntem olan Çökme Deney Yöntemi, ÇLDB karışımlarda yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Bu nedenle ÇLDB'lerin işlenebilirliğinin belirlenmesi için daha uygun yöntemlerin kullanılması önerilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Groth, P. and Ghasemlou, F.**, 1996. Toughness characteristics of steel fibre reinforced concrete with energetically modified cement, *Division of Structural Engineering, Internal Report*, **96-05**, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- [2] **Taşdemir, M.A.**, 1999. Çelik tel takviyeli yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışı, *Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu*, Sabancı Center, İstanbul, 26 Kasım, 4s.
- [3] **Ünal, O.**, 1999. Isıl işlem uygulamasının lifli betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması, *Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu*, İstanbul, 26 Kasım,
- [4] **Vitt, G.**, 2003. Performance classes of steel fibre reinforced concretes, *Seminar Notes*, N.V. Bekaert S.A., Zwevegen, Belgium.
- [5] **Qian, C.X. and Stroeven, P.**, 2000. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, **30**, 63-69.
- [6] **Bayramov, F.**, 2004. Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Sun, W., Chen, H., Luo, X. and Qian, H.**, 2001. The Effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, **31**, 595-601.
- [8] **Rossi, P.**, 2000, Ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC): An Overview, *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France, 13-15 September. 87-100.
- [9] **Yao, W., Li, J. and Wu, K.**, 2003. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction, *Cement and Concrete Research*, **33**, 27-30.
- [10] **Abdou, H.M., Naaman, A.E. and Wight, J.K.**, 1988. Cyclic response of reinforced concrete connections using cast-in-place SIFCON matrix, *Department of Civil Engineering, UMCE 88-8*, University of Michigan, Ann Arbor.
- [11] **Bayramov, F., Tasdemir, C. and Tasdemir, M.A.**, 2004. Optimization of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface methods, *Cement and Concrete Composites*, **26**, 665-675.

- [12] **Esen, Y.**, 2003. Poliakrilonitril lif takviyeli betonların mekanik özelliklerinin ve kullanılabilirliğinin araştırılması, *F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **15** (1), 47-54.
- [13] **Naaman, A.E.**, 1998. New fibre technology (Cement, Ceramic and Polymeric Composites) *American Concrete International*, **20** (7), 57-62.
- [14] **Naaman, A.E.**, 2003. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1** (3), 241-252.
- [15] **Naaman, A.E. and Harajli, M.H.**, 1990. Mechanical properties of high performance concretes, Strategic Highway Research Program, **SHRP-C/WP-90-004**, National Research Council, Washington DC, USA.
- [16] **Barr, B.I.**, 1992. Fibre reinforced concrete-Fibre Reinforced Cement and Concrete, *Proceeding of the Fourth RILEM International Symposium*, New York, USA, 20-23 July, 3-11.
- [17] **Yazıcı, S., İnan, G. and Tabak, V.**, 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, **21**, 1250-1253.
- [18] **Altun, F., Haktanir, T. and Ari, K.**, 2007. Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams, *Construction and Building Materials*, **21**, 654-661.
- [19] **ACIFC**, 1999. Steel fibre reinforced industrial ground floors, *Associate of Concrete Industrial Flooring Contractors*, Warwickshire, 24 pp, London, England.
- [20] **Azizinamini, A., Pavel, R., Hatfield, E. and Ghosk, S.K.**, 1999. Behaviour of lap-spliced reinforcing bars embedded in high-strength concrete, *ACI Structural Journal*, **96** (5), 826-835.
- [21] **Hamad, B.S., Harajli, M.H. and Jurmaa, G.**, 2004. Effect of fiber reinforcement on bond strength of tension lap-splices in high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, **98** (5), 638-647.
- [22] **Köksal, F.**, 2004. Çelik tel donatılı betonların mekanik davranışı ve optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] **Köksal, F., Eyyubov, C. ve Özcan, D.M.**, 2002. Çelik tel içeriğinin betonun mekanik özelliklerine etkisi, *5. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, İstanbul, 25-27 Eylül, s. 169-179.
- [24] **Shah, S.P. and Rangan B.V.**, 1971. Fiber reinforced concrete properties, *ACI Materials Journal*, **68** (2), 126-137.

- [25] **Yazıcı, Ş., İnan, G. and Tabak, V.**, 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, **21**, 1250-1253.
- [26] **Shah, S.P.**, 1988. Theoretical models for predicting the performance of fiber reinforced concrete, *Journal of Ferrocement*, **8** (3), 263-284.
- [27] **Swamy, R.N.**, 1975. Evaluation of fibre reinforced cement based composites: Fibre reinforcement of cement and concrete, *Materials and Structures*, **8** (3), 235-254.
- [28] **Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D.H. and Mpczko, A.**, 2000. Fracture properties and acoustic emission response of hybrid polypropylene-steel fibre reinforced concrete, *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France, 13-15 September, 491-500.
- [29] **Banthia, N., Azzabi, M. and Pigeon M.**, 1993. Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, **26**, 405-413.
- [30] **Kim, N., Saeki, N. and Horiguchi, T.**, 1999. Crack and strength properties of hybrid fiber reinforced concrete at early ages, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, **21**, 241-246.
- [31] **Mobasher, B. and Yu Li, C.**, 1996. Mechanical properties of hybrid cement-based composites, *ACI Materials Journal*, **93**, 284-292.
- [32] **Lawler, J.S.**, 2001. Hybrid fiber-reinforcement in mortar and concrete, *PhD Thesis*, Northwestern University, Evanston, USA.
- [33] **Banthia, N. and Sappakittipakorn M.**, 2007. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cement and Concrete Research*, **37**, 1366-1372.
- [34] **Banthia, N. and Nandakumar, N.**, 2003. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*, **25**, 3-9.
- [35] **Sun, W., Chen, H., Luo, X. and Qian, H.**, 2001. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, **31**, 595-601.
- [36] **Bentur, A., Mindess, S.**, 1990. Fibre Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science, London, UK.
- [37] **Rossi, P.**, 1997. High performance multimodal fiber reinforced cement composites, *ACI Materials Journal*, **94**, 478-483.

- [38] **Soroushion, P., Tlili, A., Alhozaimy, A. and Khan, A.**, 1993. Development and characterization of hybrid polyethylene fiber reinforced cement composites, *ACI Materials Journal*, **90**, 182-190.
- [39] **Qian, C. and Stroeven, P.**, 2000. Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres, *Cement&Concrete Composites*, **22**, 343-351.
- [40] **Naaman, A.E.**, 1992. SIFCON: Tailored Properties For Structural Performance, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, pp.18-38, E & FN Spon, London.
- [41] **Krstulovic-Opara, N. and Toutanji, H.**, 1995. Infrastructural repair and retrofit using high performance fiber reinforced cement composites, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composite*, **2**, 367-386.
- [42] **Balaguru P. and Kendzulak, C.**, 1987. Mechanical properties of SIFCON, *Fibre Reinforced Concrete Properties and Application*, ACI Special Publication, **SP-105**, pp. 247-268, Detroit, Michigan.
- [43] **Wongtanakitcharoen, T. and Naaman, A.E.**, 2004. Early age bond strength development, *Sixth RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete*, Varenna, Italy, September 20-22, 433-444.
- [44] **Guerrini G.L.**, 2000. Applications of high-performance fiber-reinforced cement-based composites, *Applied Composite Materials*, **7**, 195-207.
- [45] **Lankard, D.R.**, 1986. Preparation, properties and applications of cement-based composites containing 5-20 percent steel fibers, pp. 199-217, *Elsevier Applied Science Publisher*, London.
- [46] **Naaman, A.E.**, 1987. High performance fiber reinforced cement composites, *Proceedings IABSE Symposium on Concrete Structures for The Future*, Paris, Zurich, 371-376.
- [47] **Eren, Ö. and Çelik, T.**, 1997. Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, **11**, 373-382.
- [48] **Marar, K., Eren, Ö. and Çelik, T.**, 2001. Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength reinforced concrete. *Material Letter*, **47**, 297-304.
- [49] **Kützing, L.**, 1997. Use of Fiber Cocktails to Increase Ductility of High Performance Concrete, *Annual Civil Eng. Report (LACER)*, **Lacer No.2**, Leipzig.
- [50] **Song, P.S. and Hwang, S.**, 2004. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, **18**, 669-673.

- [51] **Dubey, A.**, 1999. Fiber reinforced concrete: characterization of flexural toughness & some studies on fiber-matrix bond-slip interaction, *PhD Thesis*, The University of British Columbia, Canada.
- [52] **Toutanji, H. and Bayasi, Z.**, 1998. Effect of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, **28** (1), 115-124.
- [53] **Newman, J. and Choo, B.**, 2003. *Advanced Concrete Technology*, Elsevier Ltd., Oxford.
- [54] **Bekaert**, 1990. *Industrial Floors with Dramix Steel Wire Fibre Reinforced Concrete*, N.V., Bekaert S.,A., Zwevegem, Belgium.
- [55] **Knapton, J.**, 2003. *Ground Bearing Concrete Slabs*, Thomas Telford, London.
- [56] **ACI Committee 544**, 1993. Guide for Proportioning mixing placing and finishing steel fibre reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **90** (1), 94-101.
- [57] **Balendran, R.V., Zhou, F.P., Nadeem, A. and Leung, A.Y.T.**, 2002. Influence of steel fibers on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete, *Building and Environment*, **37**, 1361-1367.
- [58] **Bayramov, F.**, 2004. Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Optimum Tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [59] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Ağar A.Ş. and Yerlikaya, M.**, 2005, Çelik tel donatılı betonların performansına dayalı tasarımı, *6. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 16-18 Kasım, s. 33-44.
- [60] **ACI Committee 544.1R**, 1996. *Fibre Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, Michigan, USA.
- [61] **Concrete Society**, 1994. *Concrete industrial floors-A guide to their design and construction*, *Technical Report, No.34*, The Concrete Society, Slough.
- [62] **Sancak, E. and Ünal, O.**, 2000. Hafif betonda çelik lif kullanımının beton özelliklerine etkisi, *A.K.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, **2**(1), 79-88.
- [63] **Beksa Firması**, 1998. Çelik tel takviyeli betonun özellikleri, *Beksa Broşürleri Basımevi*, İzmit.
- [64] **Bentur, A. and Mindess S.**, 1990. *Fiber Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science, London.
- [65] **Balaguru, P.N. and Shah, S.P.**, 1992. *Fiber-Reinforced Cement Composites*, Mc Graw-Hill International Editions, New York.

- [66] **Nataraja, M.C., Dhang, N. and Gupta, A.P.**, 1999. Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, **21**, 383-390.
- [67] **ACI Committee 544**, 1988. Measurement of properties of fibre reinforced concrete, *ACI (544.2R)*, **No.85-M58**, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- [68] **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** (5), 956-965.
- [69] **Gao, J., Sun, W. and Morino, K.**, 1997. Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, **19**, 307-313.
- [70] **Arslan, A. and Aydın., A.C.**, 1999, Lifli betonların darbe etkisi altında genel özellikleri, *Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu*, Sabancı Center, İstanbul, 26 Kasım.
- [71] **Taşdemir, M.A., İlki, A. and Yerlikaya, M.**, 2002. Mechanical behaviour of stel fibre reinforced concrete used in hydraulic structures, *Proceeding of HYDRO 2002, International Conference of Hydropower and Dams*, Antalya, Turkey, November 4-7, 159-166.
- [72] **Bayramov, F., İlki, A., Taşdemir, C., Taşdemir, M.A. ve Yerlikaya, M.**, 2004. SFRCs for concrete roads in heavily trafficked situations, *9th International Symposium on Concrete Roads*, İstanbul, April 4-7, 73-82.
- [73] **Chen, L., Mindess, S., Morgan, D. and Shah, S.**, 1995. Comparative toughness testing of fiber reinforced concrete testing of fiber reinforced concrete, *ACI Special Publication*, **SP-115**, pp. 41-70, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- [74] **Balaguru, P.N. and Ramakrishnan, V.**, 1987. Comparison of slump cone and V-B tests as measure of workability for fiber reinforced and plain concrete, *Cement, Concrete and Aggregates*, **6** (2), 3-11.
- [75] **Yerlikaya, M.**, 1999. Çelik tel donatılı zemin betonlar, tasarım ve yapım ilkeleri, *Teknik Rapor*, İzmit, Türkiye.
- [76] **Bekaert**, 1999. *High tensile steel fibres for high strength concrete*, Brochure, Zwevegen, Belgium.
- [77] **Portland Cement Association**, 1990. Fiber Reinforced Concrete, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.

- [78] **Captain, R.G.**, 1992. The behaviour of steel fibre reinforced concrete members subjected static and dynamic loading, *Master of Science Thesis*, Kingston Ontario, Canada.
- [79] **Williamson, G.R.**, 1978. Steel fibers as web reinforcement in reinforced concrete, *Proceedings, U.S Army Service Conference*, West Point, New York, 3, 363-377.
- [80] **Jindal R.**, 1981. Shear and moment capacities of steel fibre reinforced concrete beams, **ACI**, *ACI Special Publication*, **SP-81**, pp. 2-15, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- [81] **Robert, T.M. and Ho, N.L.**, 1982. Shear failure of deep fibre reinforced concrete beams, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, **4** (3), 145-152.
- [82] **Swaddiwudhipong, S. and Shanmugam, N.E.**, 1985. Fibre reinforced concrete deep beams with openings, *ASCE Journal of Structural Engineering*, **111** (8), 1679-1690.
- [83] **Bollana, R.D.**, 1980. Steel fibres as shear reinforcement in two span continuous reinforced concrete beams, *Master of Science Thesis*, Clarkson College of Technology, Potsdam, New York, USA.
- [84] **Gopalaratnam, V.S. and Shah, S.P.**, 1985. Softening response of plain concrete in direct tension, *Journal of the American Concrete Institute*, **82**(3), 310-323.
- [85] **Fanelle D. and Naaman, A.A.**, 1985. Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression, *Journal of the American Concrete Institute*, **82** (4), 475-483.
- [86] **Shah S.P. and Naaman A.E.**, 1976. Mechanical properties of glass and steel fibre reinforced mortar, *ACI Journal*, **73** (1), 50-53.
- [87] **Nagarkar P.K., Tambe S.K. and Pazare D.G.**, 1987. Study of fibre reinforced concrete, *Proc of Int Symp of fiber reinforced concrete*, December 16-19, Madras, India, **2**, 130-138.
- [88] **Duzgun, O.A., Gul, R. and Aydin, A.C.**, 2005. Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete, *Materials Letter*, **59**, 3357-3363.
- [89] **Berube, F.S.**, 2000. Effect of concrete ductility on flexure of beams, Senior Report, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada.
- [90] **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.

- [91] **Yin, W.S. and Hsu, T.C.**, 1990. Uni-and-bi axial compressive fatigue of fibre concrete, *Materials Engineering Congress*, ASCE, Denver, Aug. 13-15, 1173-1181.
- [92] **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** (6), 183-188.
- [93] **Shah, S.P. and Rangan B.V.**, 1971. Fiber reinforced concrete properties, *ACI Journal*, **68**, 126-134.
- [94] **Traina, L.A. and Mansour, S.A.**, 1991. Biaxial strength and deformational behaviour of plain and steel fibre concrete, *ACI Materials Journal*, **88** (4), 354-362.
- [95] **Naaman, A.E.**, 1981. Fibre reinforced concrete under dynamic loading, *ACI Special Publication*, **SP-81**, pp. 169-189, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- [96] **Biolzi, L., Meda, A. and Rosati, G.**, 2000. Cementitious materials under uniaxial loads, *Fifth RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France, 13-15 September, 557-566.
- [97] **Nanni, A.**, 1988. Splitting-tension test for fiber reinforced concrete, *ACI Material Journal*, **85** (1), 229-232.
- [98] **Edginton, J., Hannat, D.J. and Williams, R.I.T.**, 1974. Steel fibre reinforced concrete, Building Research Establishment Current Paper, Paper No. 69/74, Garston, Waterford, England, 17 pp.
- [99] **Abdull-Ahad, R.B. and Abbas, J.M.**, 1989. Behaviour of steel fibre reinforced concrete under biaxial stresses, In: Swamy R.N., Barr, B., editors, *Fiber reinforced cement and concretes, recent developments*, Elsevier Science Publishers Ltd, 126-130.
- [100] **Cancho, A.V. and Galves, V.S.**, 1986. A micromechanical model for the tensile stress-strain curve of fiber reinforced cements, in *RILEM Symposium on Development in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Sheffield, UK, paper 1.1.
- [101] **Gopalaratnam, V.S., and Shah, S.P.**, 1986. Micromechanical models for the tensile fracture of steel fiber reinforced concrete, *Proceedings RILEM Symposium FRC 86*, Sheffield, England.
- [102] **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**(4), 286-298.

- [103] **Berube, S.F.**, 2003. Bond strength of deformed reinforcing bars in plain high-strength concrete and high-strength steel fibre reinforced concrete, *Masters of Science Thesis*, University of New Brunswick, Canada.
- [104] **Pigeon, M. and Cantin, R.**, 1998. Flexural properties of steel fiber-reinforced concrete at low temperature, *Cement and Concrete Composites*, **20**, 365-375.
- [105] **Stavena, P., Sakai, K. and Horigushi, N.**, 1992. Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete under low temperatures, *Proc., Japan Concr. Inst.*, 16-66.
- [106] **ACI Committee 544**, 1982. State of the art-report fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-82), *Concrete International*, **4**(5), 9-30.
- [107] **Taylor, M., Lydon, F.D. and Barr, B.**, 1997. Toughness measurement on steel fibre-reinforced high strength concrete, **19**, 329-340.
- [108] **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, *Int. J. Cement Composites and Lightweight Concrete*, **3**, 73-91.
- [109] **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.
- [110] **Ramakrishnan, V., Oberling, G. and Tatnall, P.**, 1987. Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete, *Fiber Reinforced Concrete- Properties and Applications*, ACI Special Publication, **SP-105**, pp. 225-245, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- [111] **Naaman, A.E. and Hammoud, H.**, 1998. Fatigue characteristics of high performance fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, **20**, 353-363.
- [112] **Kayali, O., Haque, M.N. and Zhu, B.**, 1995. Drying shrinkage of fiber reinforced concrete containing fly ash, *Cement and Concrete Research*, **29**, 1835-1840.
- [113] **Paul, K., Polivka, M. and Mehta, M.K.**, 1981. Properties of Fiber Reinforced Shrinkage-Compensating Concrete, *ACI Journal*, **78** (6), 488-492.
- [114] **Mangat, P.S. and Azari, M.M.**, 1998. Shrinkage of steel fibre reinforced cement composites, *Materiaux et Construction (RILEM)*, **21**, 63-71.
- [115] **Bekaert**, 2001. Dramix Çelik Tel Donatılı Betonlar için Tasarım Esasları, Rapor, Beksa, İstanbul.

- [116] **Moens, I. and Nemeger, D.**, 1991. Designing reinforced concrete based on toughness characteristics, *Concrete International*, 38-43.
- [117] **Falkner, H., Huang, Z. and Teutsch, M.**, 1995. Comparative study of plain and steel fiber reinforced concrete ground slab, *Concrete International*, 17 (1), 45-51.
- [118] **Gopalaratnam, V.S. and Gettu, R.**, 1995. On the characterization of flexural toughness in FRC, *Cement Concrete Composites*, **17**, 239-254.
- [119] **Heneger, C.H.**, 1978. Toughness index of fiber concrete, In Testing and Test Methods of fibre Cement Composites *RILEM Symposium Construction*, Lancaster, UK, 79-86.
- [120] **Johnson, C.D.**, 1982. Definitions and measurement of flexural toughness parameters for fiber reinforced concrete, *Cement, Concrete Aggregates*, **4**, 53-60.
- [121] **Barr, B. and Hasso, E.**, 1982. A study of toughness indices, *Mag. Concrete Research*, **37**, 53-60.
- [122] **DBV**, 1996. Recommendation: Basis for the design of industrial floor slabs out of steel fiber reinforced concrete. Eingenverlag, Wiesbaden, Germany.
- [123] **ASTM C 1018-97**, 1997. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), ASTM Standard, V.4.02, pp. 509-516, West Conshohocken, PA.
- [124] **JSCE-SF4 Standard**, 1984, Standard for flexural strength and flexural toughness, methods of test for steel fiber reinforced concrete, Japan Concrete Institute (JCI), Concrete Library of JSCE, **3**, 58-66.
- [125] **Norwegian Concrete Association**, 1993. Publication No.7, Guidelines for shotcrete, Oslo.
- [126] **TS 2941**, 1978. Taze betonda birim ağırlık, verim ve hava miktarının ağırlık yöntemiyle tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [127] **TS EN 12350-2**, 2002. Beton-taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slamp) deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [128] **TS EN 12390-3**, 2003. Beton-sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [129] **TS EN 12390-6**, 2002. Beton-sertleşmiş beton deneyleri-deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- [130] **TS 10515**, 1992. Beton-çelik tel takviyeli-eğilme mukavemeti deney metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [131] **RILEM Technical Committee 50-FMC**, 1985. Determination of fracture energy mortar and concrete by means of three-point bend tests on notch beams, *Materials and Structures*, **18**(106), 285-290.
- [132] **Benyounis, K.Y., Olabi, A.G. and Hashmi, M.S.**, 2007. Multi-response optimization of CO₂ laser-welding process of austenitic stainless steel, *Optics & Laser Technology*, **40**, 76-87.
- [133] **Box, G. and Wilson, K.**, 1951. On the experimental attainment of optimum conditions, *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, **13**, 1-45.
- [134] **Khayet, M., Cojocaru, C. and Zakrzewska, G.**, 2008. Response surface modeling and optimizations in evaporation, *Journal of Membrane Science*, **321**, 272-283.
- [135] **Myers R.H. and Montgomery, D.C.**, 2002. Response Surface Methodology: Process And Product Optimization Using Designed Experiment, John Wiley & Sons, New York.

EKLER

EK A: Farklı dayanım ve narinliğe sahip çelik lifler.

EK B: Numunelerin deneyler için hazırlanması.

EK C: Sertleşmiş beton deneyleri.

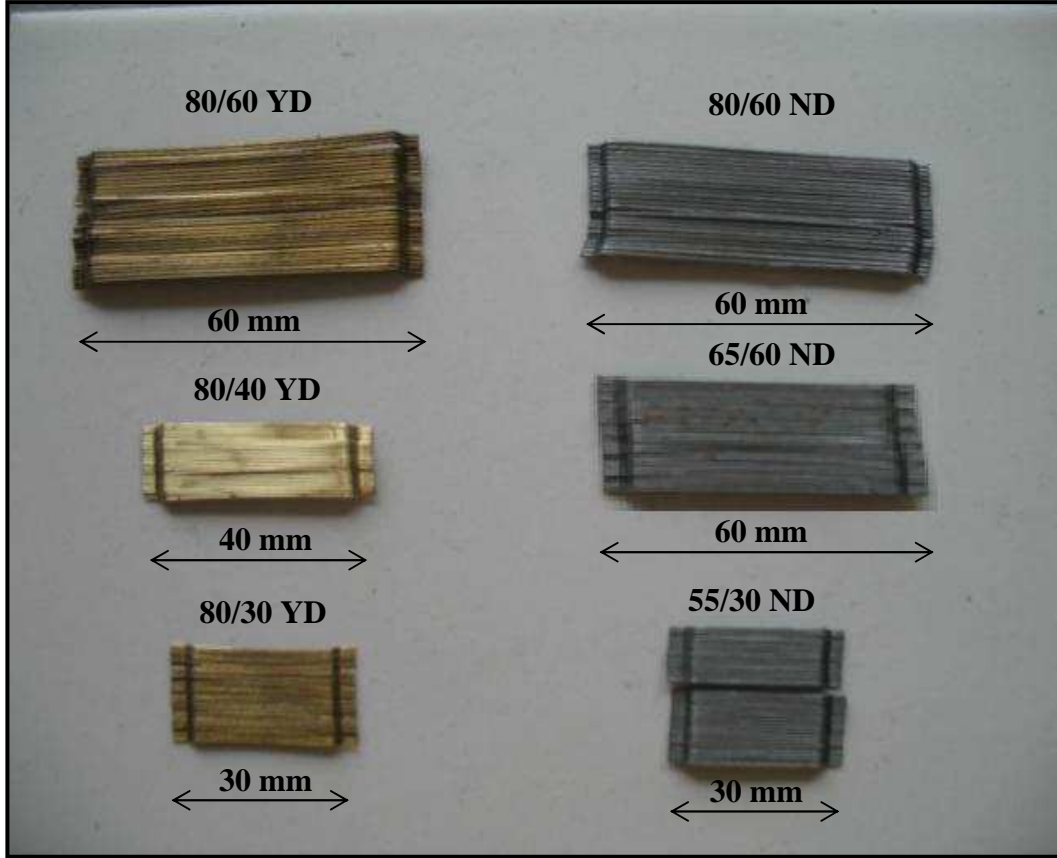
EK D: Çelik lif donatılı küp numunelere ait basınç deneyi sonuçları.

EK E: Kapalı çevrimli deplasman kontrollü basınç cihazında karma çelik lif donatılı silindir numunelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

EK F: Yalın ve çelik lif donatılı kiriş numunelere ait dört noktalı eğilme deneyi ile belirlenen yük-sehim eğrileri.

EK G: ÇLDB'lerde çelik liflerin çatlak kontrol, köprüleme ve sıyrılma bölgeleri.

EK A: Farklı dayanım ve narinliğe sahip çelik lifler



Şekil A.1 : Karışımlarda tekli ve karma olarak kullanılan farklı tip çelik lifler.

EK B : Numunelerin deneyler için hazırlanması.



Şekil B.1 : Başlık yapılmış silindir numuneler.



Şekil B.2 : Yükleme yüzeyi işaretlenmiş disk numuneler.



Şekil B.3 : Yükleme noktaları işaretlenmiş kiriş numuneler.

EK C : Sertleşmiş beton deneyleri.



Şekil C.1 : Yük kontrollü silindir basınç deneyi (1. ve 2. Grup).



Şekil C.2 : Yük kontrollü küp basınç deneyi.



Şekil C.3a : Elastisite modülü aparatı.



Şekil C.3b : Elastisite modülü deneyi.

Şekil C.3 : Elastisite modülü aparatı ve deneyi (1. ve 2. Grup).



Şekil C.4a : Kapalı çevrimli deplasman kontrollü basınç deney cihazında kullanılan silindir numune ve deformasyon ölçümleri için aparatlar.



Şekil C.4b : Silindir basınç ve elastisite modülü deneyi.

Şekil C.4 : Şekil değiştirme kontrollü silindir basınç ve elastisite modülü deneyi (3.Grup).

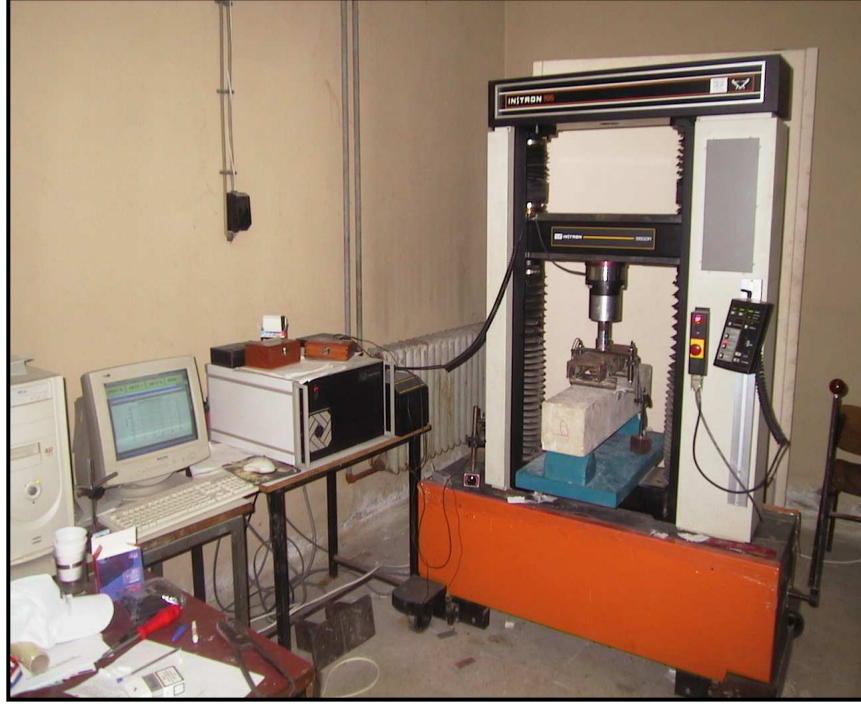


Şekil C.5a : Disk yarma çekme deneyi.



Şekil C.5b : Disk yarma çekme numunesi yerleşim düzeni ve deney sonrası.

Şekil C.5 : Disk yarma çekme numunesi yerleşim düzeni ve deneyi.



Şekil C.6a : Kapalı çevrimli deplasman kontrollü yükleme cihazında kiriş eğilme deney sistemi.



Şekil C.6b : Kiriş numunesinin yerleşim düzeni ve eğilme deneyi.



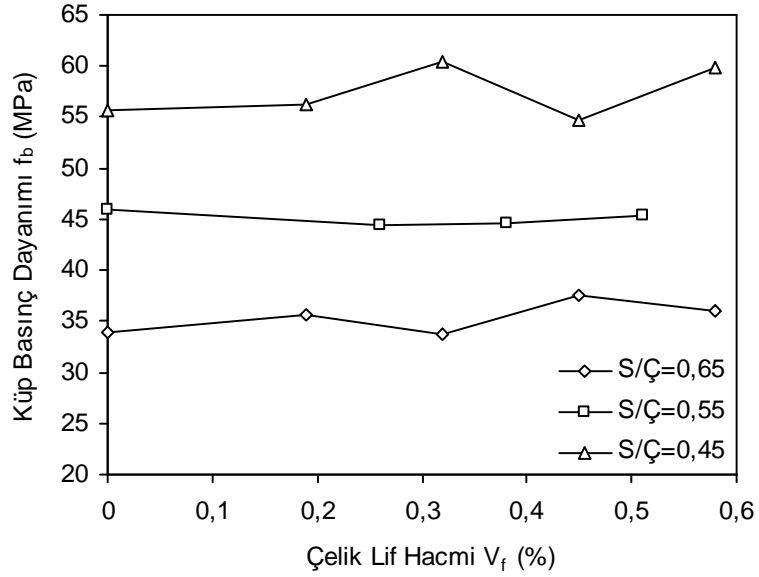
Şekil C.6c : Eğilme etkisindeki kiriş numunesinin deney düzeni.



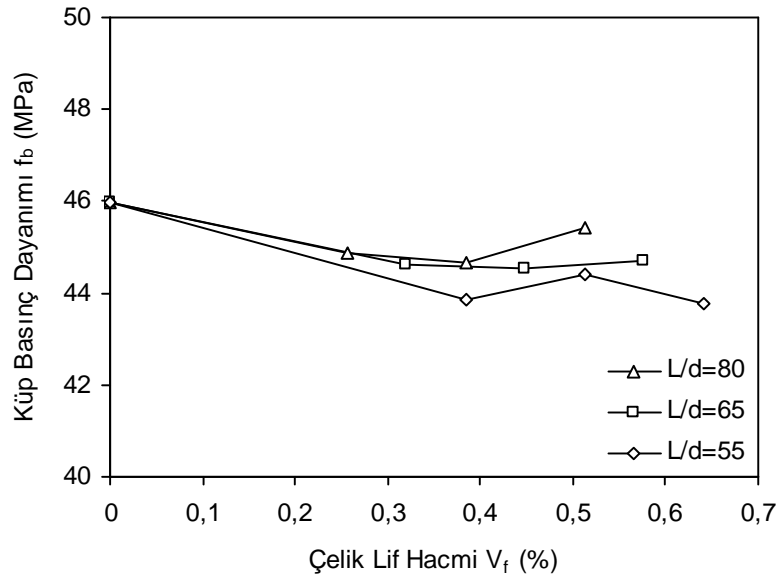
Şekil C.6d : Eğilmeye tabi tutulan kiriş numunesinin deney düzeni.

Şekil C.6 : Kapalı çevrimli deplasman kontrollü kiriş eğilme deneyi.

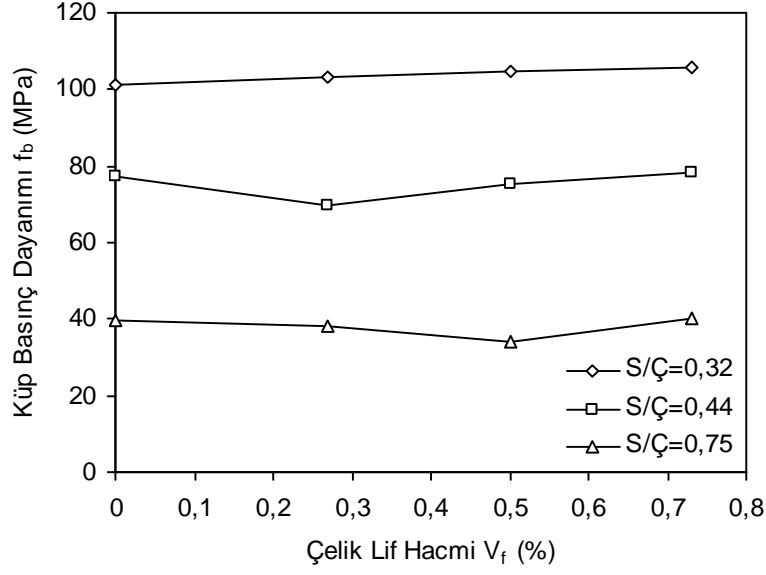
EK D : Çelik lif donatılı küp numunelere ait basınç deneyi sonuçları.



Şekil D.1 : Normal dayanımlı çelik lif hacim oranının farklı S/Ç oranındaki küp numunelerin basınç dayanımına etkisi ($L/d=80$).

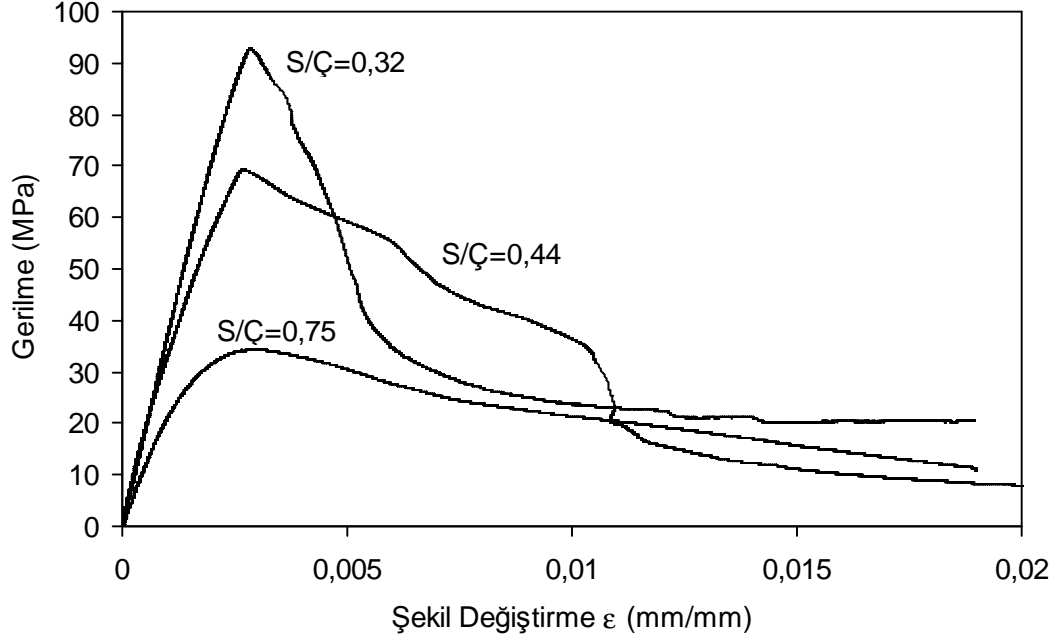


Şekil D.2 : $S/\Ç=0,55$ olan karışımlarda normal dayanımlı çelik lif narinliğinin ve hacim oranının küp basınç dayanımına etkisi.

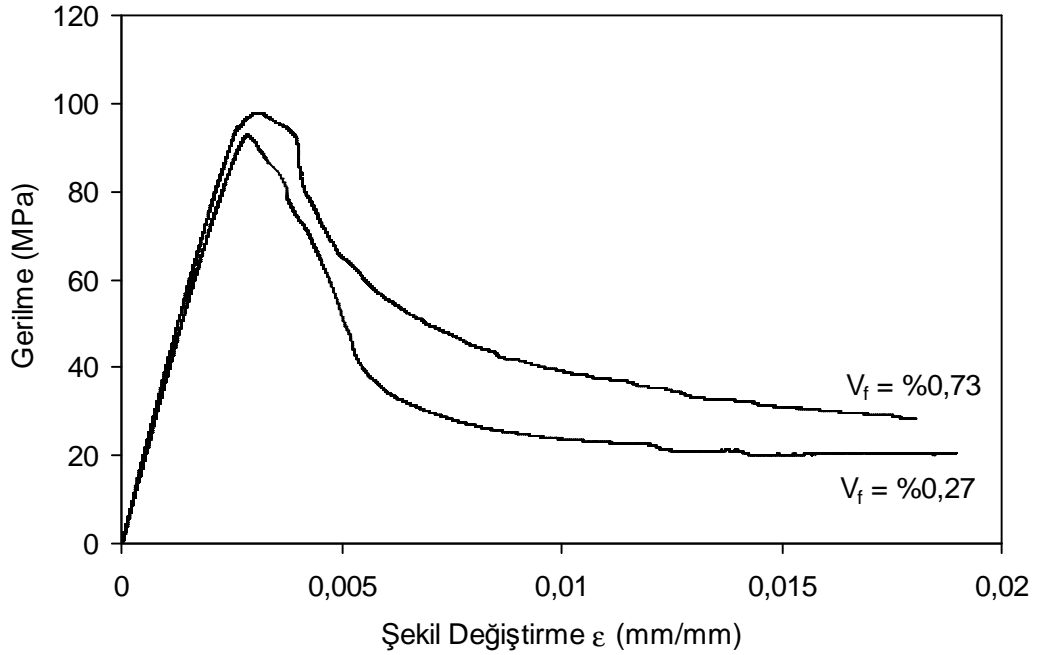


Şekil D.3 : Farklı S/Ç oranındaki karışımlarda yüksek dayanımlı çelik liflerin farklı lif hacim oranlarında karma olarak kullanılmasının küp basınç dayanımına etkisi.

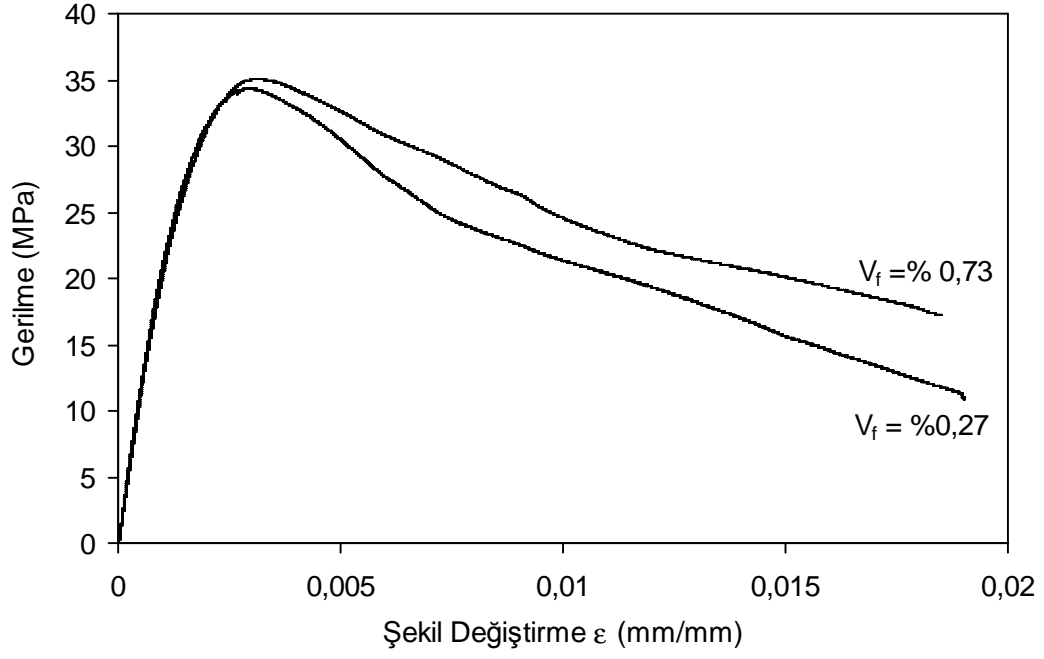
EK E : Kapalı çevrimli deplasman kontrollü basınç altında karma çelik lif donatılı silindir numunelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.



Şekil E.1 : Farklı matris dayanımındaki karışımlara aynı oranda yüksek dayanımlı karma çelik lif ($V_f = \%0,27$) eklenmesinin silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrisine etkisi.

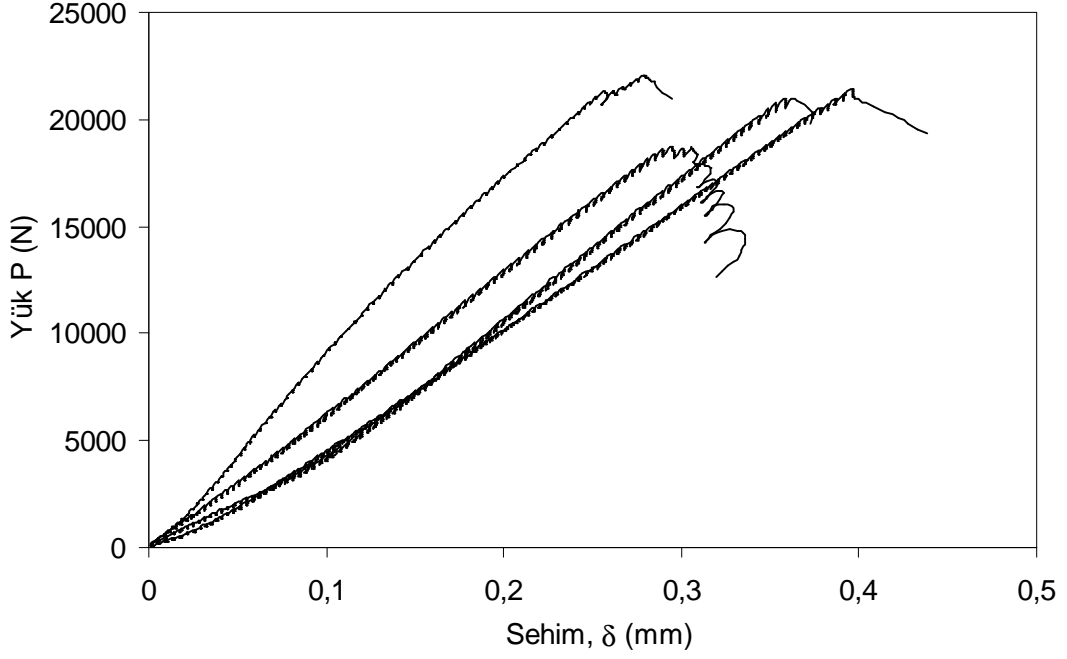


Şekil E.2: S/Ç=0,32 olan karışımlara yüksek dayanımlı karma çelik liflerin artan hacim oranlarında eklenmesinin silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrisine etkisi ($L/d=80$).

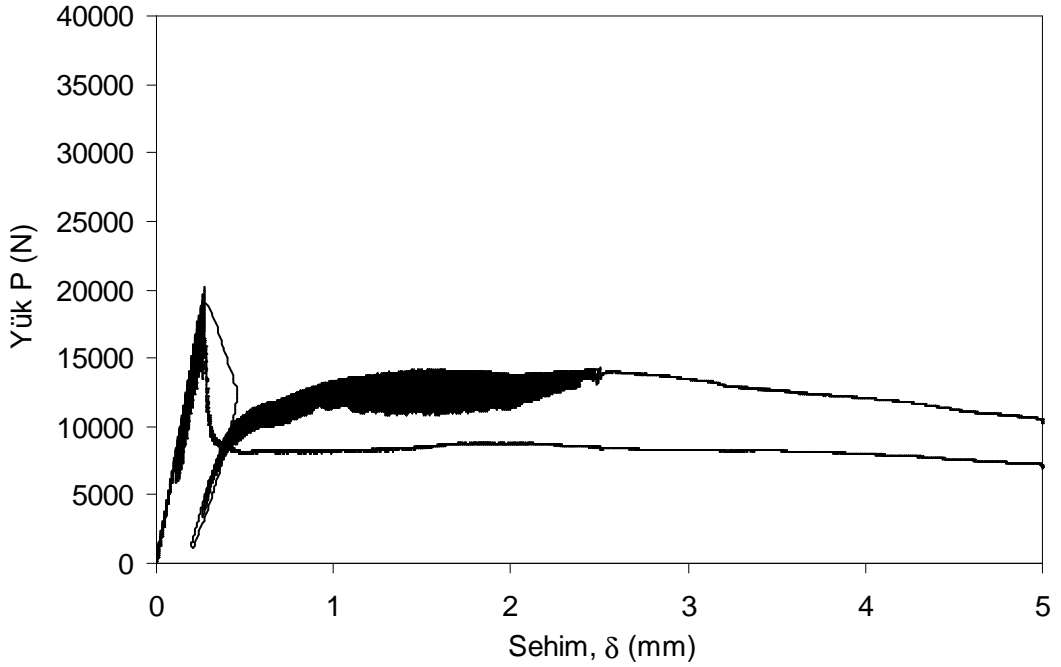


Şekil E.3 : S/Ç=0,75 olan karışımlara yüksek dayanımlı çelik liflerin karma olarak artan hacim oranlarında eklenmesinin silindir numunelerin gerilme-şekil değişirme eğrisine etkisi (L/d=80).

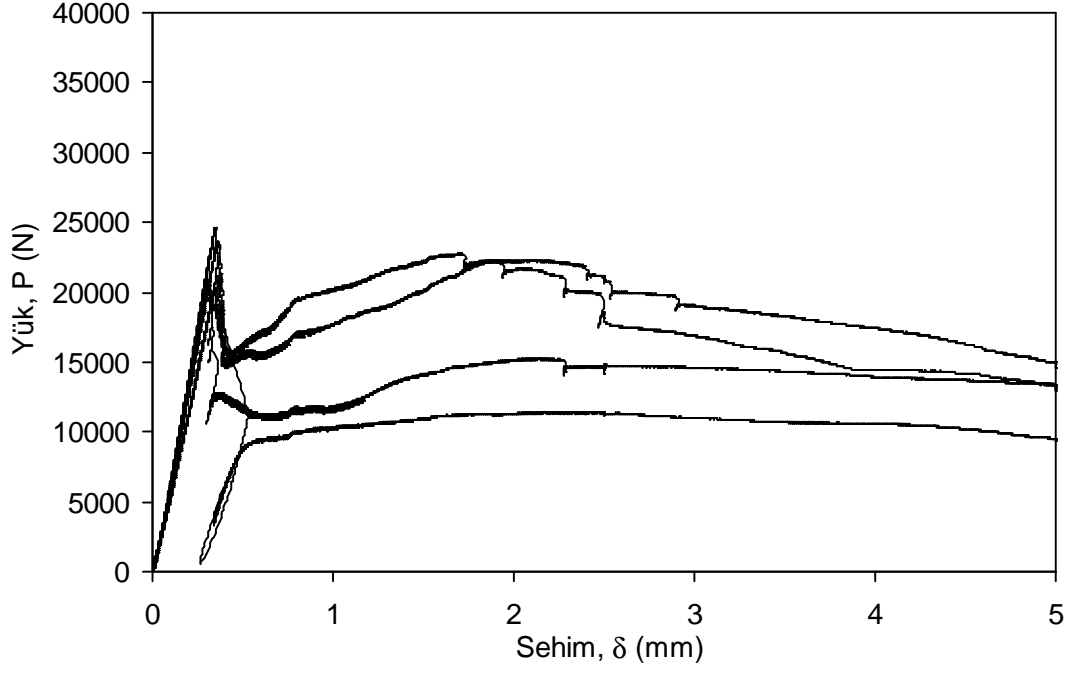
EK F : Yalın ve çelik lif donatılı kiriş numunelere ait dört noktali eğilme deneyi ile belirlenen yük-sehim eğrileri



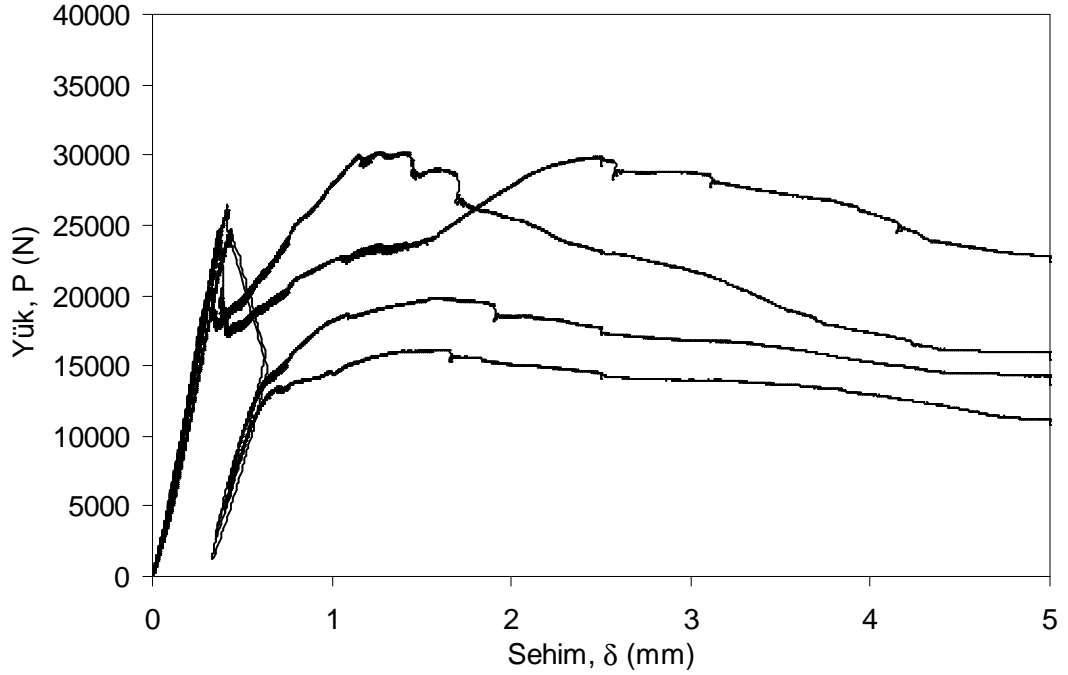
Şekil F.1 : $S/C=0,65$ olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



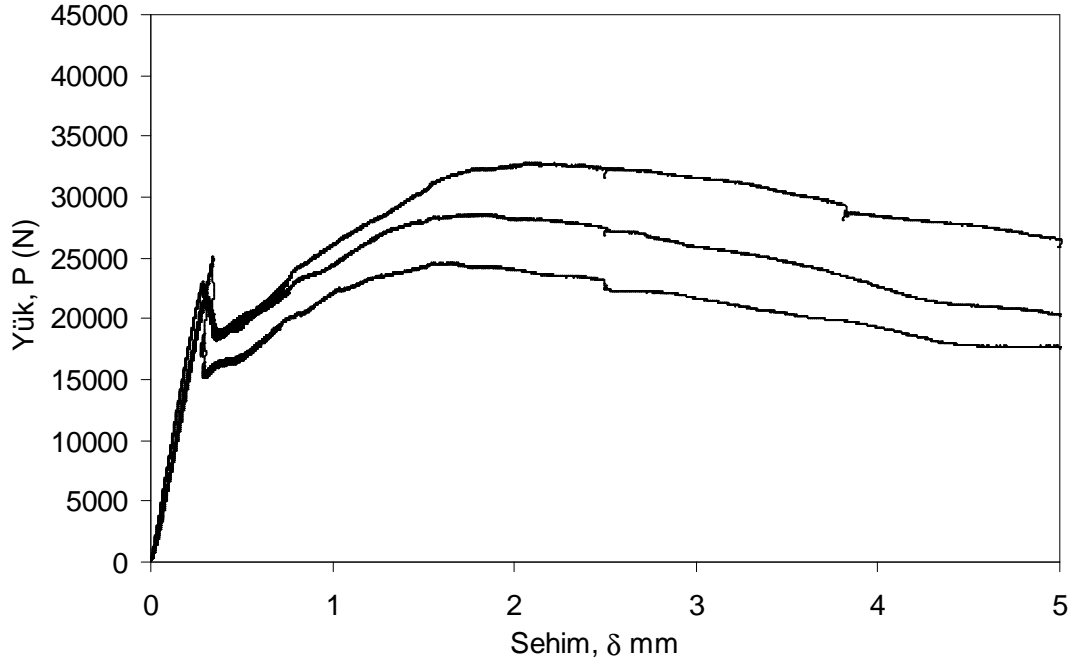
Şekil F.2 : $S/C=0,65$, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,19$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



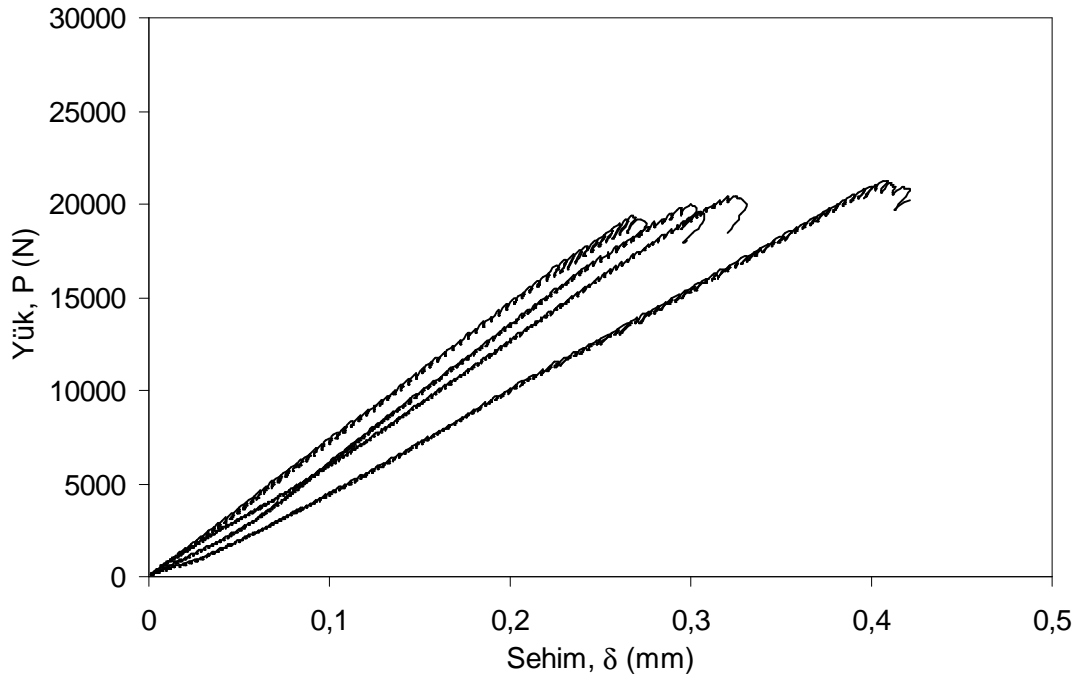
Şekil F.3 : $S/C=0,65$, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,32$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



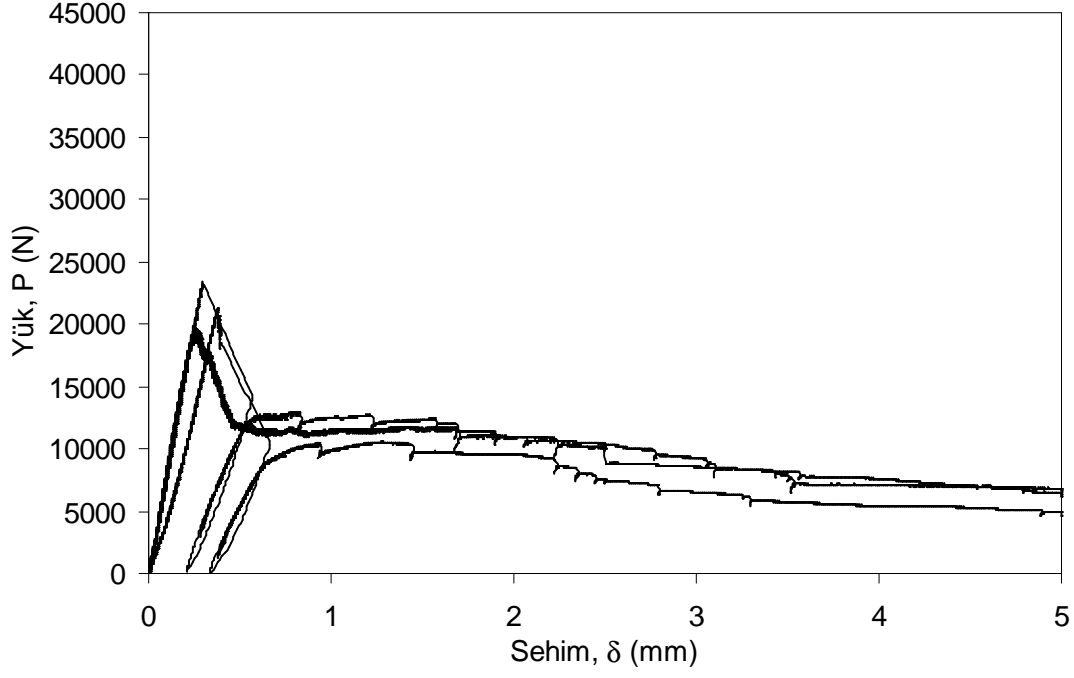
Şekil F.4 : $S/C=0,65$, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,45$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



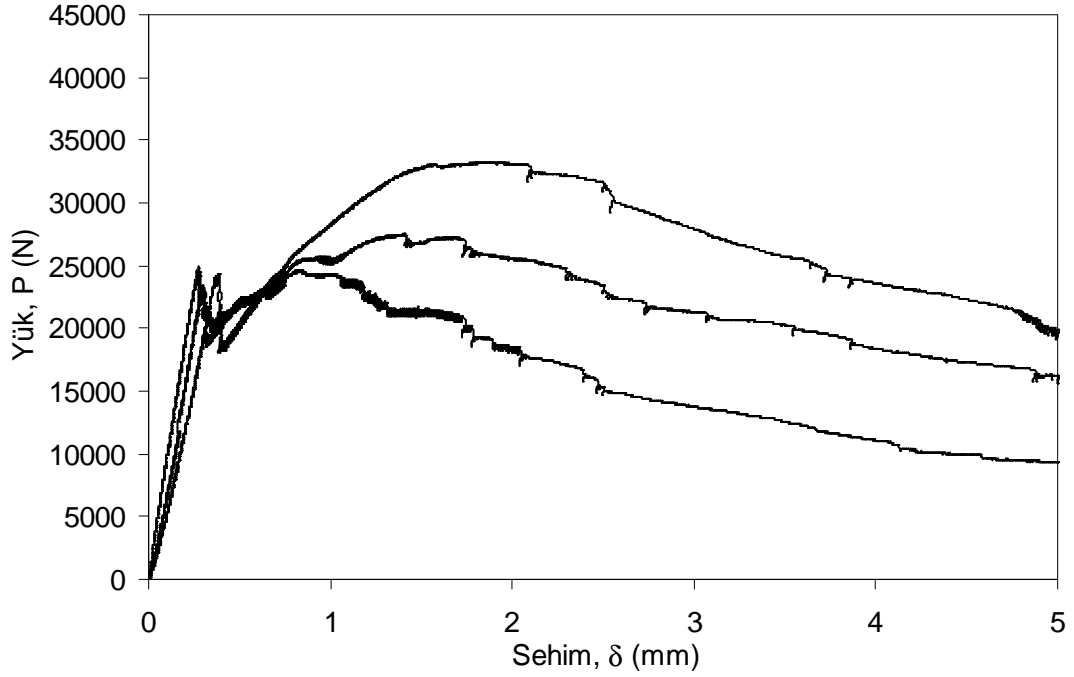
Şekil F.5 : $S/\zeta=0,65$, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,58$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



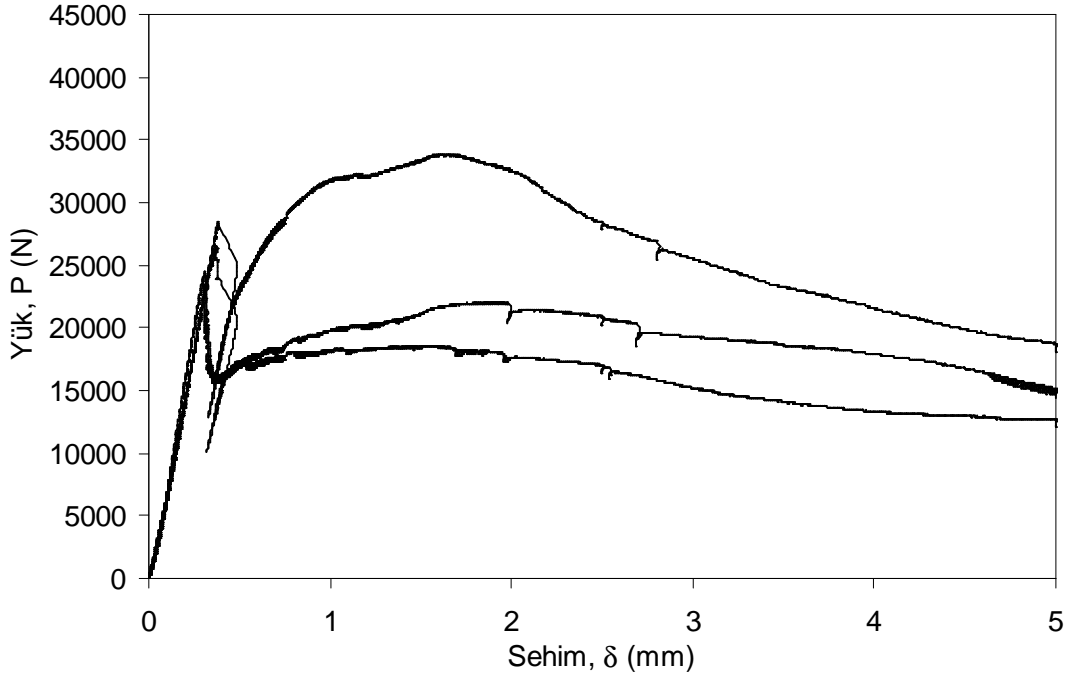
Şekil F.6 : $S/\zeta=0,45$ olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



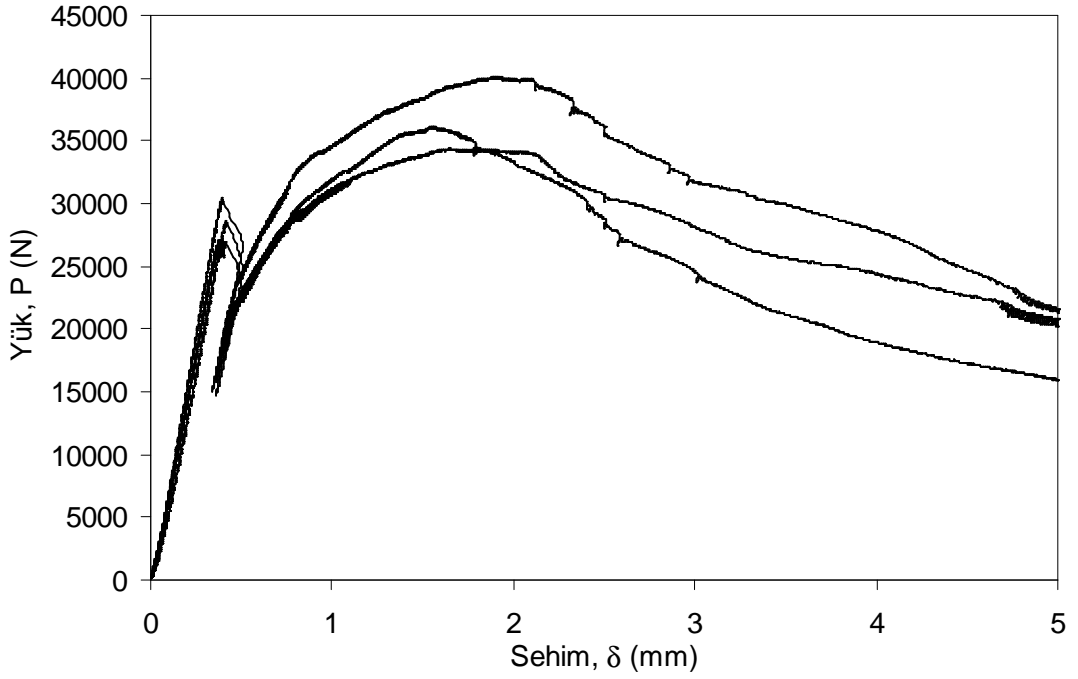
Şekil F.7 : $S/C=0,45$, normal dayanımlı ve $V_f=0,19$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



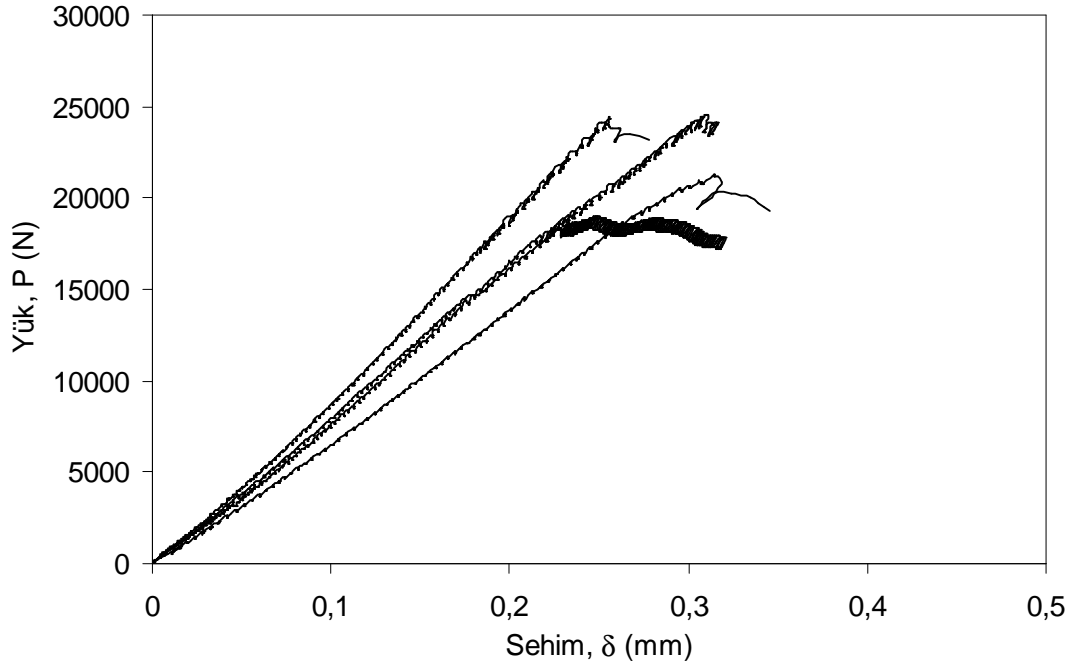
Şekil F.8: $S/C=0,45$, normal dayanımlı ve $V_f=0,32$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri



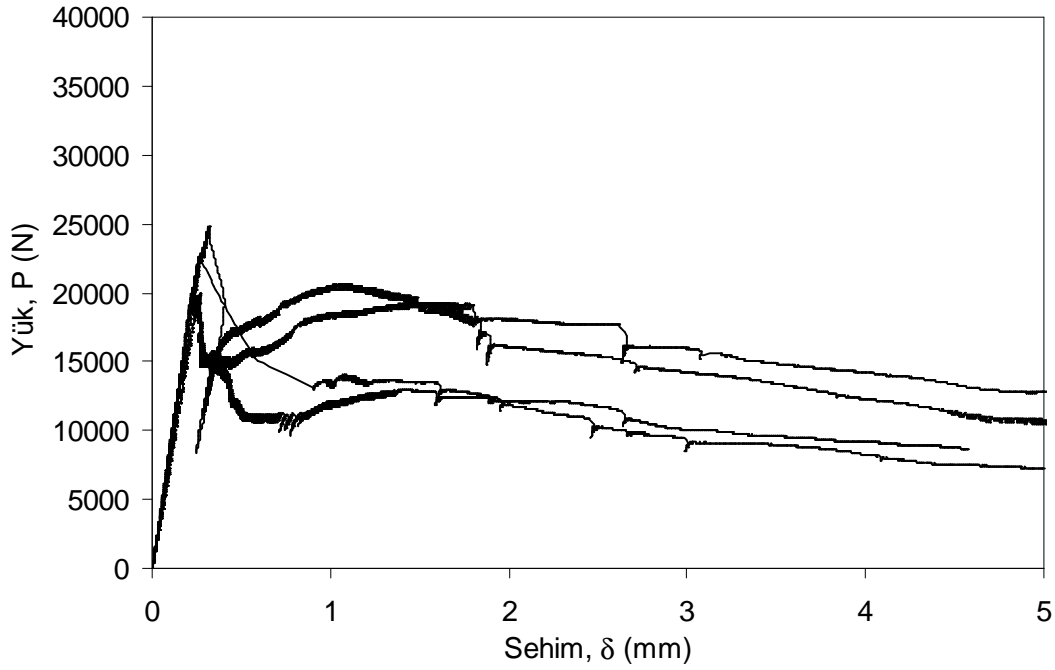
Şekil F.9 : $S/C=0,45$, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,45$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri



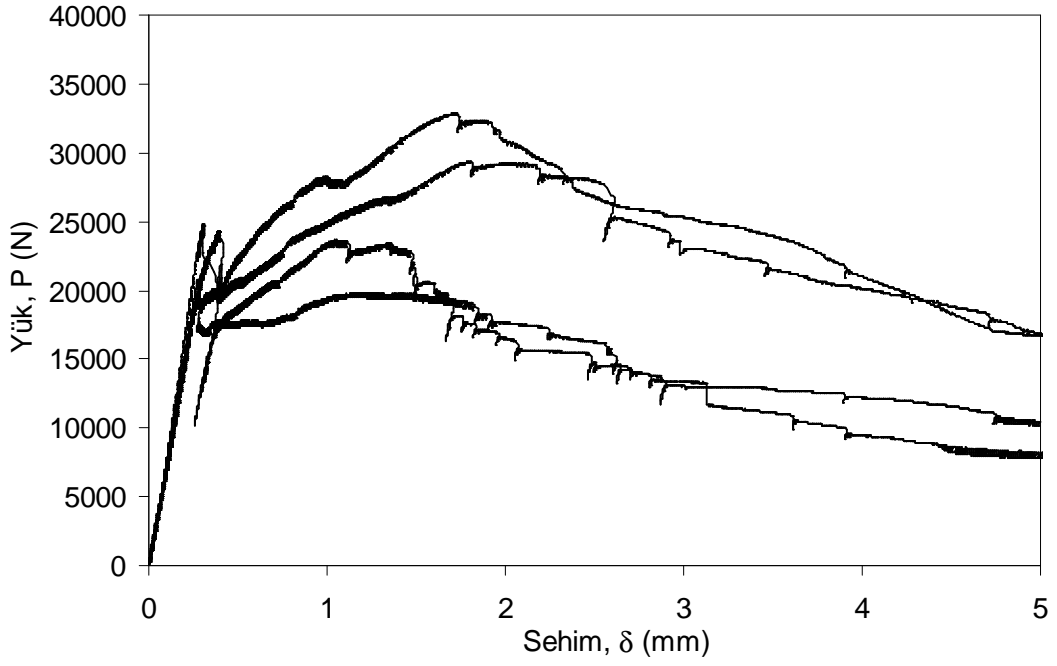
Şekil F.10 : $S/C=0,45$, normal dayanımlı ve $V_f=\%0,58$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



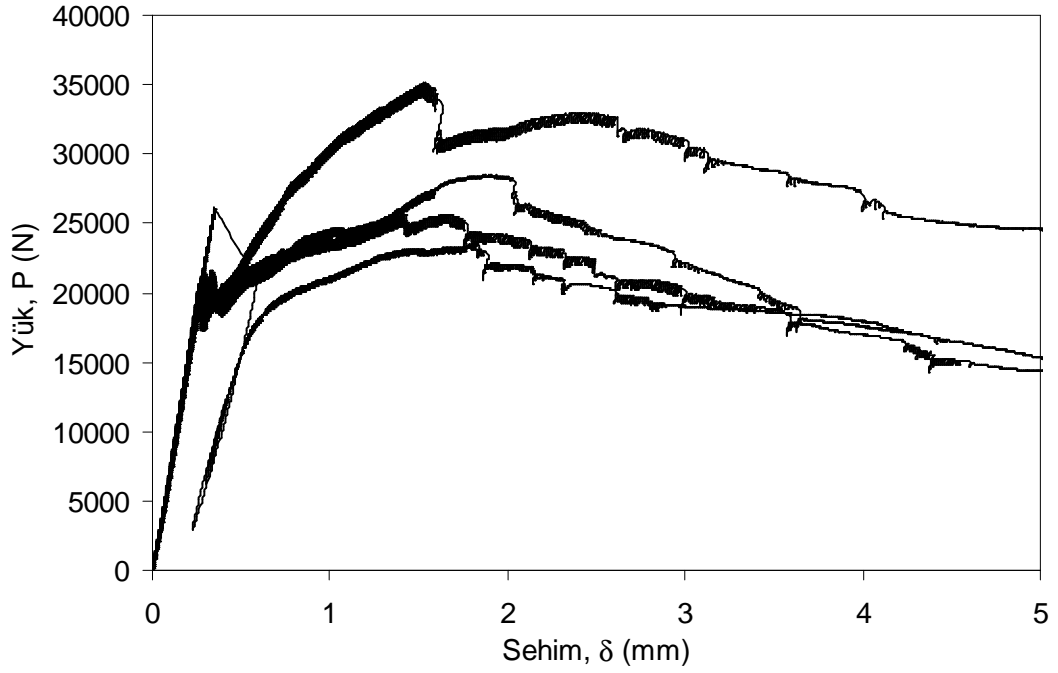
Şekil F.11 : $S/C_3=0,55$ olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



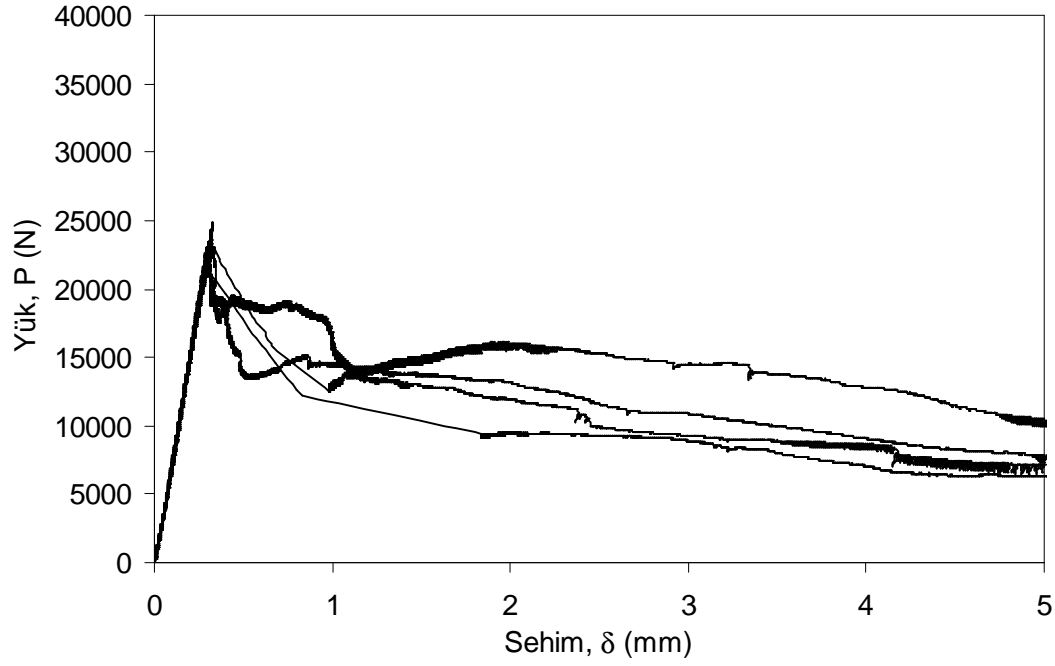
Şekil F.12 : Aynı matris dayanımında ($S/C_3=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=80$ ve $V_f=\%0,26$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



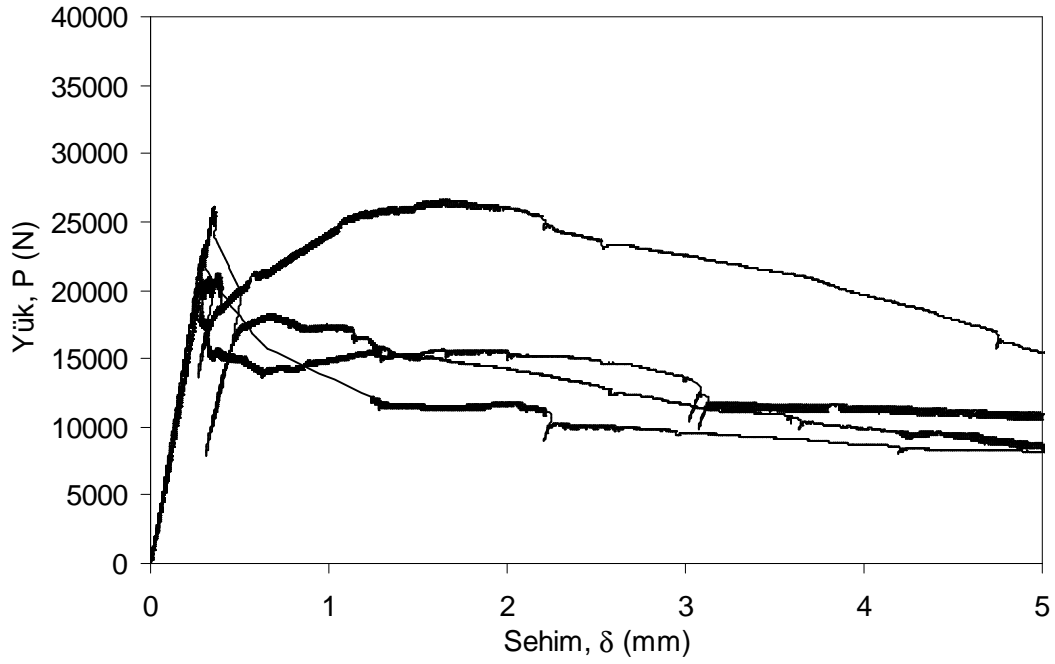
Şekil F.13 : Aynı matris dayanımında ($S/\zeta=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=80$ ve $V_f=\%0,38$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



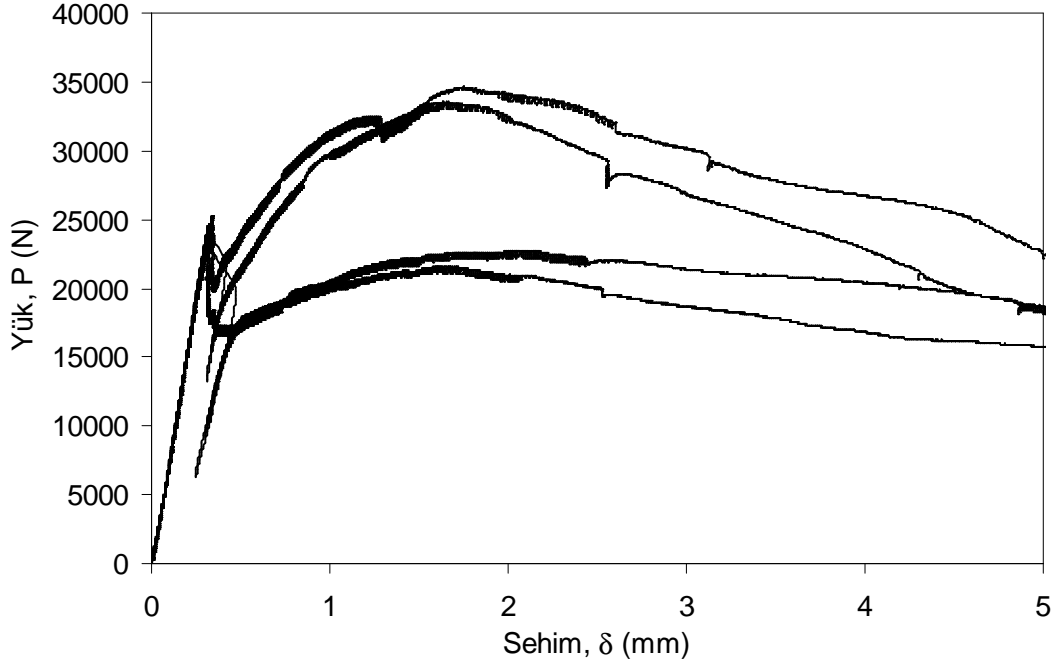
Şekil F.14 : Aynı matris dayanımında ($S/\zeta=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=80$ ve $V_f=\%0,51$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri .



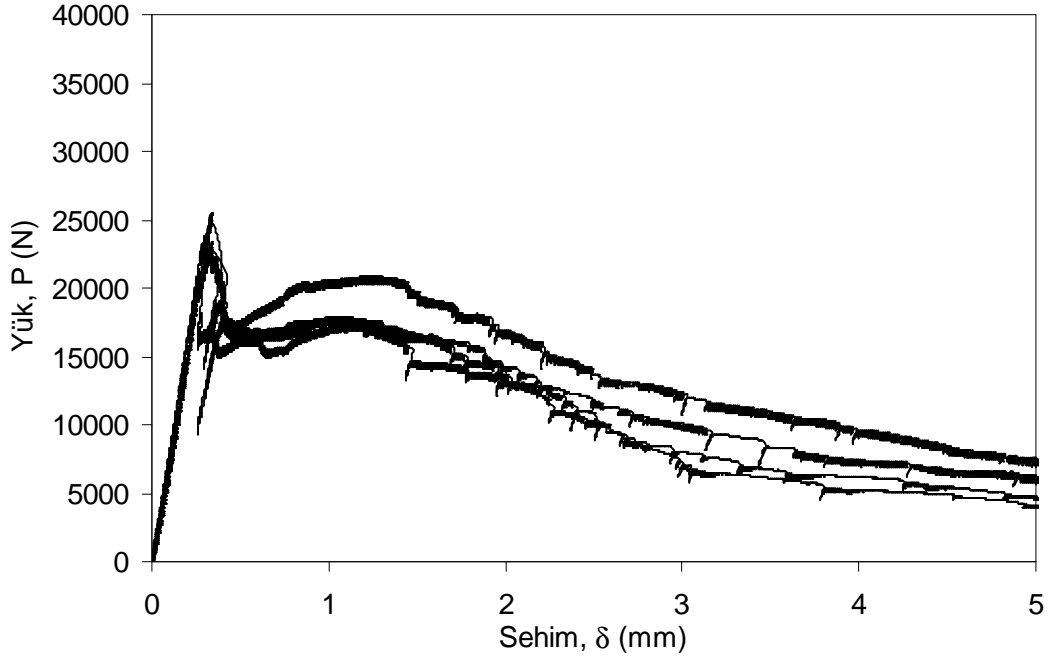
Şekil F.15 : Aynı matris dayanımında ($S/C_s=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=65$ ve $V_f=\%0,32$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



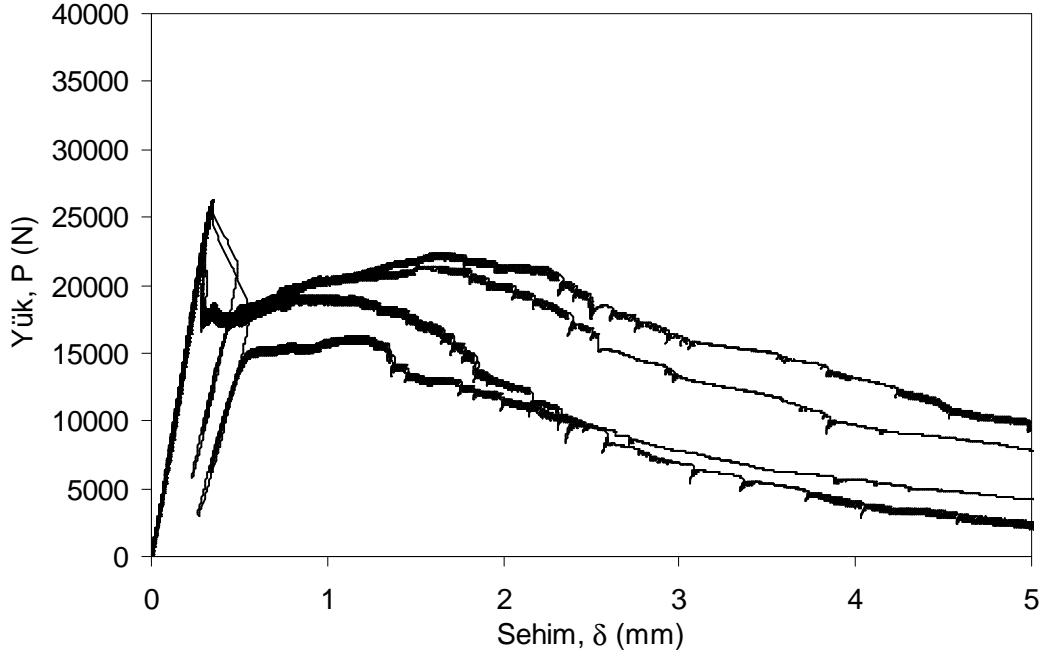
Şekil F.16 : Aynı matris dayanımında ($S/C_s=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=65$ ve $V_f=\%0,45$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



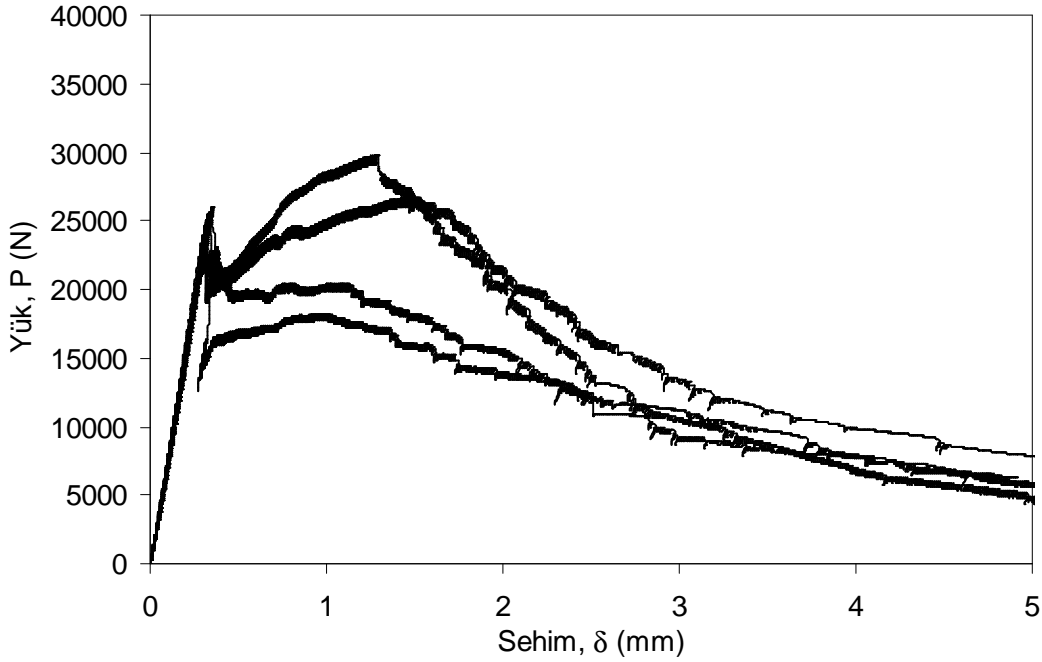
Şekil F.17 : Aynı matris dayanımında ($S/\zeta=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=65$ ve $V_f=\%0,58$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



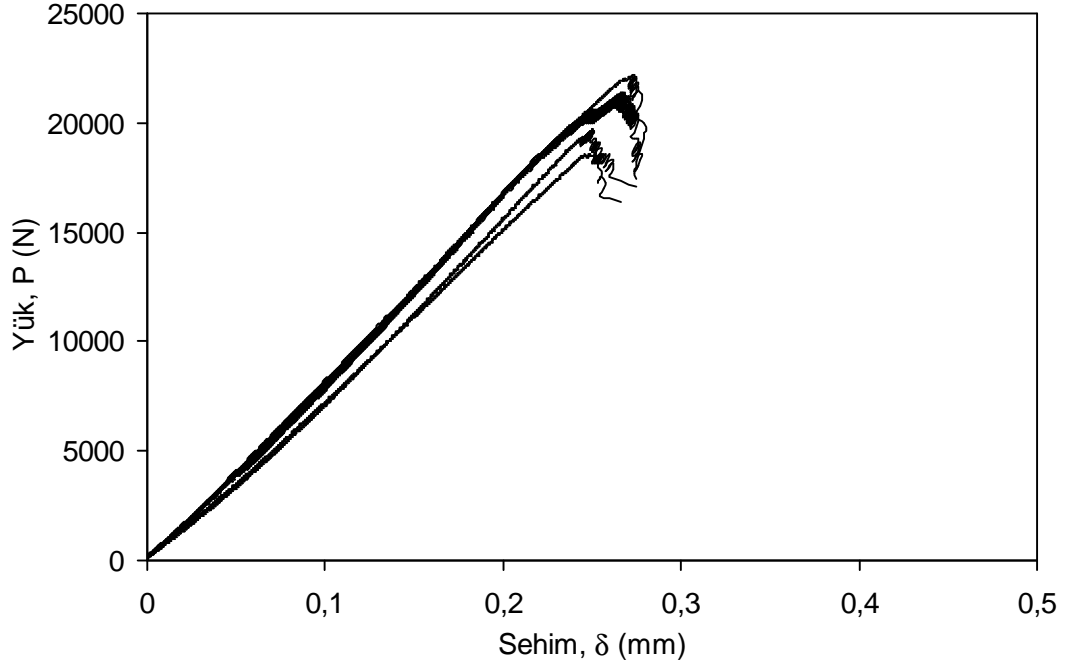
Şekil F.18 : Aynı matris dayanımında ($S/\zeta=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=55$ ve $V_f=\%0,38$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



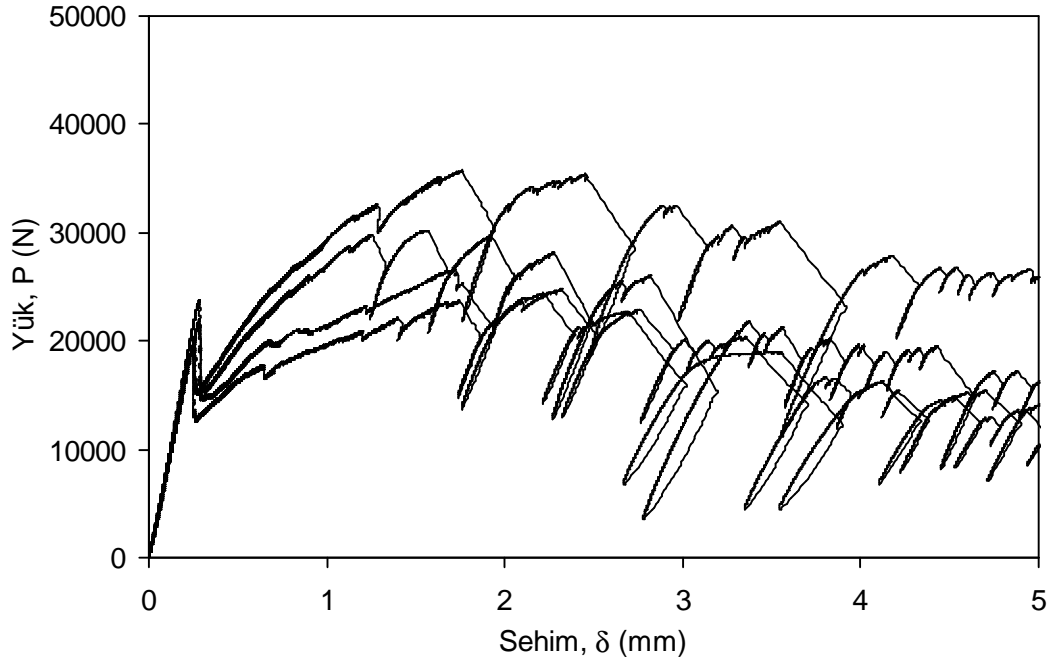
Şekil F.18 : Aynı matris dayanımında ($S/C_5=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=55$ ve $V_f=\%0,51$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



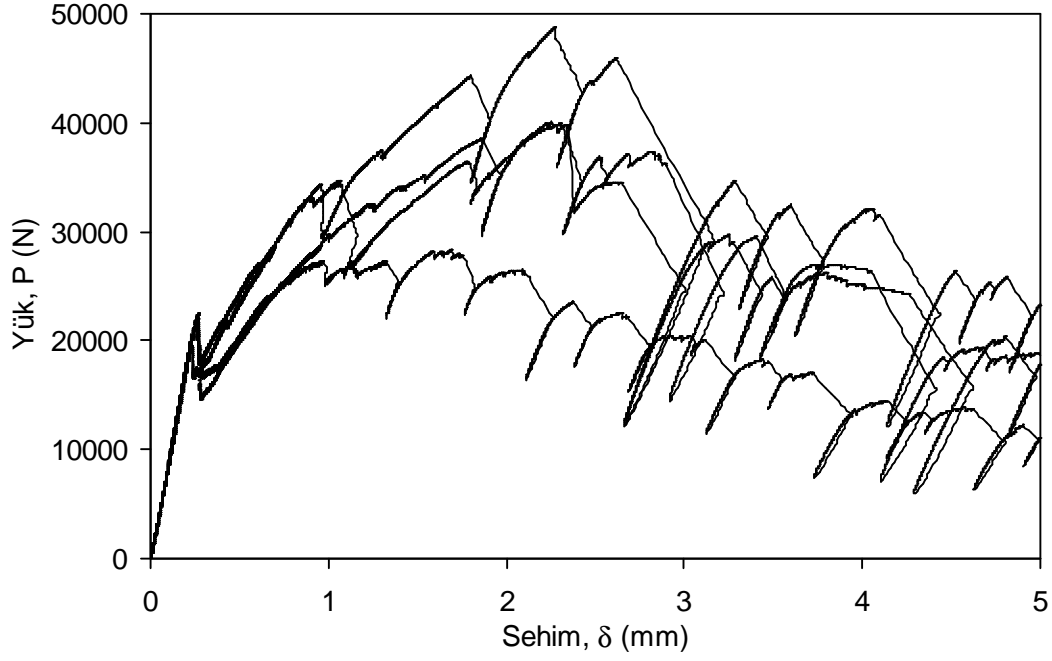
Şekil F.20 : Aynı matris dayanımında ($S/C_5=0,55$), normal dayanımlı, $L/d=55$ ve $V_f=\%0,64$ olan çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



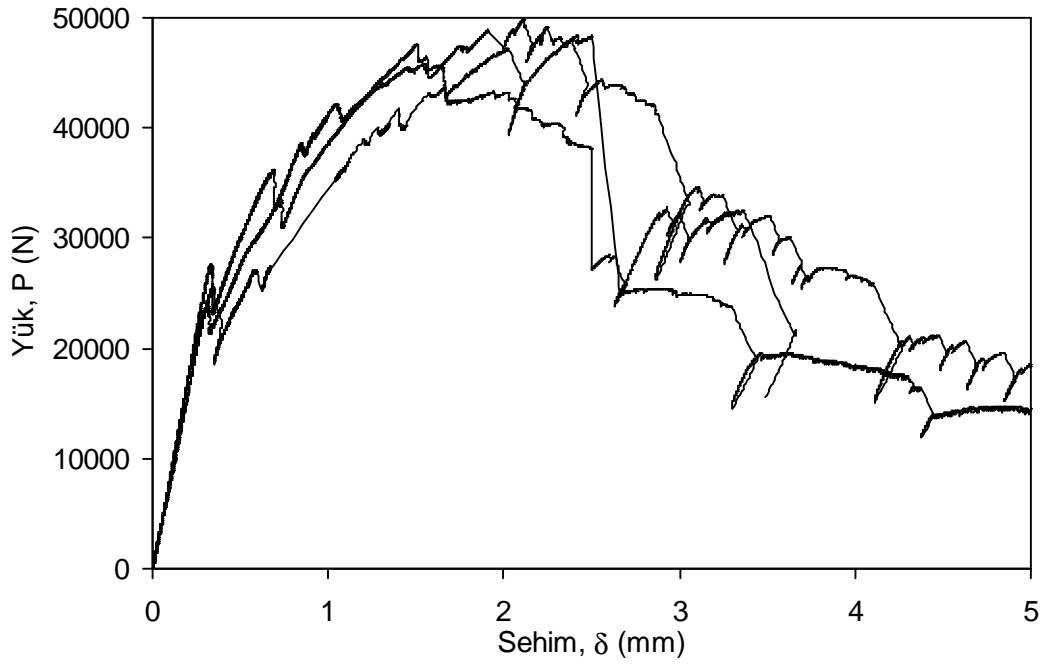
Şekil F.21 : S/C=0,32 olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



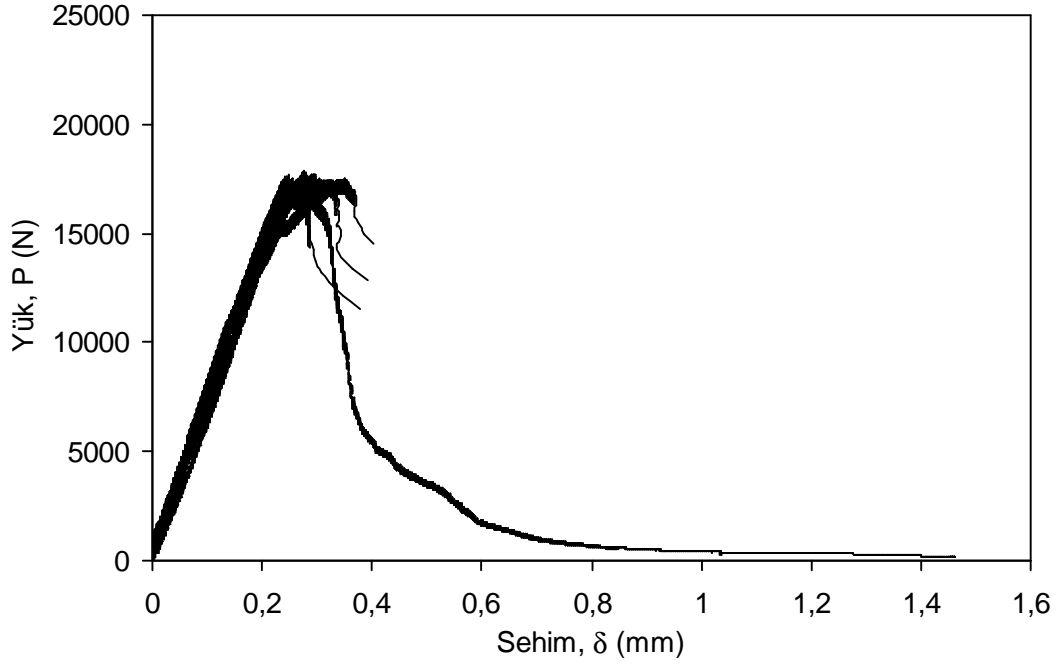
Şekil F.22 : S/C=0,32 ve V_f=%0,27 olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



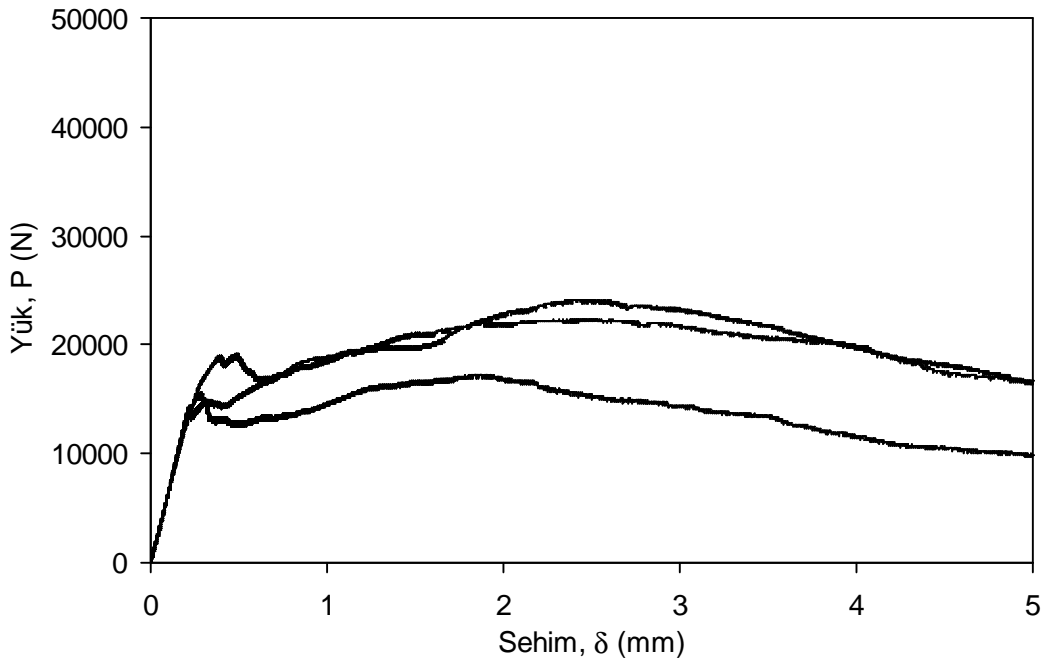
Şekil F.23 : $S/\Ç=0,32$ ve $V_f=\%0,50$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



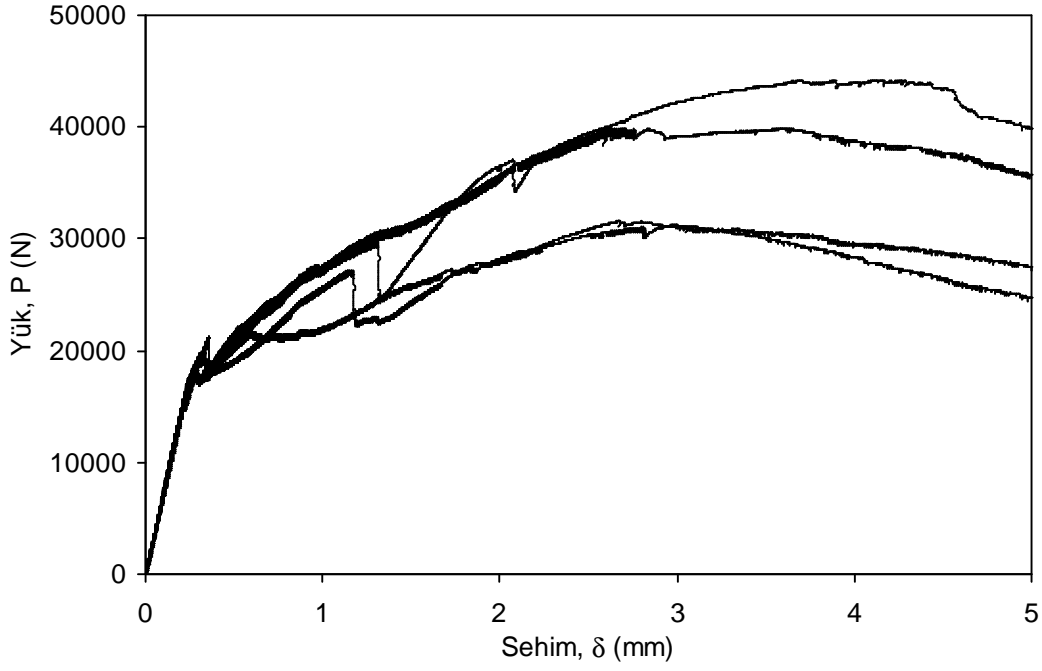
Şekil F.24 : $S/\Ç=0,32$ ve $V_f=\%0,73$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



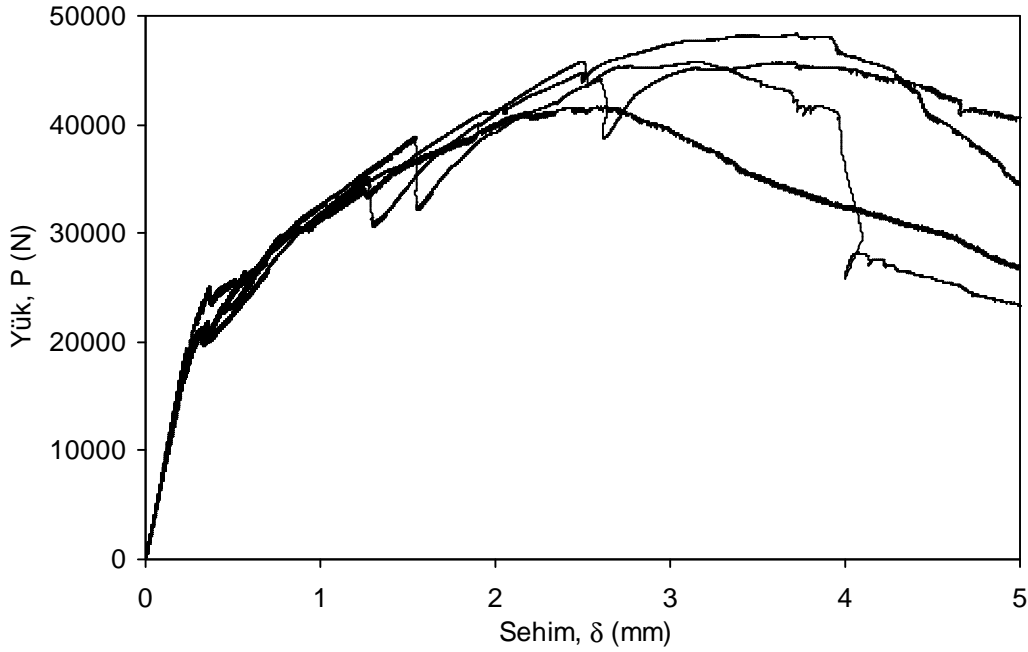
Şekil F.25 : $S/C=0,44$ olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



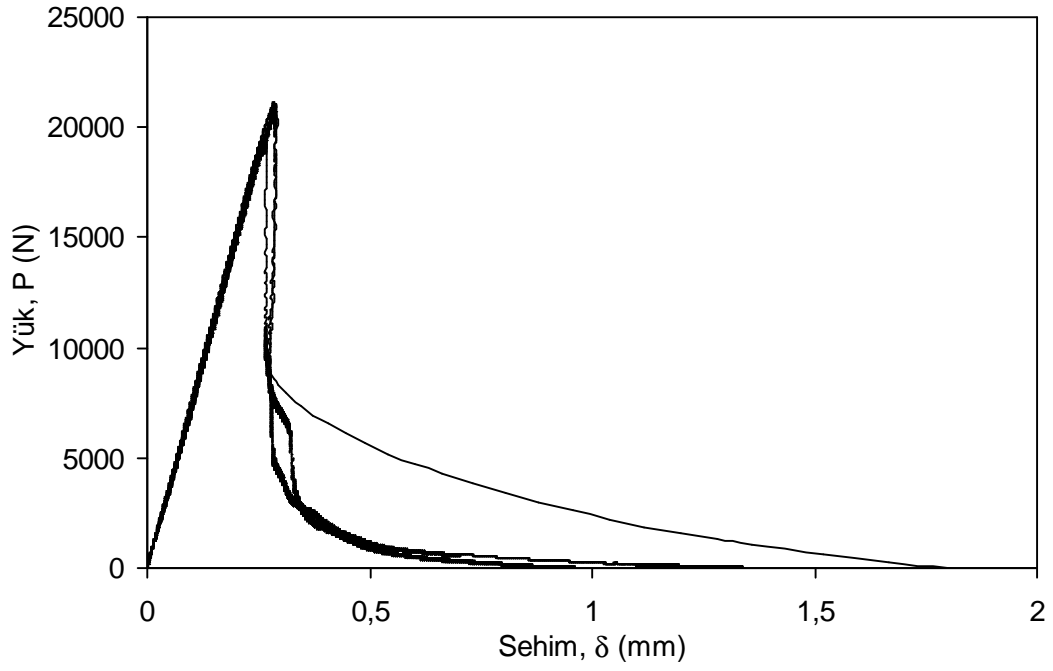
Şekil F.26 : $S/C=0,44$ ve $V_f = \%0,27$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



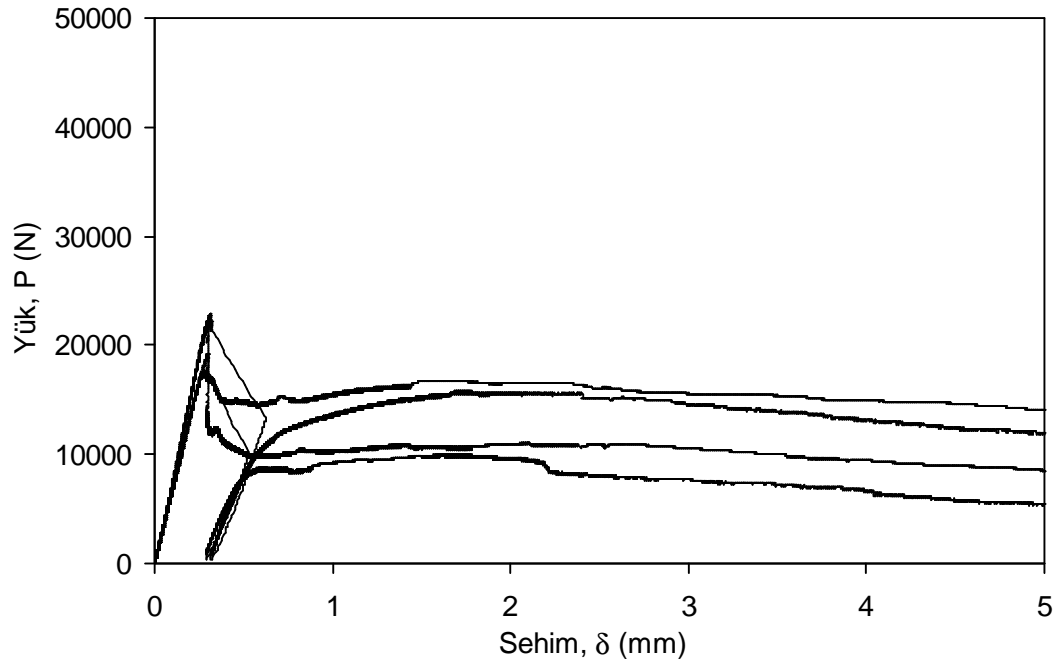
Şekil F.27 : $S/\bar{C}=0,44$ ve $V_f=\%0,50$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



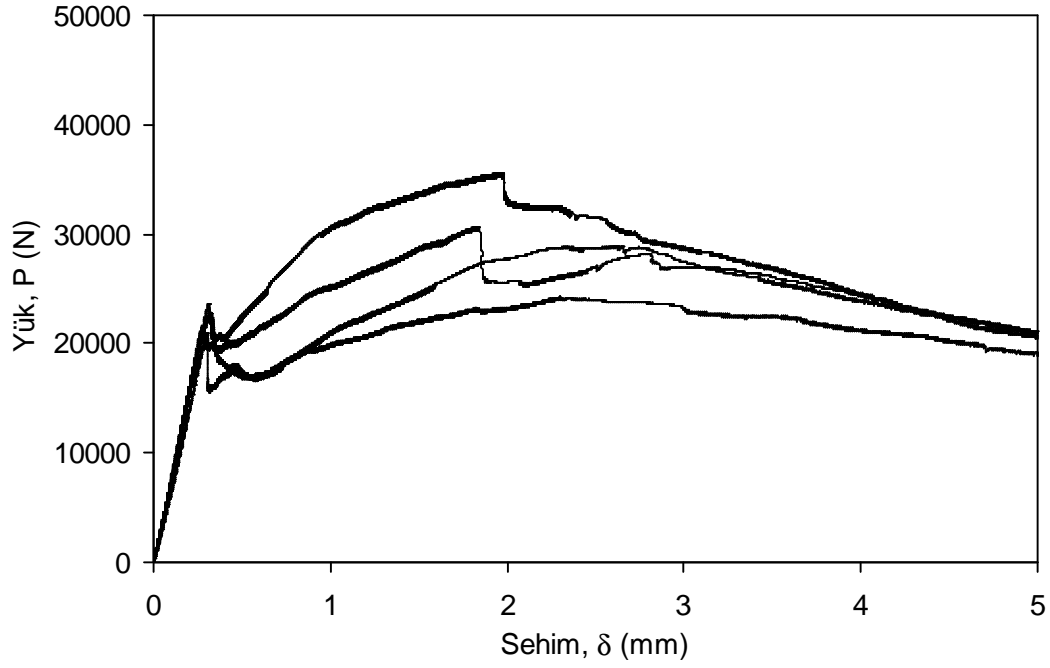
Şekil F.28 : $S/\bar{C}=0,44$ ve $V_f=\%0,73$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



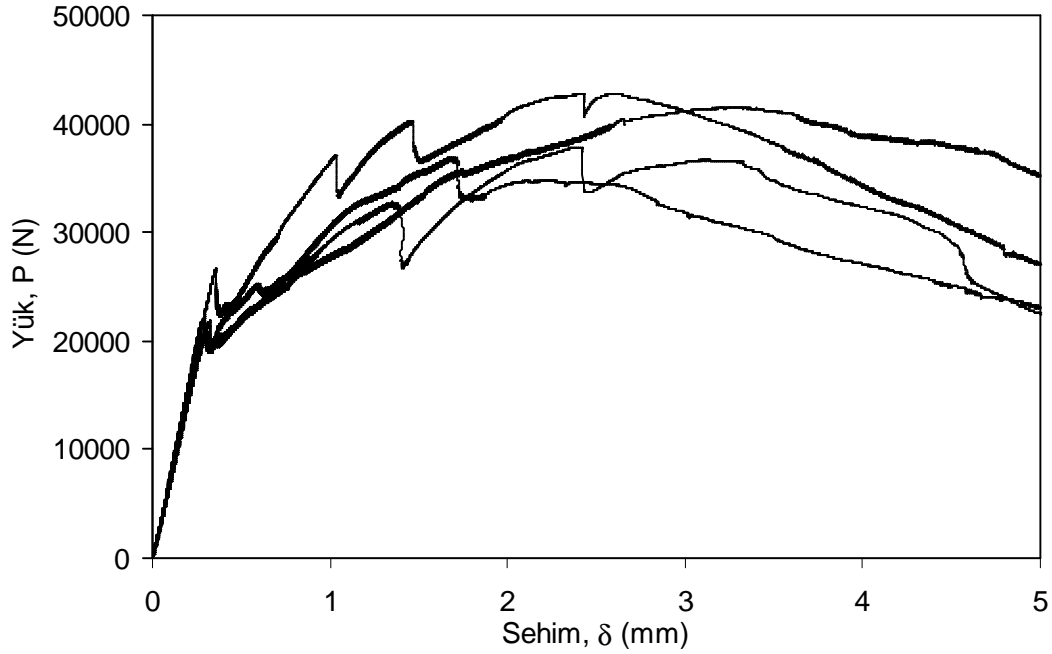
Şekil F.29 : $S/C=0,75$ olan yalın kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.



Şekil F.30 : $S/C=0,75$ ve $V_f=\%0,27$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.

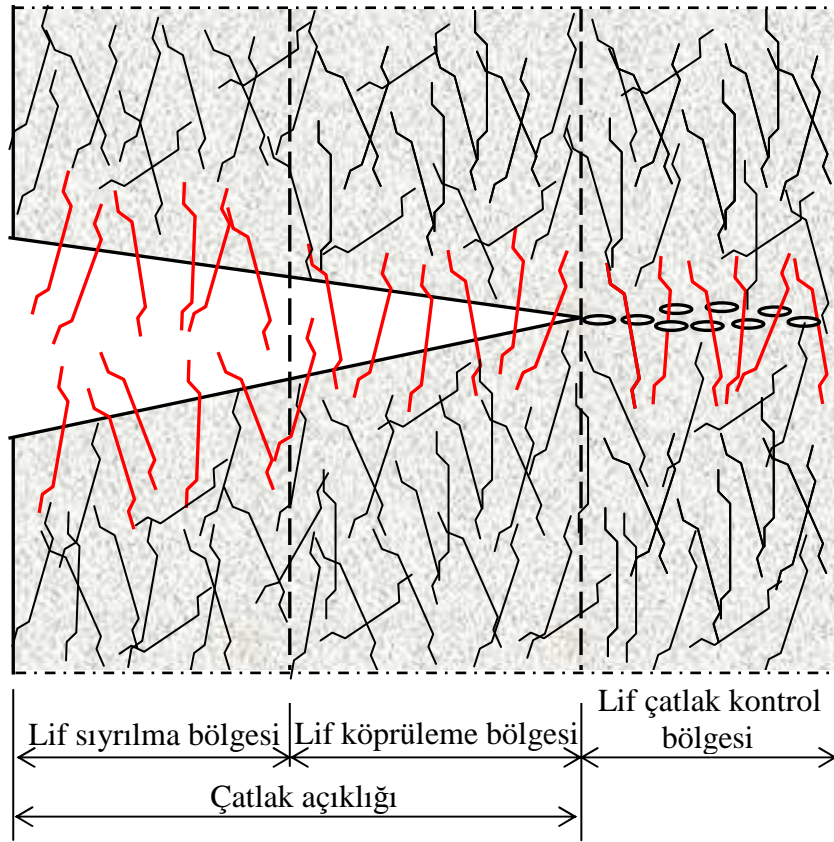


Şekil F.31 : $S/\Ç=0,75$ ve $V_f=\%0,50$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.

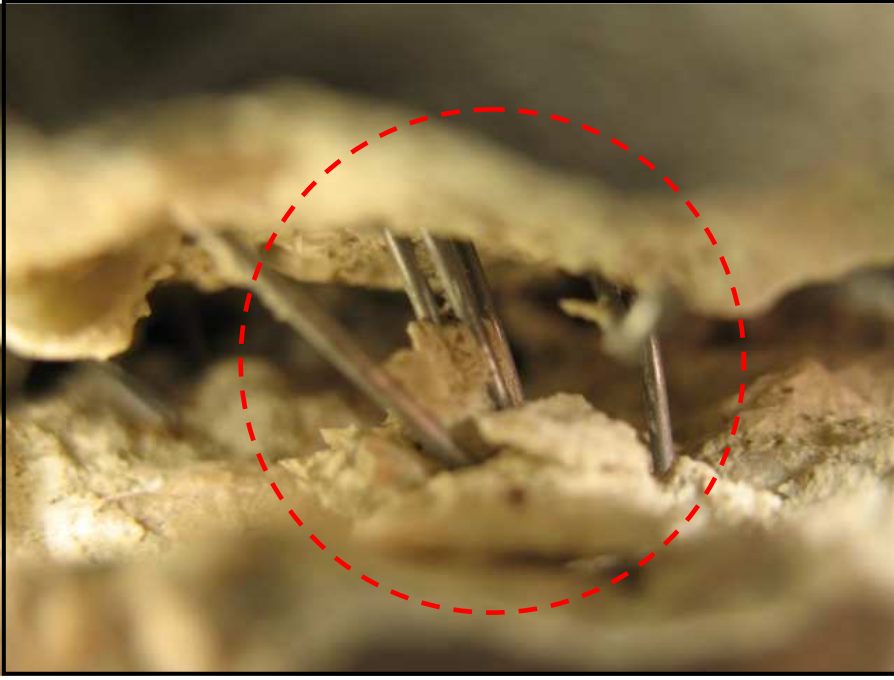


Şekil F.32 : $S/\Ç=0,75$ ve $V_f=\%0,73$ olan yüksek dayanımlı karma çelik lifli kiriş numunelere ait yük-sehim eğrileri.

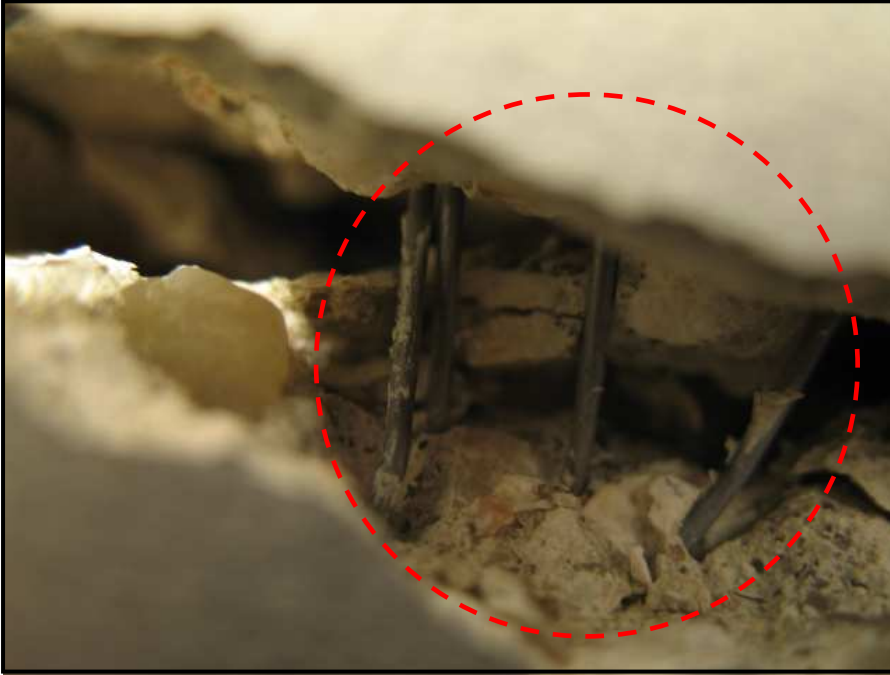
EK G: ÇLDB'lerde liflerin çatlak kontrol, köprüleme ve sıyırılma bölgeleri.



Şekil G.1 : ÇLDB'lerde liflerin çatlak kontrol ve köprüleme etkisinin şematik gösterimi.

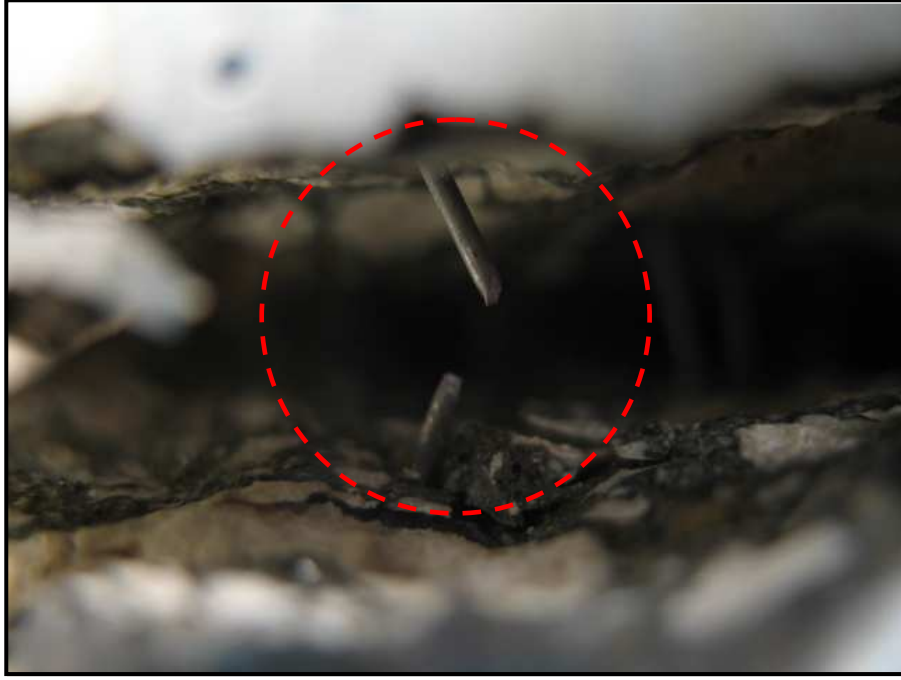


(a)



(b)

Şekil G.2 : ÇLDB'lerde liflerin çatlak kontrol ve köprüleme etkisi.

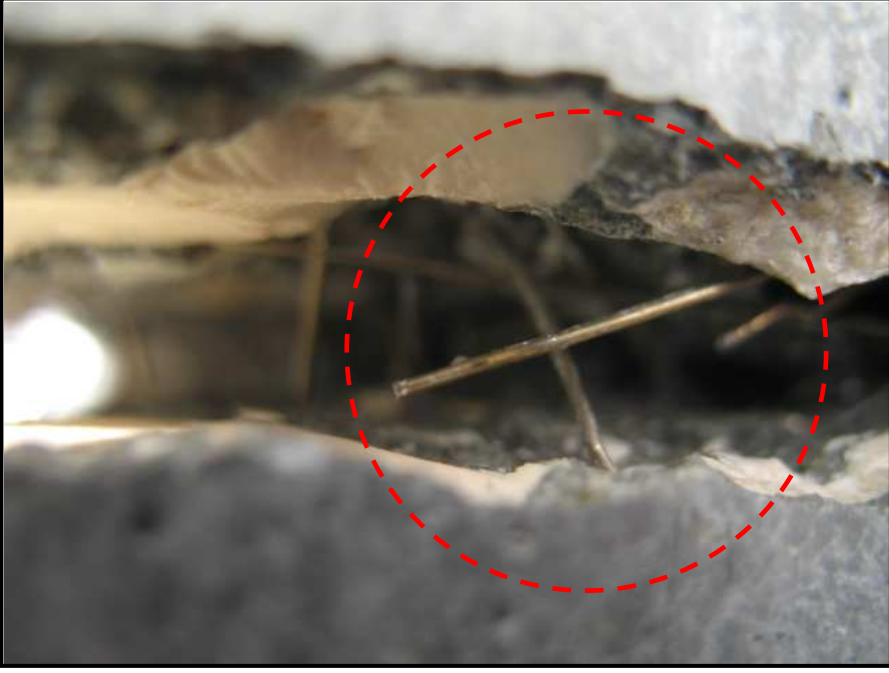


(a)

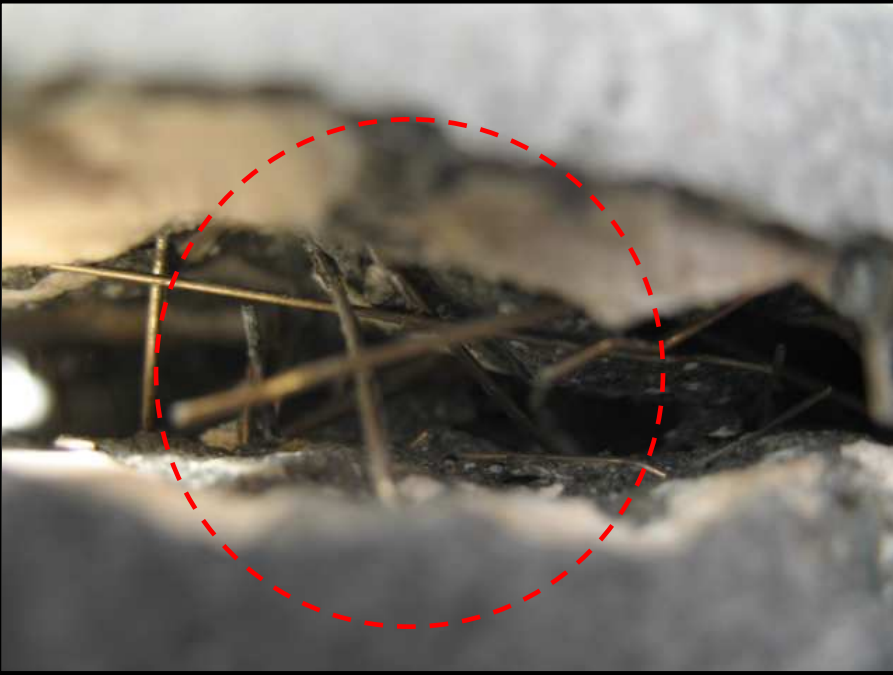


(b)

Şekil G.3 : Yüksek matris dayanımlı ÇLDB'lerde lif kopması.



(a)



(b)

Şekil G.4 : Düşük matris dayanımlı karma lifli ÇLDB'lerde lif sıyrılması.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Muhsin Yalçın

Doğum Yeri ve Tarihi: Balıkesir, 27.08.1973

Adres: Anadolu Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.

Lisans: Osmangazi Üniversitesi

Yüksek Lisans: Anadolu Üniversitesi

Yayın Listesi:

- Tuncan, M., Karasu, B. and **Yalçın, M.**, 2001: The Suitability For Using Glass And Fly Ash In Portland Cement Concrete, *The 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE*, 4, 146-152, June 17-22, Stavanger, Norway.
- **Yalçın, M.**, Güney, Y., Koyuncu, H., Baş, Ö. F., 2003: Atık Döküm Kumunun Betonda Kullanılabilirliği, *5. Ulusal Beton Kongresi*, 1-3 Ekim, 515-522, İstanbul.
- Tuncan, M., Karasu, B. **Yalçın M.** and Tuncan A., 2004: The Effects Of Filler Glasses On Mechanical Properties Of Concrete, *Proceedings Of the 8th Conference and Exhibition of the European Ceramic Society, 8th ECERS*, 29 June-3 July, 3, 2169-2172, İstanbul, Turkey.
- **Yalçın, M.**, Sengül C., Tasdemir C., Gökalp İ., Yüceer Z. and Ekim H., 2007: Performance Based Design Of Steel Fiber Reinforced Concrete, *TÇMB 3rd International Symposium: Sustainability in Cement and Concrete*, May 21-23, 2, 931-940, İstanbul, Turkey.
- **Yalçın M.**, Taşdemir C., Gökalp İ., Ekim H., Yerlikaya M., 2007: Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanılabilirlik ve Taşıma Gücü Sınır Durumlarına Göre Tasarımı, *7. Ulusal Beton Kongresi*, 28-30 Kasım, 353-362, İstanbul.
- **Yalçın, M.**, Tasdemir, C., Tasdemir, M. A., Gokalp, I. and Yerlikaya, M., 2008: Performance Based Design of SFRC for Serviceability And Ultimate Limit States, *Seventh RILEM International Symposium (BEFIB 2008) On Fibre Reinforced Concrete: Design And Applications*, 17-19 September, 419-428, Chennai, İndia.

