

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STATİK VE DARBE YÜKLERİ ALTINDA LİFLİ
BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Cengiz KIZILIRMAK

Kasım, 2017

İZMİR

STATİK VE DARBE YÜKLERİ ALTINDA LİFLİ BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı

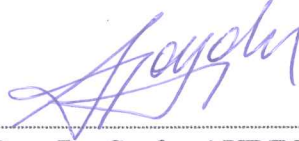
Cengiz KIZILIRMAK

Kasım, 2017

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

CENGİZ KIZILIRMAK, tarafından DOÇ. DR. SERDAR AYDIN yönetiminde hazırlanan “STATİK VE DARBE YÜKLERİ ALTINDA LİFLİ BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



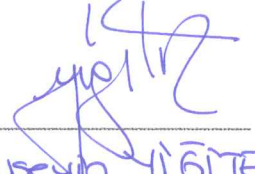
Doç. Dr. Serdar AYDIN

Yönetici



Doç. Dr. Tahir Kemal ERDEM

Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Hüseyin YİĞİTER

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisansa başlamama vesile olup bilime açılan kapıdan geçmemi sağlayan, sonrasında danışmanlığımı da yaparak, özveri ve hoşgörüsüyle her koşulda desteğini esirgemeyen, tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Serdar AYDIN'a,

Deneysel çalışmanın yapılması ve analiz konularında değerli yardımlarından dolayı Sn. Yrd. Doç. Dr. Mert Yücel YARDIMCI'ya ve deney örneklerinin hazırlanması aşamasındaki katkılarından dolayı Sn. Doç. Dr. Kerim KÜÇÜK'e,

Yapı Malzemesi Anabilim Dalında görevli olan gerek derslerde gerekse deneysel çalışmada yardımcı olan değerli hocalarıma,

Teorik veya uygulamada fikir alışverişi yaptığımız yüksek lisanstaki değerli dönem arkadaşlarıma,

Deneysel çalışmada yardımı dokunan İnşaat Mühendisleri Faruk ŞENGÜN, Cem ŞAHİNBAY, Mehmet GÖK, Kamil Oğuz KISA ve Hamdin DEMİR'e,

Mühendislik Fakültesinin doğrudan veya dolaylı olarak yardımı dokunan tüm teknik ve idari personeline,

Ham madde tedarik sürecinde yardımcı olan Dere Group adına Raif EVLEK ve Çimentoş Group adına Burak AKYOL'a

Yüksek lisans eğitimim boyunca çalıştığım iş yerlerinde kolaylıklar sağlayan değerli yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma,

Sonsuz teşekkürlerimi borç bilir şükranlarımı sunarım.

Bu tezi her zaman destekçim olan aileme ithaf ediyorum.

Cengiz KIZILIRMAK

STATİK VE DARBE YÜKLERİ ALTINDA LİFLİ BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Bu tez kapsamında, çelik lif hacminin, uzunluğunun, görünüm oranının ve uç geometrisinin çelik lifli betonların mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. İki farklı hacimde, iki farklı uzunlukta, dört farklı görünüm oranında ve üç farklı uç geometrisinde uçları kancalı çelik lifler normal ve yüksek dayanımlı betonların üretiminde kullanılmıştır. Çelik lifli betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yük-sehim eğrileri ve kırılma enerjileri belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek dayanımlı beton serisinde kiriş örnekler üzerinde ağırlık düşürmeli darbe deneyleri yapılmıştır. Darbe yükleri basit mesnetli çentikli kiriş örneği üzerine ağırlık düşürerek yapılmıştır.

Çelik lifli betonların eğilme dayanımı ve kırılma enerjisinin, kullanılan lifin hacmi, uzunluğu, çekme dayanımı ve kanca sayısındaki artışla geliştiği görülmüştür. Lif uç geometrisinin eğilme dayanımına ve kırılma enerjisine etkisi görünüm oranı yüksek liflerde daha belirgin olmuştur. Görünüm oranı 65 olan 5D türü lifler betonun eğilme dayanımı ve kırılma enerjisinde 3D liflere göre önemli bir artış sağlarken, 4D lifler bu özelliklerde gelişme sağlamamıştır. Lif görünüm oranının eğilme dayanımına etkisi 4D liflerde 3D liflere kıyasla çok daha belirgin olmuştur. Görünüm oranı yüksek veya kısa boylu lifli serilerin kırılma enerjileri beton dayanımından fazla etkilenmemiştir. Darbe yükleri altında statik yüklemeye göre eğilme dayanımı ve kırılma enerjileri artmış olup, darbe yükleri altında en iyi performans, görünüm oranı 80 olan 4D ve görünüm oranı 65 olan 5D lifleri içeren betonlardan elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik lifli beton, darbe, çelik lif, lif tipi, mekanik özellikler

AN INVESTIGATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF FIBRE REINFORCED CONCRETE UNDER STATIC AND IMPACT LOADS

ABSTRACT

The effects of steel fibre volume, length, aspect ratio and the geometry of the fibre end (the number of hooks at the end of the fibre) on the mechanical properties of steel fibre reinforced concretes have been investigated within the scope of this thesis. Hooked-end steel fibres with, two different lengths, four different aspect ratios and three different end geometries have been incorporated to normal and high strength concretes mixtures in two different volume fractions. Compressive strength, load–deflection curve, first-crack strength, flexural strength and fracture energy of steel fibre reinforced concretes have been determined. Drop-weight impact tests on high-strength concrete beam samples have also been performed. Impact load has been generated by a free-fall of a hammer onto the simply supported notched beams.

Test results showed that flexural strength and fracture energy of the steel fibre reinforced concrete improved with increasing fibre volume, length, tensile strength and number of hooks. The effect of fibre end geometry on flexural strength and fracture energy was more pronounced for mixtures having high aspect ratio. By using 5D type steel fibres with aspect ratio of 65, significantly higher flexural strength and fracture energy values have been obtained compared to 3D fibres, while 4D fibres did not improve these properties. The effect of fibre aspect ratio on flexural strength was more marked in 4D fibres than 3D fibres. The fracture energy of concrete mixtures reinforced with high aspect ratio or short fibres have not been influenced by an increase in concrete strength. Higher flexural strength and fracture energy values have been obtained under impact loading as compared to static loading. The best performance under impact loading has been obtained from steel fibre reinforced concretes with 5D fibres having aspect ratio of 65 and 4D fibres having aspect ratio of 80.

Keywords: Steel fibre concrete, impact, steel fibre, type of fibre, mechanical properties

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ-LİFLİ BETON	3
2.1 Çelik Lifli Betonlar	6
2.1.1 Çelik Liflerin Tanımı.....	8
2.1.2 Çelik Lifli Betonların Hazırlanmasında Dikkat Edilecek Hususlar	9
2.1.3 Çelik Liflerin Kullanım Alanları	11
2.2 Çelik Lifli Betonların Özellikleri	12
2.2.1 Taze Beton Özellikleri.....	13
2.2.2 Mekanik Özellikler	13
2.2.2.1 Basınç Dayanımı.....	15
2.2.2.2 Çekme Dayanımı	17
2.2.2.3 Eğilme Dayanımı	19
2.2.2.4 Tokluk.....	24
2.2.2.5 Darbe Dayanımı	30
BÖLÜM ÜÇ-DENEYSEL ÇALIŞMA.....	41
3.1 Amaç	41
3.2 Kapsam.....	41
3.3 Kullanılan malzemeler	41

3.3.1 Çimento.....	42
3.3.2 Uçucu Kül.....	42
3.3.3 Silis dumanı	43
3.3.4 Karışım suyu.....	43
3.3.5 Agregası.....	44
3.3.6 Çelik Lif.....	44
3.3.7 Kimyasal Katkı	46
3.4 Beton Karışımların Hazırlanması.....	46
3.5 Numunelerin Döküm ve Yerleştirme İşlemi	47
3.6 Numunelerin Kür İşlemi.....	47
3.7 Hazırlanan Karışımlar	48
3.7.1 Normal Dayanımlı Seri.....	48
3.7.2 Yüksek Dayanımlı Seri.....	49
3.8 Yapılan Deneyler.....	50
3.8.1 Taze Hal Deneyleri	50
3.8.2 Basınç Deneyi.....	50
3.8.3 Eğilme Deneyi	51
3.8.4 Darbe Deneyi	53

BÖLÜM DÖRT-DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... 58

4.1 Taze Hal Deney Sonuçları.....	58
4.2 Sertleşmiş Haldeki Deney Sonuçları	59
4.2.1 Normal Dayanımlı Seri Basınç Deneyi Sonuçları	59
4.2.2 Normal Dayanımlı Seri Eğilme Deneyi Sonuçları	61
4.2.2.1 Normal Dayanımlı Seri Yük-Sehim Eğrileri	61
4.2.2.2 Normal Dayanımlı Seri Eğilme Dayanımları	64
4.2.2.3 Normal Dayanımlı Seri Kırılma Enerjileri	68
4.2.3 Yüksek Dayanımlı Seri Basınç Deneyi Sonuçları	71
4.2.4 Yüksek Dayanımlı Seri Eğilme Deneyi Sonuçları	73
4.2.4.1 Yüksek Dayanımlı Seri Yük-Sehim Eğrileri	73
4.2.4.2 Yüksek Dayanımlı Seri Eğilme Dayanımları	78

4.2.4.3 Yüksek Dayanımlı Seri Kırılma Enerjileri	82
4.2.5 Normal ve Yüksek Dayanımlı Seri Eğilme Deney Sonuçlarının Birlikte Değerlendirilmesi	86
4.2.5.1 Normal ve Yüksek Dayanımlı Seri Yük-Sehim Grafikleri.....	86
4.2.5.2 Normal ve Yüksek Dayanımlı Seri Eğilme Dayanımları	91
4.2.5.3 Normal ve Yüksek Dayanımlı Seri Kırılma Enerjileri	93
4.2.6 Yüksek Dayanımlı Seri Darbe Deneyi Sonuçları	94
4.2.6.1 Yüksek Dayanımlı Seri Darbe Deneyi Yük-Sehim Eğrileri	95
4.2.6.2 Yüksek Dayanımlı Seri Darbe Deneyi Eğilme Dayanımları	102
4.2.6.3 Yüksek Dayanımlı Seri Darbe Deneyi Kırılma Enerjileri	107
BÖLÜM BEŞ-GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	114
5.1 Genel Değerlendirme	114
5.2 Öneriler.....	117
KAYNAKLAR	118

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Betonda kullanılan çeşitli lif tipleri a) cam, b) asbest, c) çelik, d) polipropilen.....	5
Şekil 2.2 Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi	7
Şekil 2.3 Çelik lif tipleri ve şekilleri	9
Şekil 2.4 Çökme değerlerinin lif hacmine göre değişimi.....	13
Şekil 2.5 Çelik lifli betonlarda basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrisine lif hacminin etkisi	15
Şekil 2.6 Çelik lifli betonda çekme gerilmesi-deplasman grafiği	18
Şekil 2.7 Yük-sehim eğrisinde tokluk indekslerinin gösterilmesi	22
Şekil 2.8 Lif geometrisinin tokluğa etkisi	26
Şekil 2.9 Lif hacim ve görünüm oranının tokluğa etkisi.....	28
Şekil 2.10 Banthia ve arkadaşları tarafından geliştirilen darbe deney sistemi.....	35
Şekil 2.11 Farklı yükleme hızlarında yük-deplasman eğrileri	38
Şekil 2.12 Farklı darbe hızlarında yük-deplasman eğrisi.....	40
Şekil 3.1 Deneysel çalışmada kullanılan çelik liflerin fotoğrafları.....	45
Şekil 3.2 3D-4D-5D gerilme-birim şekil değişimi grafiği	46
Şekil 3.3 Beton karışımlarının yapıldığı mikser	47
Şekil 3.4 Basınç deneylerinin gerçekleştirildiği pres	51
Şekil 3.5 Eğilme deneylerinin gerçekleştirildiği pres	52
Şekil 3.6 Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi için şematik deney düzeneği ile temsili yük-sehim eğrileri	52
Şekil 3.7 Darbe düzeneği mekanik aksam katı modeli	54
Şekil 3.8 112M262 numaralı proje ekibince tasarlanan ve üretilen darbe deney sistemi	55
Şekil 3.9 Darbe deneyi sonrası kirişin durumu	55
Şekil 4.1 N serisi basınç dayanımları	60
Şekil 4.2 N serisi bağıl basınç dayanımları	60

Şekil 4.3 N serisi %0,38 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri	62
Şekil 4.4 N serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri	62
Şekil 4.5 N serisi lif hacmine bağlı yük-sehim eğrileri a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60	63
Şekil 4.6 N serisi lif hacmine bağlı yük-sehim eğrileri a) 3D 80/60, b) 4D 80/60	64
Şekil 4.7 N serisi eğilme dayanımları	65
Şekil 4.8 N serisi bağıl eğilme dayanımları	65
Şekil 4.9 N serisi kırılma enerjileri	68
Şekil 4.10 N serisi bağıl kırılma enerjileri	69
Şekil 4.11 Y serisi basınç dayanımları	72
Şekil 4.12 Y serisi bağıl basınç dayanımları	72
Şekil 4.13 Y serisi %0,38 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri	74
Şekil 4.14 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri	75
Şekil 4.15 Y serisi lif hacmine bağlı yük-sehim eğrileri a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60.....	76
Şekil 4.16 Y serisi lif hacmine bağlı yük-sehim eğrileri a) 3D 80/60, b) 4D 80/60 ..	77
Şekil 4.17 Y serisi eğilme dayanımları	78
Şekil 4.18 Y serisi bağıl eğilme dayanımları	78
Şekil 4.19 Y3D6560/0,38 serisi kırılma kesiti	80
Şekil 4.20 Y serisi kırılma enerjileri	82
Şekil 4.21 Y serisi bağıl kırılma enerjileri	83
Şekil 4.22 Y38060/0,76 serisi kırılma kesiti.....	85
Şekil 4.23 %0,38 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60 serileri yük-sehim grafikleri.....	87
Şekil 4.24 %0,38 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 80/60, b) 4D 80/60 serileri yük-sehim grafikleri.....	88
Şekil 4.25 %0,76 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 40/30, b) 3D 55/30 serileri yük-sehim grafikleri.....	89
Şekil 4.26 %0,76 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60 serileri yük-sehim grafikleri.....	90
Şekil 4.27 %0,76 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 80/60, b) 4D 80/60 serileri yük-sehim grafikleri.....	91

Şekil 4.28 N ve Y serisi %0,38 lif hacmine sahip numunelerin eğilme dayanımı.....	92
Şekil 4.29 N ve Y serisi %0,76 lif hacmine sahip numunelerin eğilme dayanımı.....	92
Şekil 4.30 N ve Y serisi %0,38 lif hacmine sahip numunelerin kırılma enerjisi	93
Şekil 4.31 N ve Y serisi %0,76 lif hacmine sahip numunelerin kırılma enerjisi	94
Şekil 4.32 Y serisi %0,38 lif hacmine sahip örneklerin darbe etkisinde yük-sehim eğrileri	95
Şekil 4.33 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin darbe etkisinde yük-sehim eğrileri	96
Şekil 4.34 Y serisi %0,38 lif hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60.....	97
Şekil 4.35 Y serisi %0,38 hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 80/60, b) 4D 80/60.....	98
Şekil 4.36 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 40/30, b) 3D 55/30.....	99
Şekil 4.37 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60....	100
Şekil 4.38 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 80/60, b) 4D 80/60.....	101
Şekil 4.39 Y serisi darbe sonrası sehim değerleri	102
Şekil 4.40 Y serisi darbe etkisi altında eğilme dayanımları.....	103
Şekil 4.41 Y serisi darbe etkisi altında bağıl eğilme dayanımları.....	103
Şekil 4.42 Darbe yükleri altında kırılma kesitleri a) 3D 65/60 b) 4D 65/60.....	105
Şekil 4.43 Y serisi darbe etkisi altında eğilme dayanımı dinamik artış faktörleri ...	107
Şekil 4.44 Y serisi darbe etkisi altında kırılma enerjileri.....	108
Şekil 4.45 Y serisi darbe etkisi altında bağıl kırılma enerjileri.....	108
Şekil 4.46 2 darbe vurulan a) Y5D6560, b) Y4D8060 serileri yük-sehim grafikleri	110
Şekil 4.47 Y serisi darbe etkisi altında kırılma enerjisi dinamik artış faktörleri.....	112

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Betonda kullanılan bazı liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri	5
Tablo 2.2 Etriyersiz, etriyeli ve alternatif çelik lifli kolonların enerji yutma kapasiteleri	27
Tablo 3.1 Çimentonun fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları	42
Tablo 3.2 Uçucu külün fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları	43
Tablo 3.3 Silis dumanı kimyasal özellikleri	43
Tablo 3.4 Kullanılan kaba ve ince agregaların elek analizi sonuçları	44
Tablo 3.5 Deneysel çalışmada kullanılan çelik liflerin özellikleri	44
Tablo 3.6 Kimyasal katkının özellikleri	46
Tablo 3.7 Normal dayanımlı seri beton dizaynları	49
Tablo 3.8 Yüksek dayanımlı seri beton dizaynları	50
Tablo 4.1 B.H.A ve çökme değerleri	58

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Beton, sahip olduğu özellikler nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Kolay tedarik edilmesi, istenilen şekilde döküm yapılabilmesi, suya ve yüksek sıcaklığa dayanıklı olması, düşük onarım maliyetine sahip olması gibi avantajlarının yanı sıra ekonomik bir malzeme olduğu da söylenilebilir. Beton bu avantajlarına rağmen çatlaklara yol açan kuruma rötresi, sünme ve gevrek davranış gösterme gibi dezavantajlara da sahiptir (Brandt, 1995).

Betonun sünekliğini artırabilmek için farklı özelliklere sahip lifler kullanılmaktadır. Betonda kullanılan lifler farklı aşamalarda oluşan çatlakları sınırlayarak büyümesini engellemekte, oluşan iç gerilmeleri dağıtmaktadır. Böylelikle lifli betonlarda mekanik özellikler gelişmekte, maksimum yük ve özellikle maksimum yük sonrası kırılma davranışı olumlu etkilenmektedir. Betonda değişik kesitlerde kullanılan liflerin en yaygın olanları çelik, karbon, polipropilen, cam ve plastik gibi malzemelerden imal edilmektedir. Beton içerisine katılan liflerin betonun özelliklerine yapacağı etki lifin kökeni, şekli, boyutu, çekme dayanımı ve kullanım oranı ile doğrudan ilişkilidir.

Pek çok avantajı olan betonun çekme dayanımı, darbe dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı ve çatlak sonrası yük taşıma kapasitelerinin zayıf olması gibi dezavantajları özellikle çelik liflerin kullanılmasıyla bertaraf edilebilir. Beton içerisinde gelişigüzel ve homojen dağılan lifler, betonda çatlak oluşumunu büyük oranda azaltmakta, şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, darbe dayanımını ve çekme dayanımını arttırmakta, yüksek düktiliteye sahip betonlar elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Lifler matriste önceden var olan veya bir etki sonucunda oluşan çatlakların ilerlemesini önleyerek, çatlak ucundaki gerilmeyi düşürerek veya yük etkisi altında ilerleyen çatlağı sağlam alanlara doğru sapıtılarak betonda toklaşma mekanizması oluştururlar. Çatlakları köprüleyerek; gerilmenin çatlağın bir tarafından diğer tarafına iletilmesini sağlayarak, çatlama kesitin yük taşımaya devam etmesini sağlarlar. Betonda lif kullanımıyla sünekliğin ve yük taşıma kapasitesinin artması,

sınırlandığı çatlak genişliğinden dolayı donatı korozyonunun dolaylı olarak engellenmesi, çatlak oluşumunun azaltılması, dayanıklılığın artırılması ve donatı işçiliğinin azalması gibi avantajlar elde edilmektedir. Bu üstün özelliklerinden dolayı lifli betonlar günümüzde pek çok değişik işlerde kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, çelik lif hacminin, uzunluğunun, görünüm oranının (narinlik; lif uzunluğu/lif çapı) ve uç geometrisinin değişiminin betonun mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla Dramix firmasından temin edilen görünüm oranı 40, 55, 65 ve 80, uzunlukları 30 mm ve 60 mm, uç geometrisi 3D, 4D ve 5D olan 7 farklı çelik lif iki dozajda (%0,38 ile %0,76) betona ilave edilmiştir. Su/bağlayıcı (s/b) oranı 0,57 ve 0,36 olmak üzere 2 farklı lifsiz kontrol betonu ile her iki sınıfta on ikişer seri çelik lifli beton olmak üzere toplam 26 seri beton üretilmiştir. Her seride 3 adet 150 mm ayrıtlı küp, normal dayanımlı seride 3 adet, yüksek dayanımlı seride 6 adet 100x100x600 mm prizmatik kiriş numuneler hazırlanmış ve numunelere standart koşullarda 28 gün su kürü uygulanmıştır. Küp numunelere tek eksenli basınç deneyi, normal dayanımlı seride kiriş numunelere deplasman kontrollü eğilme deneyi, yüksek dayanımlı seride ise kiriş numunelerin 3 tanesine deplasman kontrollü eğilme deneyi, 3 tanesine de ağırlık düşürmeli darbe deneyi gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde giriş, ikinci bölümde lif donatılı betonların özellikleri ve darbe dayanımının ölçülmesi hakkında literatür araştırması, üçüncü bölümde yapılan deneysel çalışmalar, dördüncü bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar, beşinci bölümde ise genel değerlendirme ve öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM İKİ

LİFLİ BETON

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenler ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan betonun içerisine farklı tekniklerle ve farklı oranlarda çelik, plastik, cam, naylon, polipropilen vb. liflerin ilavesiyle elde edilen betona ‘lifli beton’ denir (Uğurlu, 1994).

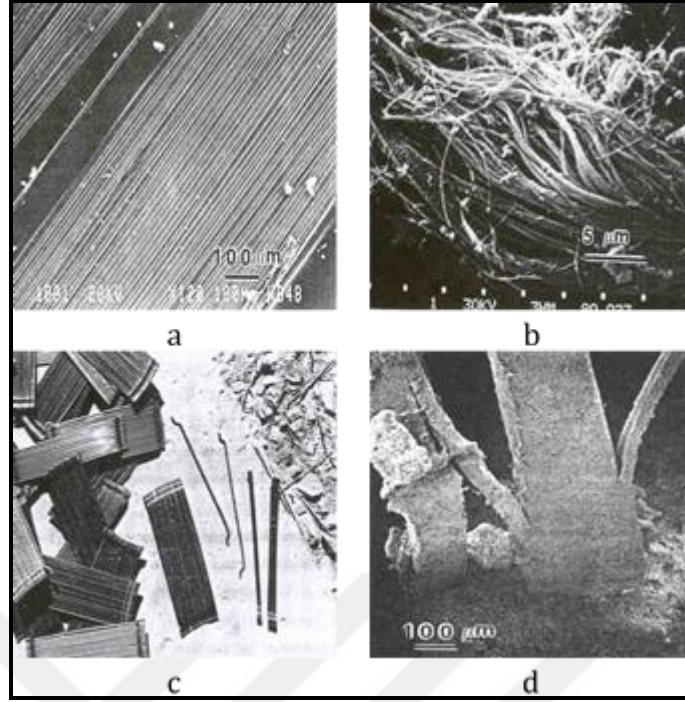
Betona lif takviyesi, betonun mekanik özelliklerini geliştirmek, çatlamayı ve gevrek davranışı önlemek amacıyla yapılır. Belirli özellikteki liflerle homojen bir şekilde takviye edilmiş olan lifli beton, farklı yüklemeler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betondan oldukça farklı özelliklere sahip olabilmektedir (Şimşek, 2004).

Lifli beton üretimine duyulan ihtiyaç, normal betonun zayıf yönlerini geliştirerek daha üstün özellikli betonlar üretilmek istenmesindendir. Çeşitli lifler kullanarak betonun, tokluğu, darbe yüklerine karşı direnci, eğilme ve çekme kuvvetlerine karşı direnci geliştirilebilir. Betona katılan lifler, matris fazını destekleyerek beton içerisinde, gerilme transferi sağlayan küçük köprücükler şeklinde görev alırlar (Yerlikaya, 1998).

Lifli betonlarda, betonun yük altında gösterdiği nihai çatlama deformasyonu normal betona göre çok daha fazladır. Lifli betonlarda maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre oldukça yavaştır. Bu yüzden, liflerin matristen sıyrılması ve uzamaları nedeniyle yutulan enerji, lifli betonlarda normal betonlara kıyasla çok daha yüksektir (Tokyay, Ramyar ve Turanlı, 1991).

Her ne kadar lifli betonlar yalın betonlara göre daha maliyetli olsalar da bu betonların lif ilavesi ile gelişen mekanik ve durabilite özellikleri servis ömrünü arttıracak, bakım onarım masraflarını azaltacak, can ve mal güvenliği açısından kazanım olarak geri dönecektir.

Lifli betonların esin kaynağı olarak 4500 yıldır yapı malzemesi olarak kullanılmakta olan saman takviyeli kil harcı (kerpiç), kabul edilebilir. Tarihi yapıların bazılarında, balçık karışımları içerisine hayvan kuyruk ve yele kıllarının katıldığı bilinmektedir. Ayrıca Türk Mimarisinde Mimar Sinan'ın yapılarında kullandığı saman gibi doğal lifler içeren Horasan Harcı da lifli betonlara örnek olarak gösterilebilir. 1874 yılında lif donatılı betonun ilk patenti ABD'de A. Berard tarafından alınmıştır. Günümüzdeki bilinen şekle sahip lif patentleri 1927'de ABD'de G. Martin tarafından, 1939'da İngiltere'de Zitkeviç ve yine İngiltere'de 1943'de G. Constantinesco tarafından alınmıştır. Çelik liflerin beton katkı maddesi olarak kullanımı ise 1950'li yıllarda başlamıştır. İleriki yıllarda, cam, asbest, karbon, plastik gibi yapay liflerin yanı sıra bambu, Hint keneviri gibi pek çok doğal lif çeşitleri betonda kullanılarak test edilmiştir. Her bir lifin değişik işlev ve üstünlüklere sahip olduğu görülmüştür. Sentetik liflerin gelişimi endüstriye çok faydalı olmuştur. Polipropilen liflerin betona katılması, 1960'larda askeri araştırmalarda bu ürünlerin betonda sınırlı çatlaklara izin vererek darbe ve aşınmalara karşı direnç sağladığının ispatlanmasıyla başlamıştır. 2000'li yıllara gelindiğindeyse özellikle poliolefin, polipropilen ve PVA lif katkılı betonlar çok değişik yapı projelerinde kullanılmıştır. Lifli betonların en yaygın olarak kullanılan tipleri cam lifli beton, çelik lifli beton ve polimer lifli beton olup Şekil 2.1'de çeşitli lif tiplerine ait örnek fotoğraflar sunulmuştur (Baradan ve diğer., 2012).



Şekil 2.1 Betonda kullanılan çeşitli lif tipleri a) cam, b) asbest, c) çelik, d) polipropilen (Baradan ve diğer., 2012)

Betonun katılan bazı liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Betonda kullanılan bazı liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri (ACI 544.İR, 2002)

Lif Cinsi	Çekme Day. (MPa)	Elastisite Mod. (10^3 MPa)	Maksimum Uzama (%)	Yoğunluk (g/cm^3)
Akrilik	207-414	2,10	25-45	1,10
Asbestler	552-966	83-138	0,60	3,20
Pamuk	414-690	4,80	3-10	1,50
Cam	1035-3795	69	1,50-3,50	2,50
Naylon	759-828	4,10	16-20	1,10
Polyester	724-863	8,30	11-13	1,40
Polietilen	690	0,14-0,40	10	0,95
Polipropilen	552-759	3,50	25	0,90
Pamuk-Yün	414-621	6,90	10-25	1,50
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,60	2,70
Çelik	276-2760	200	0,50-35	7,80

Betonda kullanılan liflerin etkinliği incelendiğinde, taze beton çatlaklarının önlenmesi için cam ve sentetik lifler (polipropilen, poliolefin, naylon), sertleşmiş betonda eğilme ve çekme dayanımının artırılması için çelik ve karbon, enerji yutma

kapasitesinin artırılması için polipropilen ve çelik, aşınma dayanımının artırılması içinse çelik liflerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

2.1 Çelik Lifli Betonlar

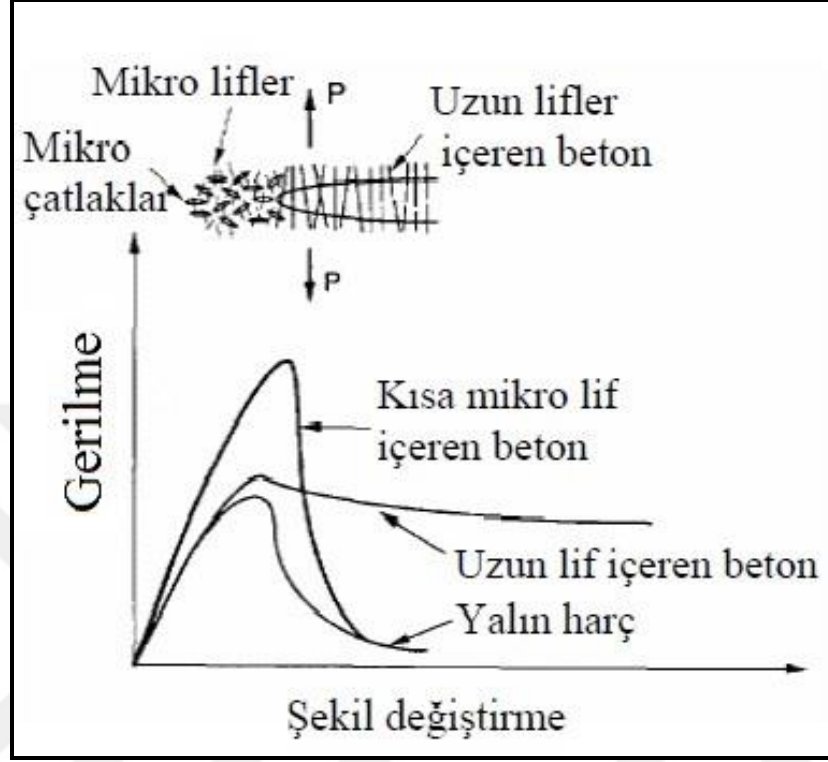
Çelik lifli beton, çimento, agrega ve süreksiz dağılı çelik liflerin bir arada kullanıldığı, gerektiğinde puzolan ve katkı maddesi ilavesiyle hazırlanan bir tür betondur (ACI 544.3R-93, 1998). Diğer bir tanımla çelik lif takviyeli beton, betona çelik tellerin karıştırılmasıyla elde edilen, 3 boyutta teçhizatlı betondur (TS 10515, 1992).

Çelik liflerin betona 20 kg/m^3 ile 150 kg/m^3 arasında eklenmesiyle betonun mühendislik özelliklerinde önemli iyileşmeler elde edilir. Çelik lif ilavesiyle özellikle eğilme dayanımı, yorulma dayanımı, darbe dayanımı, kırılma ve parçalanma dayanımlarında artışlar oluşmaktadır (ACI 544.3R-93, 1998).

Çelik liflerin betona belirli oranlarda karıştırılması ile mekanik özelliklerinde önemli artışlar görülür. Çelik lifler basınç ve çekme kuvvetleri etkisi altında, liflerin çekme mukavemeti tam olarak kullanılmadan önce, yalın betonda oluşması muhtemel çatlakları önler. Ayrıca çelik lifli betonda oluşmuş çatlakların matris içinde ilerlemesini yavaşlatır. Çelik lifli beton basınç düktilitesi göstererek taşıma gücüne ulaştıktan sonra dahi yük taşımaya devam eder. Maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre daha yavaştır. Çelik lifli betonda yük altında çatlama, dökülme, parçalanma ve dağılma azdır. Çekme dayanımı normal betona göre oldukça fazladır. Eğilme, kesme, yorulma ve burulma dayanımları da daha fazladır (Arslan ve Aydın, 1999).

Lifli betonlarda kullanılan mikro lifler boyutları nedeniyle matris içinde daha sık bir lif dağılımı oluştururlar, çatlakları makro düzeye gelmeden durdururlar ve elastik bölgedeki davranışı iyileştirirler. Makro lifler ise makro düzeydeki çatlakları kontrol ederek elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını arttırırlar ve maksimum

yük sonrasında davranışı iyileştirirler (Taşdemir ve Bayramov, 2002). Şekil 2.2’de Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi (Betterman, Ouyang ve Shah, 1995)

Bu özelliklerinden dolayı betonda çelik liflerin kullanılmasıyla istenilen yük taşıma kapasitesine daha küçük kesitlerle ulaşılarak daha ekonomik çözümler üretilmiş olur. Bazı döşemelerde yalnızca çelik liflerin kullanılmasıyla standart donatı çeliği kullanılmadan hem de daha düşük kalınlıklarda imalatlara olanak sağlayarak daha pratik çözümler sağlayan çelik lifler, işçilikten tasarruf ettirerek maliyet avantajı sağlar (Arslan, 1993).

Çelik lifler betonların darbe aşınmasının neden olduğu mikro kırılma çatlaklarını sınırlandırarak aşınma hasarlarını azaltmaktadırlar. Çelik lifler, betonların erozyon ve kaviteasyon dayanımlarını arttırırken, büzülme çatlak genişliklerini azaltıcı yönde etki yaparak büzülme hareketlerini kısıtlamaktadırlar (Ünal, Köksal ve Eyyubov, 2003).

2.1.1 Çelik Liflerin Tanımı

Betonun mekanik özelliklerini geliştirmek için taze beton içerisine çeşitli yöntemlerle farklı miktarlarda eklenen çelik lifler, değişik kesit ve boyutlarda imal edilmektedir.

Çelik lifler, soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi, çelik plakaların kesilmesi, sıcak çekme ve çelik tellerin öğütülmesi yöntemleri ile üretilebilir (ACI 5441R-96, 1996).

Beton bileşiminde kullanılan çelik lifler, genellikle soğuk çekilmiş düşük karbonlu C 1008 çelikten üretilirler. Çelik lifler sahip oldukları mekanik özellikler ve biçimsel özellikleriyle tanımlanır. Bu özellikler, lifin görünüm oranı veya narinliği (lif uzunluğu/lif çapı), geometrik yapısı ve çekme dayanımıdır.

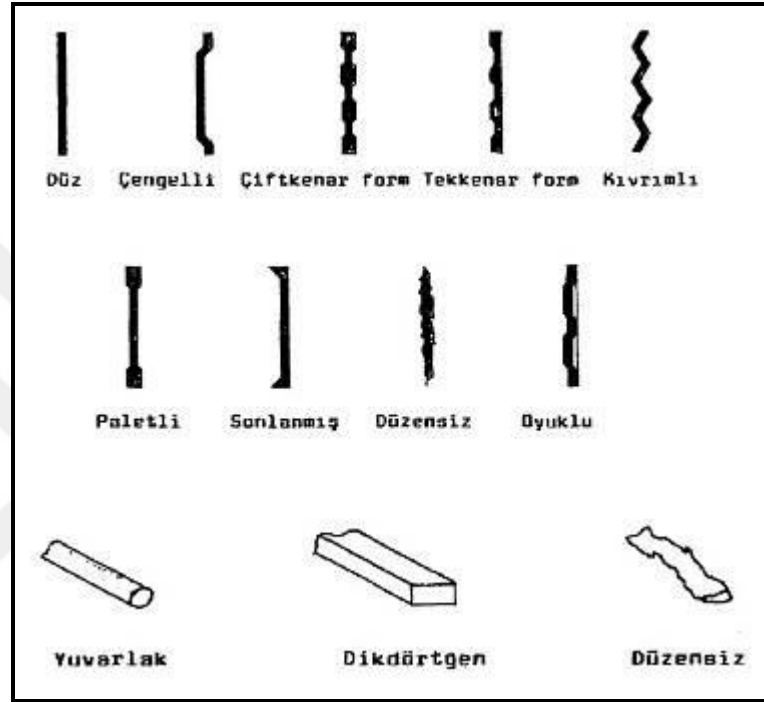
Çelik lifler geometrik yapılarına göre üç sınıfa ayrılırlar (TS 10513, 1992).

- ✓Düz, pürüzsüz yüzeyli teller,
- ✓Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller (üzerinde çentikler açılmış teller, kıvrımlı teller, ay biçimli dalgalı teller),
- ✓Sonu kancalı teller (iki ucu kıvrılmış teller, bir ucu kıvrılmış teller).

Çelik liflerin en önemli özellikleri yüksek çekme gerilmesine karşılık düşük uzama özellikleridir. Son yıllarda çekme dayanımı 2500 MPa'a varan çok yüksek dayanımlı çelik lifler üretilmektedir. Çok yüksek dayanımlı bu liflerin kullanılmasıyla betonun dayanımı arttıkça lif ile aderansı daha yüksek olacağından, çatlak sonrası liflerin betondan sıyrılmaları zorlaşır ve sıyrılarak ayrılma yerine kopma oluşur. Böylece, yüksek dayanımlı liflerin kullanılması ile tepe yükü sonrasındaki davranış büyük ölçüde iyileştirilebilir (Taşdemir, Ö. Şengül, C. Şengül, 2013).

Boyları genellikle 12,7–63,5 mm arasında değişen çelik liflerin çapları 0,25–1,00 mm arasında, görünüm oranları ise 20-100 arasında olmaktadır (ACI 544.3R-93, 1998). Betonda kullanılacak çelik liflerin yüzeylerinin kir, pas ve yağdan arındırılmış

olması, liflerin her birinin çekme dayanımının 310 MPa'dan fazla olması ve 16 °C'lık bir ortamda 3,18 mm çaplı silindir çevresinde 90 derece kıvrıldığında kırılmaması istenmektedir. Çelik liflerin bu özellikleri sağlaması sünek ve yüksek mukavemetli davranış göstermesi bakımından gereklidir (TS 10513, 1992). Şekil 2.3'te farklı geometriye sahip çelik lifler verilmiştir.



Şekil 2.3 Çelik lif tipleri ve şekilleri (Şimşek, 2004)

2.1.2 Çelik Lifli Betonların Hazırlanmasında Dikkat Edilecek Hususlar

Geleneksel beton üretiminde olduğu gibi çelik lifli betonlarda da yeterli fiziksel ve kimyasal dayanıklılık için gerekli olan malzeme kalitesi, düşük s/ç oranı, optimum çimento içeriği, uygun vibrasyon ve iyi işçilik gibi şartların sağlanması gerekmektedir. Bu sebeple (TS 10514, 1992)'de çelik liflerin betonda kullanımı ile ilgili bazı kurallar konulmuştur.

Çelik lifli betonda liflerin gerilme transferi davranışını gerçekleştirebilmesi için matrisin istenilen dayanımda, boşluksuz, rijit ve yoğun olması gerekmektedir. Ancak bu şekilde liflere gelen gerilmeler diğer bir life aktarılabilir. Matris özellikleri lifli

betonun davranışını etkileyen en önemli parametrelerden olduğundan iyileştirilmesi için bazı kısıtlamalar getirilmiştir (Tabak, 2004).

- ✓ Su/çimento oranı 0,55'in altında olmalıdır ve çimento miktarı en az 320 kg/m^3 olmalıdır.
- ✓ Kum (0-4 mm) miktarı, toplam agrega kütesinin %40-%45'i olmalıdır ($750\text{-}850 \text{ kg/m}^3$).
- ✓ Maksimum dane büyüğü (D_{maks}), doğal agrega için en fazla 28 mm, kırma taş içinse 32 mm olmalıdır. 14 mm'den büyük agrega oranı %15-%20 ile sınırlandırılmıştır (TS 10514, 1992).

Betonun içerisine yaygın olarak hacimce %0,5-%2,5 arasında katılan çelik liflerin mekanik özelliklere optimum fayda sağlaması için hacimce %1-2 aralığında kullanılması gerekmektedir. Daha az kullanırsa istenilen fayda sağlanamaz. Gereğinden fazla kullanılması halinde ise pek bir fayda artışı oluşturmadığı gibi işlenebilirlik, yerleştirme ve sıkıştırma problemlerine sebep olmaktadır (Arslan ve Aydın, 1999).

Çelik lifler, beton karışımında kum ve agreganın üzerine döküldükten sonra su, çimento ve gerekli ise katkı maddesi eklenerek bütün teller ayrışmaya kadar (ortalama 1-2 dakika) karıştırılmalıdır. Bazı durumlarda çelik lifler karıştırma kazanına en son da ilave edilebilir. Lif seçiminde lif boyunun agrega maksimum tane çapının en az 1,5-2 katı olmasına da dikkat edilmelidir. Lifli betonun yerleştirilmesi nitelikli işçilik şartıyla normal ekipmanlarla yapılabilir. Çelik lifli beton yerleştirilirken sıkıştırma için çubuk şeklindeki daldırma tipi vibratörler kullanırsa lifler dönerek belli yerlerde lif yığılmasına neden olurlar ve homojen olması gereken yapı bozulur. Bu yüzden harici vibrasyon ile sıkıştırma tercih edilmelidir. Açık döşeme yüzeyleri perdahlanırken vibrasyonlu masterlar kullanılmalı veya daha önceden içsel vibratörlerle yerleştirilmiş beton, perdah makinesiyle tesviye edilmelidir (TS 10514, 1992).

2.1.3 Çelik Liflerin Kullanım Alanları

Çelik lifler betonun dayanıma olan olumlu etkileri ve enerji yutma kapasitelerini oldukça arttırarak sünek davranışa sebebiyet vermeleri nedeniyle inşaat sektörünün değişik alanlarında kullanılmaktadır. Statik yüklemelerde olduğu kadar dinamik yüklemelerde de oldukça avantajlı davranış gösteren çelik lifli betonların kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir (ACI 544.3R-93; Bentur ve Mindess, 1990).

✓Yapılarda: Sünekliğinin ve enerji yutma kapasitesinin yüksek olması çelik liflerin depreme dayanıklı yapılarda, endüstriyel ve nükleer atık depolarında, koruma ve savunma amaçlı depo ve silolarda ve güç santrallerinin yapımında kullanılmasını avantajlı hale getirmektedir. Çelik lifler yapısal uygulamalarda ilk defa 1971 yılında Londra'nın Heathrow Havaalanı'nda, otopark için üretilen 65 mm kalınlığa sahip plakların üretiminde kullanılmıştır. Bu plaklarda 25 mm uzunluğa ve 0,25 mm çapa sahip soğuk işlenmiş çelik lifler hacimce yaklaşık %1 olacak şekilde kullanılmıştır. Beş yıl kullanımdan sonra plaklarda hiçbir çatlama belirtisi gözlenmediği rapor edilmiştir. Şimşek (2004), tarafından kolon-kiriş birleşim yerlerinde, etriye yerine lif kullanılmasının dinamik yükler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kıyaslama için geleneksel birleşim yöntemi olarak, 100 mm aralıklı etriye yerleşimi kullanılmıştır. Etriye birleşim yönteminde bazı çatlaklar meydana gelirken, çelik liflerle üretilen birleşim yerinde çatlamanın oluşmadığı ortaya konulmuştur. Çelik lifli birleşim yeri daha fazla moment taşıma kapasitesi sağlamıştır. Çelik lifli beton kullanılması ile birleşim bölgesinde dayanım, süneklik ve enerji tüketiminde ciddi artışlar meydana gelmiştir.

✓Hidrolik Yapılarda: Özellikle kavitasyon ve aşınma problemi olan yerlerde, baraj, kanal, kanalet, dolu savak, dinlendirme havuzu ve arıtma tesisi gibi yapılarda kullanılmaktadırlar.

- ✓Endüstriyel Zeminlerde: Çelik lifler dayanıklılığın ve yüksek çarpma rijitliğinin gerekli olduğu fabrika zemini, ağır yüklü stok sahası ve soğuk hava deposu gibi yapılarda kullanılmaktadır.
- ✓Tünellerde ve Madenlerde: Tünel ve galerilerde tavan destekleri, tünel kaplamaları, tünel segmanları, püskürtme beton uygulamaları, istinat duvarları ve şev stabilitesinde kullanılmaktadır.
- ✓Havaalanları ve Karayollarının Yol Kaplamalarında: Çelik liflerin betona ilavesiyle normal plaklardan daha ince plaklar elde edilebilir. Bu tür yapılarda çelik lifler yorulma direncini, statik ve dinamik yüklere karşı direnci artırır.
- ✓Panel ve Borularda: Geleneksel kafes üretiminin ortadan kalkması ile işçiliğin büyük ölçüde azalması dolayısıyla üretimin hızlanması, sıyrılmaya karşı liflerin ankrajları sayesinde üstün direnç, üretimde, taşımada, stoklamada meydana gelebilecek ufalanma, kopma ve dökülmeleri azaltmak amaçlarıyla panellerde kullanılırlar.

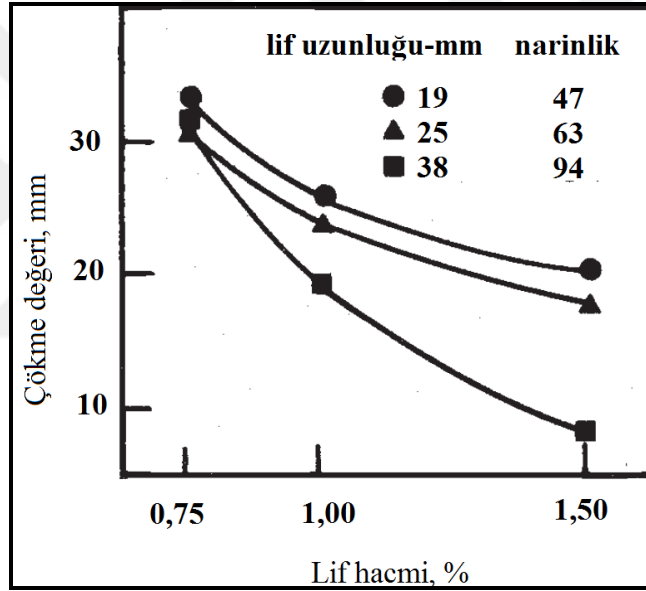
Ayrıca çelik lifler son yıllarda öngermeli ve ardgermeli prefabrik kiriş elemanlarda, palplanş elemanlarda, endüstriyel refrakter kaplamalarda ve betonarme panel elemanlarda geniş kullanım alanı bulmaktadır.

2.2 Çelik Lifli Betonların Özellikleri

Betona eklenen çelik lifler matris içerisinde rastgele bir dağılım göstermektedir. Çelik lif eklenmesi kompoziti daha sünek bir noktaya taşıyarak hem çatlama öncesi ve sonrasında daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olmasını hem de dış etkilere daha fazla dayanabilmesini sağlar. Bu direnç, çelik liflerin tamamen kopması veya matris ile aralarındaki bağın sıyrılarak kopması ile son bulur.

2.2.1 Taze Beton Özellikleri

Betonun işlenebilirliği lif hacim oranı, lif geometrisi ve lif görünüm oranı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Çelik veya diğer tüm liflerin betona katılmasıyla işlenebilirlikte azalma görülmektedir. Şekil 2.4'te farklı görünüm oranı ve uzunlukta lifler kullanılarak yapılan çalışmada kullanılan lif hacimlerine göre çökme değerleri verilmektedir (Tatnall, 2006). Görüldüğü gibi lif hacminin ve lif görünüm oranının artışı ile işlenebilirlik önemli ölçüde azalmaktadır. Lifli betonlarda uygun işlenebilirliğin elde edilebilmesi için akışkanlaştırıcı katkıları kullanmak gerekmektedir. Liflerin beton içerisinde homojen bir şekilde dağılması sağlanmalıdır.



Şekil 2.4 Çökme değerlerinin lif hacmine göre değişimi (Tatnall, 2006)

2.2.2 Mekanik Özellikler

Çelik lifli betonların mekanik özellikleri kullanılan lif, matris ve numune özelliklerine göre pek çok faktörden etkilenir. Bu faktörlerin en önemlileri:

- ✓Liflerin; tipi, geometrisi, görünüm oranı, hacmi, uyumu, dağılımı,
- ✓Matrisin; dayanımı, maksimum agrega boyutu,
- ✓Numunenin; boyutları, geometrisi, hazırlama metodudur.

Özellikle çatlak kontrolü olmayan betonlarda dinamik yükler altında meydana gelen çok eksenli çekme ve basınç gerilmelerinden dolayı mevcut kılcal çatlaklar birleşip büyüyerek makro çatlaklar haline gelirler. Beton içerisindeki makro çatlaklar ise betonun gevrek kırılma davranışı göstermesine sebep olmaktadır. Çelik liflerle takviye edilmiş betonlarda ise çekme dayanımı ve eğilme dayanımı başta olmak üzere mekanik özelliklerde büyük artışlar görülmektedir (Fanelle ve Naaman, 1985).

Yalın halde gevrek davranış gösteren beton çelik ya da sentetik liflerin kullanılması ile sünek bir yapıya kavuşur. Beton içinde homojen şekilde dağılan lifler betonda çatlak oluşumunu geciktirir, mevcut mikro çatlakların yayılımını ve ilerlemesini önler, matrizen sıyrılma ve kopmayı zorlaştırarak betonun enerji yutma kapasitesini önemli miktarda arttırır. Betonun darbe dayanımı, ilk çatlak dayanımı, çekme ve eğilme dayanımı da iyileştirilmiş olur (Yazıcı, 2000).

Song ve Hwang (2004), betona farklı hacimlerde lif eklenmesi ile yarmada çekme ve basınç dayanımlarında artış gözlemlemiştir. Hacimce %0,5 oranında eklenen çelik liflerin betonun yarmada çekme ve basınç dayanımlarını sırası ile %19 ve %7,1 oranında arttırdığını rapor etmiştir.

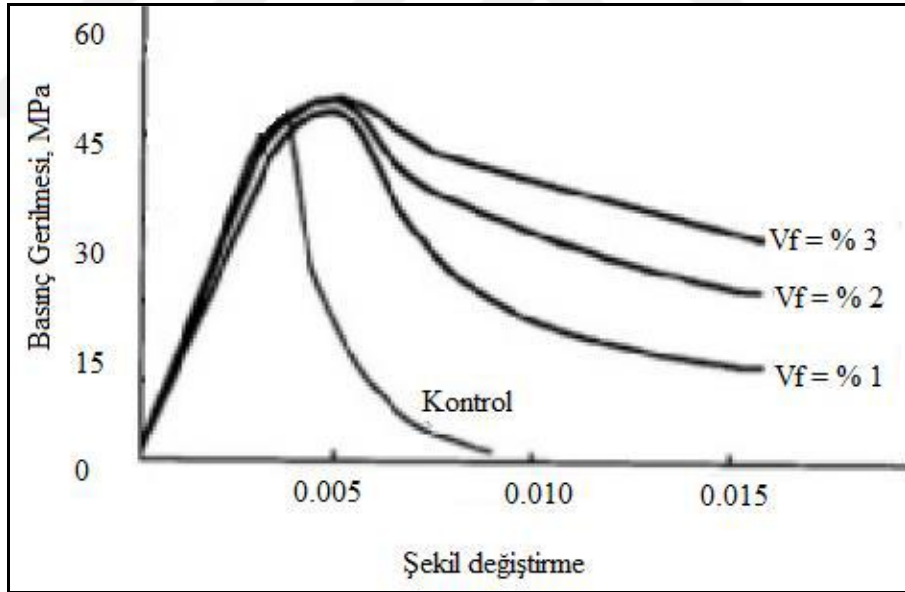
Bayramov, F. Taşdemir ve M. A. Taşdemir (2004), görünüm oranı 80, 65 ve 55 olan kancalı uçlu çelik liflerden hacimce %0, %0,26, %0,45 ve %0,64 oranlarında kullanarak ürettikleri betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini optimize ettikleri çalışmada görünüm oranı 76 olan çelik lifin %0,56 hacminde kullanılmasıyla optimum maliyet ve mekanik özellikler ortaya çıkacağı rapor edilmiştir.

Çelik liflerin sisteme ilavesiyle çatlak kontrolünün sağlanması veya büzülmeye karşı direncinin artırılmasından dolayı betonun rötre davranışında da iyileşme meydana gelmektedir. Çelik lifli betonlar durabilite açısından da yalın betonlara göre daha olumlu sonuçlar vermektedir.

2.2.2.1 Basınç Dayanımı

Betona çelik lif ilavesinin basınç dayanımına etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda, basınç dayanımının kısmen azalabildiği veya artabildiği belirtilmiştir. Ancak betona çelik liflerin eklenmesi ilk çatlak sonrasında önemli ölçüde şekil değiştirme yeteneği kazandırmaktadır (ACI Committee 544, 1998).

Liflerin basınç dayanımına doğrudan etkisi yoktur ancak süneklik artışı, tüm yapıdaki sünekliği artırır. Enerji yutma kapasitelerinin yükselmesi ile kontrol betonuna göre daha güvenli bir kırılma sağlanabilmektedir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, yalın beton ve farklı hacimlerde çelik lif katkılı betonların en büyük basınç gerilmeleri arasında dikkate değer bir fark gözlenmezken sonrasındaki şekil değiştirme davranışları oldukça farklılıklar göstermiştir. Bir başka deyişle, çelik lif içeren betonlarda basınç tokluğu lif içeriğindeki artışla artmaktadır.



Şekil 2.5 Çelik lifli betonlarda basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrisine lif hacminin etkisi (Bentur ve Mindess, 2006)

Çelik lifli betonda, lifler düzgün dağılıp betonda boşluklar oluşmazsa, basınç mukavemetinde bir miktar artış görülür. Yükleme düzlemine dik olan lifler, basınç gerilmesinde herhangi bir olumlu katkı yapmaz hatta burulmaları ve boşluk artırıcı

yönlenmeleri nedeniyle olumsuz bir işlev üstlenir. Yükleme düzlemine paralel lifler, basınç gerilmesini ve sünekliği artırır (Arslan ve Aydın,1999).

Gao ve Morino (1997), hacimce %0, %0,6, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranlarında, görünüm oranı 46, 58 ve 70 olan çelik lifler kullanarak çelik lifli betonlar üretmiştir. Çalışmada basınç dayanımının en etkili artışı %2,0 oranında lif kullanılmasıyla %21,6 olarak kaydedilmiştir.

Ashour, Wafa ve Kamal (2001), basınç dayanımları 49, 79 ve 102 MPa olan betonlara hacimce %1,0 çelik lif ilave edildiğinde basınç dayanımlarının lifsiz kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %34, %38,5 ve %8,8 arttığını rapor etmiştir.

Lee (2002), çimentoya ağırlıkça %20 uçucu kül ekleyerek oluşturduğu matrise görünüm oranı 60 olan çelik lifleri hacimce %0, %0,5, %1 ve %2 oranlarında ekleyerek çelik lifli betonlar üretmiştir. Betonda kullanılan çelik lif oranı arttıkça basınç dayanımlarının arttığını, bu artışın %2 çelik lif kullanılması durumunda maksimuma ulaştığı ve normal betona kıyasla %16'ya kadar yükseldiği belirtilmiştir.

Ünal ve diğer. (2003), su/çimento oranı 0,47 olan betonlara 20 kg/m³ ve 40 kg/m³ oranlarında RC65/60 BN tipi iki ucu kancalı çelik lifler ilave ederek ürettikleri betonlarda, çelik lif içeren betonların basınç dayanımlarında %7 civarında artış olduğunu bildirmiştir.

Song ve Hwang (2004), yüksek dayanımlı çelik lifli betonların mekanik özelliklerini inceleyen bir çalışma yapmıştır. Beton karışımlarında görünüm oranı 64 olan çelik lifler hacimce %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen betonların basınç dayanımlarının çelik lif miktarının %1,5'e kadar artması ile arttığı ve maksimum artışın %15,2 ile %1,5 çelik lif içeren betonda elde edildiği ifade edilmiştir. Hacimce %2 oranında çelik lif kullanılması durumunda ise basınç dayanımının lifsiz kontrol betonuna kıyasla çok az da olsa düştüğü bildirilmiştir.

Yazıcı, İnan ve Tabak (2007), çelik lif görünüm oranı (45, 65, 80) ve lif hacminin (%0, %1, %1,5) betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çelik lif kullanımı ile basınç dayanımının lifsiz kontrol betonuna kıyasla %4 ile %18 arasında arttığı belirtilmiştir.

Aydın (2013), düşük ve yüksek dayanımlı olmak üzere iki farklı matriste aynı boy ve çapa sahip ancak çekme dayanımları 1100 ve 2000 MPa olan kancalı uçlu çelik lifleri 20 kg/m³ ile 60 kg/m³ kullanarak lifsiz kontrol betonuyla karşılaştırmış, lifli betonların basınç dayanımlarında lifsiz kontrol betonuna göre kayda değer bir gelişme olmadığını rapor etmiştir.

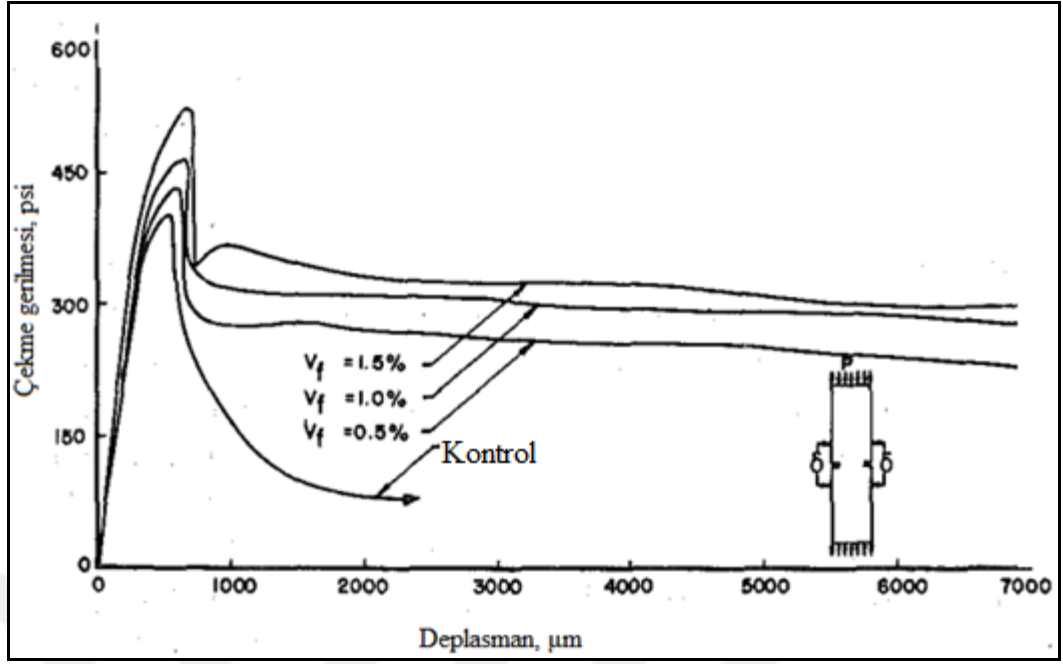
Y. Hao, H. Hao ve Chen (2016), spiral ve görünüm oranı 50, lif uzunluğu 36 mm olan kancalı uçlu çelik lifleri hacimce %0,5 ve %1 oranında kullanarak lifsiz kontrol betonu ile kıyaslamış ve çelik lif eklemenin basınç dayanımlarında önemli bir etki yaratmadığını belirtmiştir.

Z. Wu, Shi, He ve L. Wu (2015), yüksek performanslı betonlar üzerine yaptıkları çalışmada görünüm oranı 65 olan 13 mm'lik kancalı uçlu çelik liflerin betona hacimce %2 oranında eklenmesiyle basınç dayanımlarında yaklaşık %50 artış olduğunu rapor etmişlerdir.

2.2.2.2 Çekme Dayanımı

Çelik lifli betonların çekme dayanımları kullanılan lif miktarına, şekline, görünüm oranına, liflerin beton içerisinde dağılımına ve lif-matris aderansına göre yalın betona kıyasla yaklaşık olarak %5 ile %133 arasında artışlar göstermektedir (Bentur ve Mindess, 1990).

Gopalaratnam ve Shah (1987), hacimce %0,5, %1 ve %1,5 oranında çelik lif içeren betonların tek eksenli çekme gerilmesi altındaki davranışını yalın betonla kıyaslamıştır (Şekil 2.6). İlk çatlak sonrası enerji yutma miktarının çelik lif kullanımıyla çok fazla arttığı ancak bu artışın doğrusal olmadığı kaydedilmiştir.



Şekil 2.6 Çelik lifli betonda çekme gerilmesi-deplasman grafiği (Gopalaratnam ve Shah, 1987)

Tokuyay ve diğer. (1991), polipropilen ve çelik lifli yüksek dayanımlı betonların basınç ve çekme yükleri altındaki davranışlarını incelemiştir. Su/çimento oranı 0,25 olan betonlarda, 20 mm uzunluğundaki polipropilen lifler 1 kg/m^3 , 30 mm uzunluğunda, görünüm oranı 75 olan çelik lifler ise hacimce %1,5 oranında kullanılmıştır. Polipropilen lifli betonların çekme dayanımlarında %13, çelik lifli betonların çekme dayanımlarında ise %35 oranında artış kaydedilmiştir.

Zhan, Foure ve Trinh (1992), çelik lifli betonların çekme gerilmesi altındaki davranışını, direkt çekme, dört nokta yüklemeli eğilmede çekme ve silindir yarma deneyleri ile incelemiştir. Direkt çekme ile eğilmede çekme deneyleri arasında bir sapma olmadığı, bu deneylerin çelik lifli betonların sünek davranışını iyi ifade ettikleri görülmüştür. Silindir yarma deneyinde ise çelik lifli betonun kompozit etkisinin numunenin iç yapısında içsel gerilmelerin dağılmasında değişkenlik oluşturduğu görülmüştür.

Gao ve Morino (1997), hacimce %0, %0,6, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranlarında, görünüm oranı 46, 58 ve 70 olan çelik lifler kullanarak çelik lifli betonlar üretmiştir.

Çalışmada yarmada çekme dayanımının en etkili artışı %2 oranında lif kullanılmasıyla %78 olarak kaydedilmiştir.

Sevil (2002), uçucu küllü çelik lifli betonlarda lif tipinin beton özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül ve 1,8 kg/m³ ipliksi polipropilen lif, 1,2 kg/m³ kumaş görünümlü polipropilen lif ve 15 kg/m³ çelik lif kullanılarak betonlar üretilmiştir. Üretilen yalın ve lifli betonlarda uçucu kül artışına bağlı olarak yarmada çekme dayanımlarının düştüğü, lif ilavesine bağlı olarak ise yükseldiği belirtilmiştir. Çelik lifli betonun yarmada çekme dayanımının yalın betona göre %54 oranında fazla olduğu bildirilmiştir.

Kayalı, Haque ve Zhu (2003), yüksek dayanımlı liflerle güçlendirilmiş hafif agregalı betonların bazı mekanik özelliklerini araştırmıştır. Yarmada çekme dayanımı hacimce %0,56 oranında polipropilen lif kullanımı ile %90, %1,7 oranında çelik lif kullanılması ile ise %118 oranında artış göstermiştir.

Aydın (2013), yaptığı çalışmada düşük ve yüksek dayanımlı olmak üzere iki farklı matraste aynı boy ve çapa sahip ancak çekme dayanımları 1100 ve 2000 MPa olan kancalı uçlu çelik lifleri 20 kg/m³ ile 60 kg/m³ kullanarak lifsiz kontrol betonuyla karşılaştırmış, yarmada çekme dayanımlarının lif artışına paralel bir artış gösterdiğini ancak yüksek dayanımlı betonda bu artışın daha belirgin olduğunu belirtmiştir.

2.2.2.3 Eğilme Dayanımı

Çelik lifli betonların eğilme dayanımları lif dozajına ve tipine bağlı olarak yalın betonlara göre %50-100 arasında artış göstermektedir. Bu artış, çelik liflerin yüksek çekme dayanımları ile ilişkilidir. Çimento hamuru matrisinin çatlamasından sonra çatlak uçlarından gerilme transferi ve dağılımı yapması nedeniyle yük, ilk çatlaktan sonra bir miktar daha arttığı için maksimum eğilme yükü yalın betonlara göre daha fazla olmaktadır (Uğurlu, 1994).

Matris içerisine mekanik performansı artırmak amacı ile eklenen çelik liflerin çekme davranışının artması ile meydana gelen moment kapasitesi, kompozit yapının tokluğu ve çatlak kontrolü ile beraber yapının eğilme davranışına da katkı sağlayarak eğilme dayanımını arttırmaktadır. Eğilme yüklemesine maruz kalan lifli yapıda matrisin çatlamasına kadar lif ve matris bileşenlerinin beraber çalışarak, çatlamasından sonra ise köprüleme vazifesi göstererek liflerin kendi başlarına şekil değiştirme yeteneğini artırarak üstün bir performans ortaya koyduğu kanıtlanmıştır. Lif ve matris arasındaki aderans zayıf olduğunda, liflerin düşük çekme gerilmeleri seviyelerinde matrise hasar vererek matristen kolayca sıyrılmaları mümkün olmaktadır. Bu durumda lifler çimentolu kompozitte çatlak yayılmasına engel olamaz ve kompozitin mekanik özelliklerinde beklenen iyileşmeler sağlanamaz. Öte yandan çok yüksek dayanımlı matrislerde, lif/matris aderansı da yüksek olduğundan matristen liflere aktarılan büyük çekme gerilmeleri lif tarafından taşınamaz ise oluşan lif kopmaları sonucu yine beklenen performans elde edilememektedir. Lif-matris arasındaki gerilme aktarımı mekanizmasının zamanla daha iyi anlaşılmış ve çelik lif üreticileri liflerin uç geometrilerini geliştirerek (2 kancalı 4D ve üç kancalı 5D kodları ile) mekanik ankrajın arttırılması, buna paralel olarak da üzerine daha yüksek gerilme aktarılan lifin mukavemetini de arttırma yoluna giderek daha yüksek performanslı lif türleri üretmeye yönelmiştir.

Eğilme dayanımını etkileyen faktörler lif hacmi, lifin şekli, lifin görünüm oranı, lif uzunluğu, deney numunesinin boyutları ve liflerin beton içerisindeki dağılımlarıdır. Betonla lif arasındaki aderans gerilmesinin artması da dayanım artışı olarak sonuç vermektedir.

Betonda artan lif hacmiyle lifler arasındaki ortalama mesafe azaldığından mevcut yük daha fazla lif tarafından taşınır, lif ve matris arasındaki gerilmenin azalmasıyla çatlakların oluşumu ve yayılması geciktiğinden, lif hacmindeki artışla eğilme dayanımı daha fazla gelişmektedir (Şahmaran ve Yaman, 2007).

Lif hacmi eğilme dayanımını etkileyen en önemli parametre olmakla beraber lif uzunluğu da eğilme davranışını etkileyen bir diğer önemli parametredir. Uzun liflerin

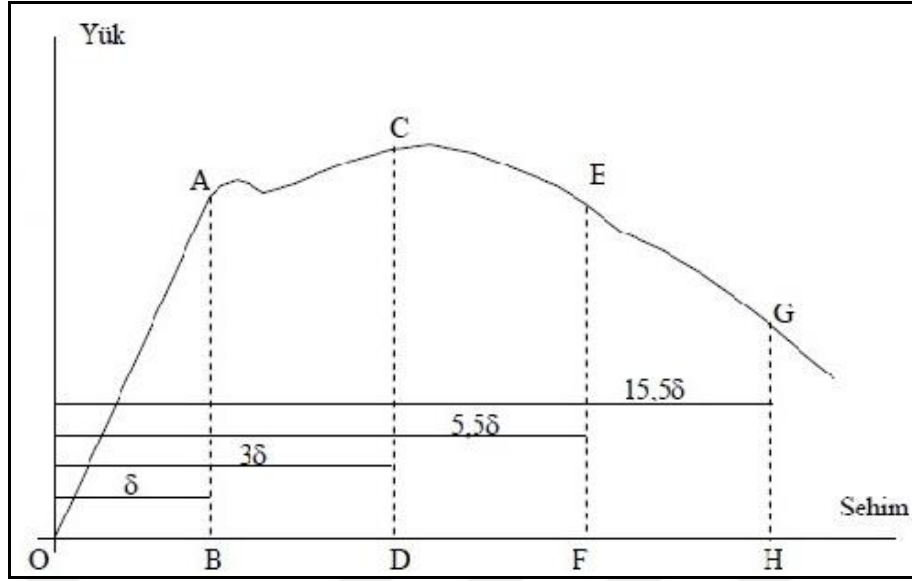
performansa daha çok katkısı olduğu bilinmektedir. Ancak lif uzunluğunun etkisi lif hacim oranı arttıkça azalmaktadır.

Lif şekli de eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Öyle ki, aynı dayanımda olmak şartıyla uçları kancalı çelik lifler, düz veya gövdesi dalgalı bir geometriye sahip çelik life oranla daha fazla aderans kuvvetine sahip olduğundan daha iyi performans göstermektedir.

Matris bileşimi eğilme davranışına kendi başına büyük bir fayda sağlamasa da kullanılan daha ince malzemeler vasıtası ile lif-matris arayüzeyinden kaynaklanan zayıflıklar ve etkileri azaltacağından dolayı önemlidir.

Lok ve Xiao (1999), çelik lifli betonların çatlak gelişimi ve yükleme durumundaki çatlak genişlemelerindeki üstün davranıştan dolayı önemli eğilme performanslarına sahip olduğunu bildirmiştir. Çelik lifli betonların eğilme dayanımlarının artırılabilmesi için esasen lif-matris aderans gerilmelerinin artırılması gerektiğini, bu aderans gerilmelerinin ise su/çimento oranı, lif yüzey özellikleri, lif şekli ve yükleme hızı gibi birçok faktöre bağlı olduğunu rapor etmiştir.

Klasik yük-deplasman eğrisinde iki çeşit eğilme dayanımı vardır. Şekil 2.7’de A noktası ile gösterilen yük-deplasman eğrisinin doğrusallıktan çıktığı değer ilk çatlak eğilme dayanımı olarak isimlendirilir. Bu noktada numunede ilk çatlak oluşmuştur. C noktası ile gösterilen ve dayanımın ulaştığı maksimum değeri gösteren diğer eğilme dayanımı ise nihai eğilme dayanımı olarak isimlendirilir. İlk çatlak eğilme dayanımı, betonun çekme dayanımıyla, nihai eğilme dayanımı ise liflerin miktarı ve görünüm oranı ile ilişkilidir. Liflerin statik dayanım özellikleri üzerinde etkili artışlar gerçekleştirebilmesi için lif hacminin %0,5’ten, lif görünüm oranının 50 değerinden büyük olması gerekmektedir. Aderansı oldukça arttıran kancalı uçlu veya kıvrımlı liflerin, eğilme dayanımını %100 oranında arttırdığı gözlenmiştir (ACI 544.4R-88, 1988).



Şekil 2.7 Yük-sehim eğrisinde tokluk indekslerinin gösterilmesi (TS10515, 1992)

Ünal ve diğer. (2003), yaptığı çalışmada görünüm oranı 67 uzunluğu 60 mm olan çelik lif ve 13 mm uzunluklu, 0,022 μ m çaplı polipropilen lif kullanmışlardır. Hazırlanan beton numuneler üzerinde basınç, elastisite modülü, eğilme, donma-çözülme ve aşınma direnci deneyleri yapılmıştır. Karışımlar, lifsiz kontrol betonu, 600 g/m³ polipropilen lif içerikli beton, 40 kg/m³ çelik lif içerikli beton, 300 g/m³ polipropilen ve 20 kg/m³ çelik lif içerikli karma beton, 600 g/m³ polipropilen ve 40 kg/m³ çelik lif içerikli karma beton olacak şekilde hazırlanmıştır. Kontrol betonuna kıyasla eğilme dayanımında en fazla artış 40 kg/m³ çelik lif içerikli beton ile 600 g/m³ polipropilen ve 40 kg/m³ çelik lif içerikli karma betonda sağlanmıştır. Artışlar sırayla %19,7 ve %21,1 olarak elde edilmiştir. İlk çatlak enerjileri ve ilk çatlak yükleri açısından bakıldığında 40 kg/m³ çelik lif içerikli beton %136, 300 g/m³ polipropilen ve 20 kg/m³ çelik lif içerikli karma beton %39, 600 g/m³ polipropilen ve 40 kg/m³ çelik tel içerikli karma beton ise %13 artış göstermişlerdir.

Yazıcı ve diğer. (2007), çelik lifli betonlarda lif hacmi (%0, %1, %1,5) ve lif görünüm oranının (45, 65, 80) betonun mekanik özelliklerine etkisi incelemişlerdir. Çelik lif kullanımının betonun eğilme dayanımını; yaklaşık olarak %3 ile %81 arasında değişen değerlerde arttırdığı ve özellikle lif görünüm oranı ve lif hacmi

arttıkça liflerin eğilme dayanımına etkisinin kayda değer oranda arttığı tespit edilmiştir.

Wu ve diğer. (2015), yüksek performanslı betonlar üzerine yaptıkları çalışmada görünüm oranı 65 olan 130 mm'lik kancalı uçlu çelik liflerin betona hacimce %2 oranında eklenmesiyle eğilme dayanımlarında yaklaşık %44 artış olduğunu rapor etmişlerdir.

Aydın (2013), yaptığı çalışmada düşük ve yüksek dayanımlı olmak üzere iki farklı matraste aynı boy ve çapa sahip ancak çekme dayanımları 1100 ve 2000 MPa olan kancalı uçlu çelik lifleri 20 kg/m³ ile 60 kg/m³ kullanarak lifsiz kontrol betonuyla karşılaştırmıştır. Eğilme dayanımında 20 kg/m³ lif dozajında çok az artış görülürken, 60 kg/m³ lif dozajında normal dayanımlı betonda düşük dayanımlı ve yüksek dayanımlı lif kullanılması durumunda sırasıyla %25 ve %41 artış olduğu bildirilmiştir. Yüksek dayanımlı betonda ise artışlar çok daha belirgin olup sırasıyla %51 ve %104 olarak rapor edilmiştir.

Alparslan (2015), yaptığı çalışmada iki farklı matraste boy/çap oranı 65 olan 60 mm uzunluğunda her iki uçta tek kancalı (3D) ve çift kancalı (4D) olmak üzere iki çeşit çelik lifi 20, 40 ve 60 kg/m³ oranlarında kullanarak lifli betonlar üretmiştir. Yapılan eğilme deneyleri sonucunda 60 kg/m³ lif kullanılmasıyla s/ç oranı 0,37 olan ve 4D lif kullanılan seride %122,1 artış görülürken, s/ç oranı 0,50 olan ve 3D lif kullanılan seride %70,4 artış görülmüştür. 6 MPa değerinde bir eğilme dayanımı için kullanılan çelik lif uç geometrisine göre lif hacim kıyaslanması yapılmış, kendiliğinden yerleşen betonda, 4D türündeki liften hacimce %0,32 (25 kg/m³), 3D türündeki liften ise %0,35 (28 kg/m³) kullanılması; geleneksel betonda, 4D türündeki liften %0,41 (34 kg/m³), 3D türündeki liften %0,61 (48 kg/m³) kullanılması gerektiği bildirilmiştir.

2.2.2.4 Tokluk

Çelik lif katkısı betonun çekme, eğilme ve bazı durumlarda basınç dayanımına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, çelik liflerin asıl etkisi betonun enerji yutma kapasitesi ve tokluğu üzerinedir.

Gerek dinamik gerekse statik yüklemelerde betonun eğilme kuvvetleri altındaki deformasyonu sırasında yapılan işi arttıran çelik lifler, betonun sabit gerilmede çok daha fazla deformasyon yapabilmesine olanak sağlar. Eğilme deneyinde bulunan yük-sehim eğrisi altında kalan alanın ölçülmesi ile belirlenen tokluk, lifli betonların işlevselliği değerlendirilirken esas alınan önemli bir parametredir ve betonun içindeki çelik liflerin rolüne bağlıdır. Çelik lifli betonlarda tokluk, lif miktarı, görünüm oranı, lif boyu, lif geometrisi, yükleme hızı ve numune boyutları gibi faktörlerden etkilenir. Çelik lifli betonların tokluğu normal betonlara göre %100-1200 arasında artış gösterebilmektedir. Lifli betonlarda, maksimum yükten sonra betonun taşıma gücü azalsa da bir süre daha sürdürülmektedir (Uğurlu, 1994).

Tokluğu etkileyen en önemli parametre lif hacmidir. Lifli betonda kritik lif hacminden sonra ilk çatlak dayanımı aşılarak pekleşme görülebilir.

Şekil 2.7’de bir örneği görülen yüklemenin ve [OH] doğru parçası ile gösterilen miktardaki sehimin sonucunda numunenin göstermiş olduğu tokluk ifadesi, sehimin değişken olduğu ve yük eğrisinin sehimin bir fonksiyonu olduğu Denklem 2.1 ile ifade edilebilir.

$$\int_{\delta=0}^{\delta=H} P(\delta).d\delta \quad (2.1)$$

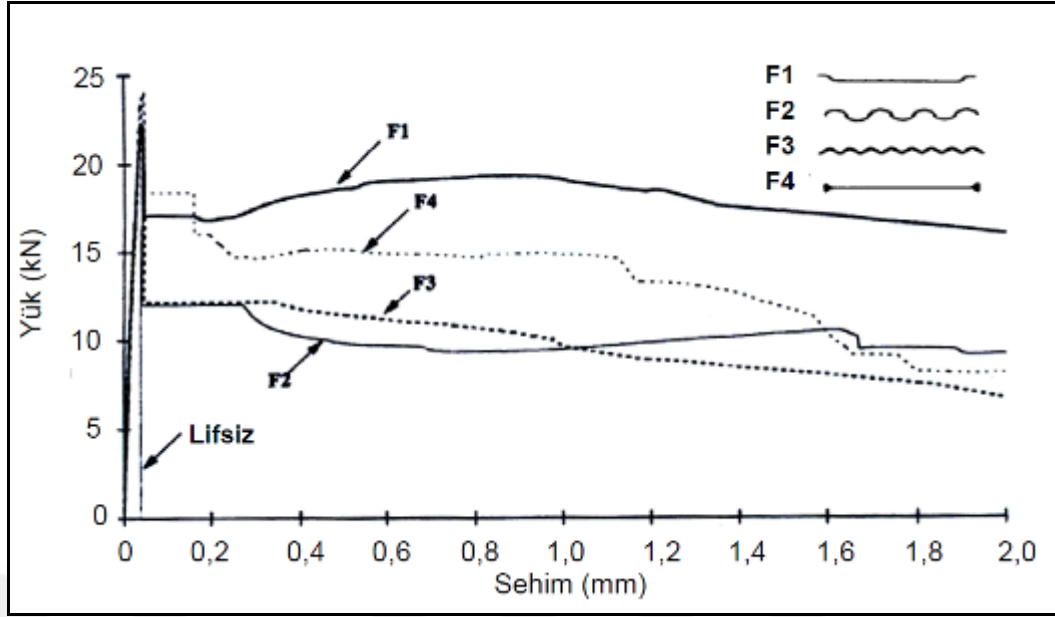
Yük-sehim eğrisinde ilk çatlama görülen A noktasına kadar yük-sehim eğrisinin altında kalan AOB üçgenin alanı ile belirlenen tokluk indeksi, çelik lifli betonların elastik-plastik davranışlarını açıklayabilmek amacıyla belirlenmiş bir kavramdır. Bu indeksler numune indekslerinden bağımsız oldukları için değerlendirme açısından

daha anlamlıdır. Şekil 2.7’de tokluk indekslerinin hesaplanacağı sehım değerleri gösterilmiştir (TS10515, 1992).

elik lifli betonlarda eğilme deneyi sonucu çizilen yk-sehım eğrisi altında kalan alan üzerinden hesaplanan elastik şekil değiştirme indeksleri gerçek performansın kolayca anlaşılmasını ve kontrol betonuyla karşılaştırılmasını sağlar. Bu indeksler ilk çatlak alanına kadar doğrusal elastik davranışı, daha sonra da plastik davranışı açıklar. TS 10515’te I_5 , I_{10} ve I_{20} olmak üzere üç indeks yer almaktadır. Elastik şekil değiştirme indeksleri, belirtilen sehıme kadar olan eğri altında kalan alanın, ilk atlağa kadar olan alana bölünmesi ile elde edilen sayılardır. Yük-sehım eğrisinin altındaki, ilk çatlak sehiminin 3 katı sehıme kadar olan alanın, ilk atlağa kadar olan alana bölünmesi ile I_5 , ilk çatlak sehiminin 5,5 katı sehıme kadarki alanın, ilk atlağa kadar olan alana bölünmesi ile I_{10} , ilk çatlak sehiminin 15,5 katı sehıme kadarki alanın, ilk atlağa kadar olan alana bölünmesi ile de I_{20} sekil değiştirme indeksleri hesaplanmaktadır (Zeynal, 2008).

Toktay ve diğer. (1991), polipropilen ve elik lif içeren betonlarla yaptıkları çalışmada, elik liflerin betonun tokluğunu %110 mertebesinde arttırdığını, polipropilen liflerin ise tokluğu etkilemediğini belirtmişlerdir. Yük-deplasman eğrilerinin maksimum yükten sonraki kısımları incelendiğinde eğimlerinin normal betona göre daha düşük olması, elik liflerin sünekliği arttırdığını ortaya koymuştur.

Banthia ve Trottier (1995), elik lif tipinin elik lifli betonun performansına etkilerini incelemiştir. alışmalarında geometrisi farklı dört tip elik lif kullanmışlar ve Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, uç geometrisi değiştirilmiş olan (F1 ve F4) elik lifli betonlardan elde edilen enerji yutma kapasitesi yüzeyi deforme edilmiş dalgalı geometriye sahip elik liflere (F2 ve F3) göre belirgin bir şekilde yüksek bulunmuştur. Ayrıca en iyi performansın, uçları kancalı tipte elik liflerle elde edildiği belirtilmiştir.



Şekil 2.8 Lif geometrisinin tokluğa etkisi (Banthia ve Trottier, 1995)

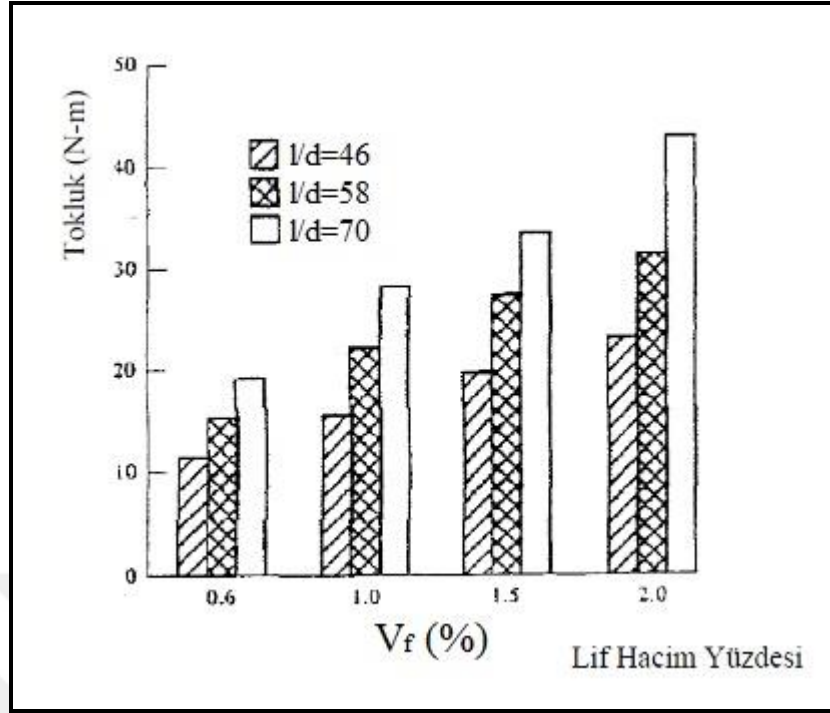
Akın (1999), betonarme karkas binalarda kolon kiriş birleşimlerinde deprem esnasında oluşan hasarları, çelik lif kullanarak azaltmayı planlamıştır. Çalışmada aynı tasarıma sahip etriyeli ve etriyesiz birleşim bölgesine sahip kolonların taşıma kapasiteleri karşılaştırılmış ve alternatif olarak birleşim bölgesindeki betona boy/çap oranı 75 olan 60 mm'lik kancalı çelik liflerden 20 kg/m^3 , 30 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 ilave edilerek gerekli olan dayanım ve sünekliğin sağlanabilmesi amaçlanmıştır ve böylece çelik liflerin etriye yerine kullanılıp kullanılamayacağı araştırılmıştır. Hazırlanan kolona, kiriş numunesi yön değiştirene kadar, 15 ton eksenel basınç yükü uygulanarak, hasar görme mekanizmaları, deplasman ve moment eğrilik karakteristikleri ile enerji yutma kapasiteleri incelenmiştir. Etriye yerine alternatif olarak kullanılan çelik liflerin, birleşim bölgesinde betonun parçalanmasını ve dağılmasını engellediği, enerji yutma kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Etriye birleşim için elde edilen enerji yutma kapasitesi 100 birim olarak kabul edilerek lifli birleşimlerin enerji yutma kapasiteleri Tablo 2.2'de görüldüğü gibi verilmiştir. Görüldüğü gibi etriyesiz birleşimde tokluğun, etriyeli birleşime göre %20 oranında azaldığı, 20, 30 ve 40 kg/m^3 çelik lifli birleşimlerde ise sırasıyla %30, %100 ve %150 oranında arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 2.2 Etriyesiz, etriyeli ve alternatif çelik lifli kolonların enerji yutma kapasiteleri

Deney No	Enerji Yutma Kapasiteleri
Deney 1 (Etriyesiz Birleşim)	79
Deney 2 (Etriyeli Birleşim)	100
Deney 3 (20kg/m ³ Lifli Birleşim)	130
Deney 4 (30kg/m ³ Lifli Birleşim)	200
Deney 5 (40kg/m ³ Lifli Birleşim)	250

Balaguru (1992), tarafından yapılan çalışmada hızlı dayanım kazanan çimento ile hazırlanmış çelik lifli betonların basınç ve eğilme yükleri altındaki davranışları incelemiştir. Karışımlarda 20 ile 60 mm arasında değişen uzunlukta kancalı uçlu ve kıvrımlı lifler, 30 ile 90 kg/m³ arasında değişen lif içeriklerinde kullanılmıştır. Deneyler sonunda 50 mm boyundaki kancalı uçlu liflerin enerji yutma kapasitesi bakımından en iyi performansı gösterdiği, çimento tipinin çok da önemli bir etki yapmadığını ancak tokluktaki iyileşmenin kaba agregaya içermeyen karışımlarda daha fazla olduğu ortaya konulmuştur.

Gao ve Morino (1997), uzunluğu 20, 25 ve 30 mm ve görünüm oranı 46, 58 ve 70 olan çelik liflerden hacimce %0, %0,6, %1, %1,5, %2 oranlarında kullanarak, yüksek dayanımlı hafif betonlar hazırlamışlardır. Çelik liflerin mekanik özelliklerden en fazla tokluğa katkı yaptığı görülmüştür. Çelik liflerin çatlak köprülenmesi ile çatlakların gelişimini kontrol ederek sınırlamasından dolayı toklukta büyük iyileşmeler meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Toklukta meydana gelen bu artışın hem matris dayanımından hem de lif aderans dayanımından etkilendiğini belirtmişlerdir. Tokluğun lif hacmi ve lif görünüm oranı değişiminden nasıl etkilendiğini Şekil 2.9'da göstermişlerdir.



Şekil 2.9 Lif hacim ve görünüm oranının tokluğa etkisi (Gao ve Morino, 1997)

Shafaei (2012), görünüm oranı/uzunluk (mm) değerleri 80/60, 80/50 ve 55/30 olan çelik kancalı liflerden %0, %1, %2, %3 ve %4 oranında kullanarak kırış numunelerde eğilme deneyi gerçekleştirmiştir. Hacimce %1'den daha yüksek lif kullanımının sıkıştırmayı zorlaştırıp boşluklu yapıyı arttırmasından dolayı enerji yutma kapasitesi bakımından ideal oranın %1 olduğunu belirtmiştir.

Aydın (2013), düşük ve yüksek dayanımlı olmak üzere iki farklı matriste aynı boy ve çapa sahip ancak çekme dayanımları 1100 ve 2000 MPa olan kancalı uçlu çelik lifleri 2 farklı lif dozajından kullanarak lifsiz kontrol betonuyla kıyaslamış ve en yüksek lif dozajı olan 60 kg/m³ lif kullanılması durumunda normal dayanımlı betonda, düşük dayanımlı liflerin 17 kat, yüksek dayanımlı liflerin ise 19 kat daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olduğu bildirmiştir. Yüksek dayanımlı betonda ise 32 ve 53 kat olan bu oranların lifli betonların beraberinde getirdiği hem mikro hem makro seviyede çatlak engelleme davranışının bir göstergesi olduğu vurgulanmıştır.

Hao ve diğeri. (2016), spiral ve görünüm oranı 50, lif uzunluğu 36 mm olan kancalı uçlu çelik lifleri hacimce %0,5 ve %1 oranında kullanarak lifsiz kontrol betonu ile kıyaslamıştır. Betona lif eklemenin düktiliteyi ve çatlak sonrası yük emilimini gözle görülür bir şekilde etkilediğini belirtmişlerdir.

Meddah, Belagraa ve Beddar (2015), uzunluğu 10 mm ile 50 mm görünümü oranı ise 14 ile 108 arasında değişen 11 farklı çelik lifi 50 kg/m³ dozajında kullanarak beton karışımları hazırlamıştır. Görünüm oranı 80 civarında olan liflerle yapılan betonların en iyi tokluk performansı gösterdiğini rapor etmiştir.

Alparslan, (2015) iki farklı matriste görünüm oranı 65 olan 60 mm uzunluğunda her iki uçta tek kancalı (3D) ve çift kancalı (4D) olmak üzere iki çeşit çelik lifi 20, 40 ve 60 kg/m³ oranlarında kullanarak lifli betonlar üretmiştir. Eğilme deneyleri sonucunda, 60 kg/m³ çelik lif içeren betonlarda yalın betona göre, eğilme etkisi altında enerji yutma kapasitesinde 30 kata kadar artış meydana gelebiliyorken bu artış 40 kg/m³ ve 20 kg/m³ çelik lif içeren numunelerde sırasıyla 22 kat ve 9 kat olarak saptanmıştır. Ayrıca artan çelik lif hacmi ile matris dayanımının eğilme davranışına etkisinin azaldığı, çelik lif uç geometrisinin enerji yutma kapasitesine belirgin bir etkisinin olmadığı bildirilmiştir.

Ismail ve Hassan (2016), kendiliğinden yerleşen çelik lifli kauçuk betonun mekanik özelliklerini incelemiştir. Mekanik özellikleri aynı olan ancak uzunlukları 35 mm ve 60 mm olan çelik liflerin eğilme dayanımı üzerine yaptığı etki 60 mm olan lifin kullanılması halinde 35 mm'lik life göre yaklaşık %9 artış olarak kaydedilmiştir. Uzun liflerin getirdiği bu dayanım artışının sebebi olarak liflerin betonla daha iyi bağ kurması, betonun çekme ve çekip çıkarma dayanımlarının fazla olması ve bunu izleyen mikro çatlakları sınırlayıcı yapıların gelişimi olduğu rapor edilmiştir.

Uğurlu (1994), tarafından çelik lifli betonun tokluğu için bazı genellemeler yapılmıştır:

- ✓Çelik lifli betonda tokluk davranışını doğrudan etkileyen parametreler kullanılan lifin hacmi, geometrisi ve boy/çap oranı yani görünüm oranıdır.
- ✓Lif hacminin artması betonun tokluğunu arttırmaktadır.
- ✓Kancalı uçlu lifler tokluk açısından diğer liflere göre daha üstün davranış göstermektedir.
- ✓Lif görünüm oranının artmasıyla toklukta az da olsa bir artış gözlenmektedir.
- ✓Lif hacminin ve uzunluğunun artmasının tokluğa sağladığı artış büyük tokluk indeksi değerlerinde (I_{20}) daha belirgindir.
- ✓Aynı lif içeriğinde normal dayanımlı betonun tokluğu yüksek dayanımlı betonlara göre biraz daha fazladır.
- ✓Çelik lifli betonun tokluk değerinde normal betona göre etkili artışlar gözlenebilmesi için lif içeriği 30 kg/m^3 değerinden fazla seçilmelidir.

2.2.2.5 Darbe Dayanımı

Statik yüklemeden farklı olarak dinamik yüklemede deprem yükleri, patlamalar, çarpışmalar vb. durumlarda deformasyon hızları oldukça yüksek ve bu yüklemelerin yapı üzerindeki tesiri oldukça karmaşık, tahribatı büyük olabilir.

Dinamik yüklere (deprem, türbülanslı su akımı, patlama, darbe vb.) maruz kalan beton elemanlarda dinamik çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Böylelikle çekme gerilmelerine karşı zayıf davranış sergileyen beton üzerinde göçmeye sebebiyet veren çatlaklar meydana gelecektir. Bu türden dinamik gerilmelere maruz kalabilecek elemanlarda çelik lif kullanımıyla, çekme gerilmelerinin daha homojen dağıtılması sağlanarak dinamik etkiler sonucunda oluşabilecek mikro ve makro düzeydeki çatlaklara karşı betonun direncini artırılabilir (Arslan ve Aydın, 1999).

Betonun ani olarak dinamik bir yükle yüklenmesine karşı gösterdiği dirence “darbe dayanımı” denir. Lifli betonların dinamik yüklemelere karşı dayanımı normal betonlara göre %100-1200 daha fazladır. Dinamik yüklemede liflerin işlevi matris

üzerine gelen yükleri karşılayarak, matrisin çarpma etkilerine karşı daha yüksek bir çarpma direnci göstermesini sağlamaktır (Arslan, 1993).

Darbe yüklemelerinde lifli betonun bir diğer avantajı ise çoklu darbe uygulanabilmesini sağlamasıdır. Bu yüzden uygulamada tekrarlı darbe yüklemesine maruz kalan yapı elemanlarını çelik liflerle üretmek, eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesinin yanında darbe dayanımını da arttırmaktadır.

Betonun darbe yükleri etkisinde davranışını belirleyebilmek için çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiştir. Aşağıda bu deney yöntemleri özetlenmiştir.

✓Darbe Deneyleri

Mühendislik yapılarında kullanılan yapı malzemeleri çeşitli darbe yüklerine maruz kalabilmektedir. Bu yüklemeler, çeşitli cisimlerin çarpması ile (araç çarpmaları, hava araçlarının çarpmaları, askeri yapılardaki çarpma olayları, endüstriyel yapılarda zeminlere ağır parça düşmeleri sonucu hasarlar gibi) oluşmaktadır. Ayrıca oluşabilecek darbe yüklemeleri arasında mermi gibi rijit veya yarı-rijit cisimlerin yüksek hızda çarpmalarından kaynaklanan etkiler de sayılabilir.

Betonun darbe dayanımını belirlemede yüksek hızlı darbe deneyleri olan patlama deneyi ve mermi darbesi deneyi kullanılabileceği gibi bazen de düşük hızlı darbe deneyleri kapsamına giren Charpy deneyi ve ağırlık düşürme deneyi kullanılabilir.

Donatılı beton bloklar üzerinde 300 m/s civarındaki yüksek çarpma hızlarıyla çok yüksek hızlı darbe deneyleri, 50–100 m/s hızında çarpma etkisi oluşturabilecek şekilde tasarlanan sistemlerle ise yüksek hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmektedir. Hızlı ve yüksek hızlı darbe deneyleri mermi şeklindeki ağırlıkların gaz tabancası veya topu ile genellikle plak formundaki örnekler atılarak çarpıtılmasıyla gerçekleştirilir.

Belirli ağırlıktaki rijit bir cismin (Çelik, plastik vb.) serbest düşme veya çift kolonlu bir düşürme mekanizması kullanılarak kontrollü olarak düşürülmesi ile düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmektedir. Ağırlık düşürme esasına dayanan düşük hızlı darbe sistemlerinin avantajı belirli bir yükseklikten düşürülen büyük kütleli cisimlerin istenilen hızda (genellikle birkaç m/s civarı) kontrollü olarak düşürmeye olanak tanımlar. Ayrıca bu türden düşük hızlı, ağırlık düşürmeli darbe deney düzeneklerinde uygun ağırlık ve örnek boyutları seçilmesiyle çok yüksek birim deformasyon hızları elde edilebilmektedir. Ayrıca sistemde düşük hızların oluşmasından dolayı yük ve sehim gibi önemli parametreleri ölçme işlemleri de yüksek hızlı darbe deneylerine göre daha kolaydır. Düşük hızlı darbe deney cihazlarında yük ve sehim değişimi gibi parametrelerin kaydedilmesi için gereken sensör ve veri toplama kartları statik yüklemelerdeki sistemlere göre pahalı da olsa yüksek hızlı darbe deneylerine göre çok daha ucuzdur. Bu sebeplerden dolayı düşük hızlı darbe sistemleri daha çok tercih edilmektedir (Aydın, Yardımcı ve Baradan, 2015).

Schrader (1981), tarafından önerilen, silindir örnekler üzerine ağırlık düşürerek çatlak oluşumunun gözle tespiti esasına dayanan yöntem betonda düşük hızlarda darbe dayanıklılığını belirlemede en yaygın kullanılan yöntemdir. Deneyde yüksekliği 64 mm olan ve 150 mm çapındaki silindir örnekler kullanılmaktadır. Bu yöntemde, silindir örnek üzerine 45 cm yükseklikten 4,5 kg ağırlık düşürülerek, ilk çatlağın oluştuğu darbe sayısı ve örnek etrafında bulunan, örneğe 5 mm mesafedeki 4 engelden herhangi 3 tanesine temas ettiği darbe sayısı (nihai darbe dayanımı) belirlenmektedir. Darbe yükü veya deplasman ölçümü yapılamayan yöntemde ancak malzemelerin karşılaştırmalı performanslarının belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu sebepten araştırmacılar darbe etkisine maruz kalan betonlarda eğilme örnekleri üzerinde oluşan darbe yükü-kiriş deplasmanı ilişkilerinin elde edilebildiği deney yöntemlerine yönelmişlerdir (Wang, Mindess ve Ko, 1996).

Arslan (1995), ağırlık düşürmeli darbe cihazı kullanarak çelik ve polipropilen lifli betonların karışık modda kırılma performanslarını incelemiştir. Ağırlık düşürmeli darbe cihazı düzeneğinin malzemenin özelliklerini Charpy ve Izod deneylerine göre

daha iyi yansıttığını belirtmiştir. Darbe başlığı tarafından uygulanan potansiyel enerjinin çarpma ile birlikte numuneye tamamen kinetik enerji olarak geçtiği varsayımıyla, normal ve çeşitli oranlarında lif içeren betonların kırılma enerjilerini hesaplamıştır. Lifli betonların çarpma etkisi altındaki performansının, statik yüklemeye göre çok daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Suaris ve Shah (1982), darbe deneylerinde kullanılan değişik numune boyutu ve geometrilerinde yapılan patlayıcı veya düşü ağırlıklı deney düzeneklerinden herhangi birinin standart olarak kabul edilemeyeceğini belirtmişlerdir. Bu deney düzeneklerinde, deneylerde elde edilen sonuçların ancak kendi içinde kıyaslanabileceğini, dizayna esas malzeme özelliklerini belirlemede kullanılamayacağını vurgulamışlardır. Lifli betonlarda yaptıkları deneylerde, çelik lifli numunelerin lifsiz numunelere göre 20 ile 100 kat arasında daha fazla darbe dayanımı gösterdiğini rapor etmişlerdir (Arslan ve Aydın, 1999).

Mindess ve Yan (1992), polipropilen lifli ve çelik lifli betonun darbe etkisi altındaki değişimini incelemiştir. Üç farklı yükseklikten ağırlık düşürülerek gerçekleştirilen ağırlık düşürmeli darbe deneyleri sonucunda düşü yüksekliğinin artmasının aderans dayanımını ve kırılma enerjisini arttırdığı rapor edilmiştir. Darbe etkisi altında çelik liflerin hem donatı-beton arası aderans dayanımında hem de betonun kırılma enerjisinde polipropilen liflerden daha üstün performans sergiledikleri rapor edilmiştir.

Wang ve Maji (1999), ucu kancalı ve dalgalı çelik lifleri hacimce %0,50, %0,75 ve %1,5 oranlarında betona katarak, kırılma enerjisinin lif hacminin artmasıyla arttığını rapor etmiştir. %1,5 oranında çelik life sahip betonların en iyi kırılma enerjisi performansı gösterdiğini ve bu seride maksimum deplasmanların 7,5 kat artış gösterdiği belirtilmiştir.

Najatara, Dhang ve Gupta (1999), görünüm oranı 55 olan 27,5 mm uzunluğundaki liflerden, %0 ve %0,5 oranında kullanarak ürettikleri betonlardan aldıkları silindirik numuneler üzerinde ağırlık düşürmeli darbe cihazında darbe deneyleri yaparak

numunelerde oluşan ilk çatlak ile kırılma sayıları belirlemiştir. Lifsiz kontrol betonlarında ilk çatlak 71 darbeye oluşurken, çelik lifli betonda bu değer 103 olmuştur. Kırılma oluşturan darbe sayısı ortalaması da lifsiz betonda 77 iken çelik lifli betonda 142 olarak bulunmuştur.

Yazıcı, Arel ve Tabak (2013), görünüm oranı 80, 65 ve 45 olan 3 farklı kancalı uçlu çelik lifi hacimce %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranında kullanarak 150x300 mm'lik silindirik örnekler üzerinde darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Darbe deneyleri sonucunda çelik lif kullanımının darbeye kırılma enerjilerini 3-23 kat arttırdığı bulunmuştur. Beklenildiği gibi en yüksek darbe dayanımı görünüm oranı 80 olan lifin %1,5 oranında kullanımıyla elde edilmiştir. Öte yandan darbe deneyi sonrası silindirik numunelerin basınç dayanımlarına bakılmış ve görünüm oranı 65 olan liflerin kullanımıyla en iyi darbe sonrası basınç dayanımı değerinin olduğu rapor edilmiştir.

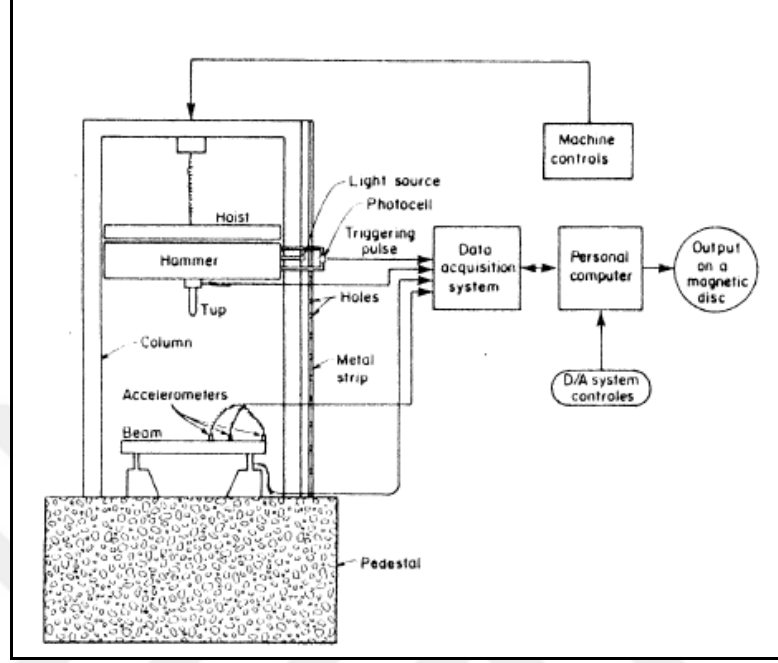
Ismail ve Hassan (2016), kendiliğinden yerleşen çelik lifli kauçuk betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mekanik özellikleri aynı olan ancak uzunlukları 35 mm ve 60 mm olmak üzere farklı olan çelik liflerin darbe dayanımı üzerine belirgin etki yaptığını söylemiştir. 60 mm olan lifin kullanılması halinde 35 mm'lik lîfe göre yaklaşık %18 daha fazla darbe dayanımı ölçülmüştür. Bunun sebebi olarak ise uzun liflerin kısa olanlara göre matrisle daha iyi bağ kurduklarından çatlak sınırlama ve engellemede daha etkili oldukları belirtilmiştir.

Eğilme örnekleri üzerinde yapılan darbe deneyleri hem yük-deplasman ilişkisinin dinamik yüklemeler altında da tespiti hem de bu ilişkinin statik yüklemesindekiyle kıyaslanabilmesi açısından çok daha kullanışlı olabilmektedir.

✓Eğilme Örnekleri Üzerinde Darbe Deneyleri

Banthia, Mindess, Bentur ve Piegon (1989), tarafından geliştirilen mekanik deney düzeneğiyle eğilme örnekleri üzerine kontrollü ağırlık düşürülmesi ile kırış

şeklindeki örnekler üzerinde oluşan yük, deplasman ve ivmeler ölçülebilmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Banthia ve arkadaşları tarafından geliştirilen darbe deney sistemi (Banthia ve diğer., 1989)

Wang ve diğer. (1996), çentiksiz, hacimce %0,75 kancalı uçlu çelik lifli kiriş örnekler üzerine 150 mm yükseklikten 60,3 kg'lık çelik ağırlık düşürerek yaptıkları darbe deneyinde, reaksiyon kuvvetleri toplamının darbe yükünden farklı oluştuğunu rapor etmişlerdir.

Ağırlık düşürmeli darbe deneylerinde düşen cisim ile kiriş örnek arasında oluşan darbe yükünün ölçümü gerekli ancak yeterli olmamakta, kirişte asıl deformasyona neden olan ve darbe yükünden daha az seviyelerde oluşan kiriş yükünün (mesnet reaksiyonlarının toplamı) de hassasiyetle ölçülmesi gerekmektedir. Doğru bir analiz için ilk olarak darbe yükünün ve kiriş üzerine etkiyen gerçek yükün (net yükün) ölçülmesi gerekmektedir.

Tek serbestlik dereceli bir sistem olarak kabul edilebilecek bu eğilme düzeneklerinde, kirişin sönüm etkileri ihmal edilecek olursa, dinamik denge denklemi;

$$M.\ddot{u}(t)+P_b(t)=P_{ext}(t)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede M kirişin kütlesini, P_{ext} kiriş üzerine belirli bir yükseklikten düşen ağırlık nedeniyle oluşan dış yükü, P_b kiriş üzerinde oluşan gerçek darbe eğilme yükünü ve darbe etkisiyle oluşan kiriş orta nokta deplasmanının (u) ikinci türevinden oluşan $\ddot{u}$ ise kiriş orta noktası ivmesini göstermektedir. Dolayısıyla denklemin $M.\ddot{u}(t)$ kısmı dinamik atalet kuvveti (P_i) olmaktadır. Buna göre; böylesi bir düzenekte kiriş üzerinde darbe etkisi nedeniyle oluşan gerçek eğilme yükü (P_b);

$$P_b=P_{ext}-P_i$$

ifadesi ile elde edilebilmektedir. Eğilme örneği tek bir darbe etkisiyle iki parçaya ayrılırsa, eğilme yükü – deplasman eğrisinin altında kalan alan olarak göz önüne alınabilecek kiriş tarafından sönmölen enerji, kiriş üzerine düşen cismin düşüşü sırasında harcanan toplam enerjiden daima küçük olacaktır. Düşen cisimde meydana gelen toplam enerji kaybı ile ikiye ayrılan parçalarda harcanan enerji arasındaki fark kirişin atalet enerjisinin toplamı ve kırılan kiriş parçalarının kinetik enerjilerinin toplamı olmaktadır. Öte yandan, eğer kiriş eleman tek bir darbe etkisi ile iki parçaya ayrılmazsa (tipik olarak lif donatılı kompozitlerde olduğu gibi) kiriş örnek tarafından harcanan eğilme enerjisi (kiriş yükü-deplasman eğrisinin altında kalan alan) kiriş üzerine düşen cismin düşüşü sırasında kirişe aktarılan enerjiye çok yakın olmalıdır. Başka bir ifade ile gerçek kiriş yükü-deplasman eğrisi altında kalan alan ile dış yük-deplasman eğrisi altında kalan alan birbirine çok yakın olmaktadır. Bu durumun temel nedeni atalet ve kinetik enerjilerin kirişe aktarılmasıdır. Her iki durumda da mesnet reaksiyonlarının toplamının kiriş üzerinde darbe tesiri ile oluşan gerçek kiriş yüküne eşit olduğu belirtilmekte ve kullanılmaktadır.... (Aydın ve diğer., 2015, s. 13-14).

Kiriş orta nokta deplasmanlarının ölçümü için kirişe yerleştirilen ivme ölçerler kullanılmaktadır. Bu ivme ölçerlerden alınan verilerin zamana göre iki defa integrali alınarak o noktanın yapmış olduğu deplasman hesaplanabilmektedir. Ayrıca kirişe

etkiyen atalet kuvvetleri de kirişin genelleştirilmiş kütlesi kullanılarak bulunabilmektedir (Banthia ve diğer., 1989).

Günümüzde dinamik yükler piezoelektrik yapıda yük hücreleri ile sağlıklı bir şekilde ölçülebilmektedir. Ayrıca yaygınlaşan temassız deplasman ölçerler vasıtasıyla bir noktanın deplasman değeri doğru ve basitçe ölçülebilmektedir.

✓Darbe Yüklemesinin Eğilme Örneğinin Mekanik Özelliklerine Etkisi

Zhang, Ruiz, Yu ve Tarifa (2009), tarafından lifsiz çentikli yüksek dayanımlı beton numunelere farklı yüksekliklerden ağırlık düşürülmesiyle farklı çarpma hızlarında yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Yükleme hızının statik yüklemeden dinamik (darbe) yüklemeye doğru arttırılmasıyla eğilme dayanımında ve kırılma enerjisinde büyük artışlar meydana geldiği rapor edilmiştir.

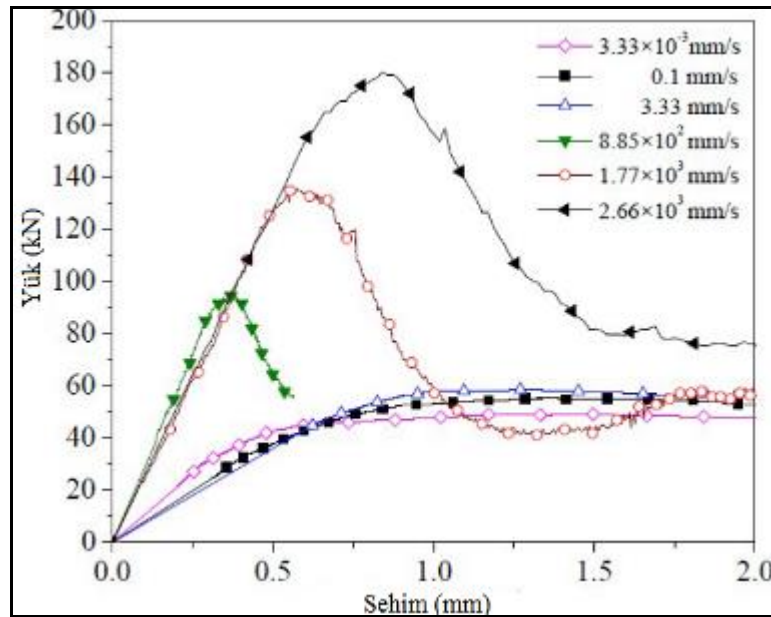
Wang ve diğer. (1996), hacimce %0,25-0,5-0,75-1-1,5 oranlarında görünüm oranı ve boyu 60/30 olan kancalı uçlu çelik lifler kullanarak 102,4x102,4x355,6 mm'lik kiriş numunelere ağırlık düşürmeli darbe deneyi yapmışlar, 60,3 kg'lık başlığın 15 cm yüksekten düşürüldüğü deneylerde betona katılan hacimce %0,75 lif oranını optimum olarak hesaplamışlar, bu değer üzerinde dayanım ve kırılma enerjisi artışının azaldığını ortaya koymuşlardır.

Dancygier, Yardımcı ve Yankelevsky (2012), farklı liflerin kullanımıyla, matris dayanımı ve lif dozajının betonun darbe dayanımına etkilerini incelemiştir. Çalışmada farklı betonlar için benzer deplasman seviyelerinde tokluk kıyaslanmış, örneklere çoklu darbe uygulanarak belirlenen deplasmana ulaşmaları sağlanmıştır. Darbe yüklemesinden elde edilen eğilme dayanımlarının statik yükleme durumuna kıyasla 1,5 ile 2,3 kat daha yüksek olduğu, kırılma enerjilerinin ise lifli betonlarda 1,2 ile 2,5 kat, lifsiz betonda 4 kat daha fazla ölçüldüğü rapor edilmiştir.

Lif takviyeli gaz betonun serbest düşmeli darbe cihazıyla üç-noktalı eğilme davranışının incelendiği bir çalışmada iki tip; düz otoklavlı gaz beton (AAC) ve

polimerik lif takviyeli gaz beton (FRAC) (Ortalama 12 mm uzunluğunda, görünüm oranı 250 olan polipropilen lifler) test edilmiştir. Darbe etkisinin mekanik özelliklere etkisi çeşitli düşü yükseklikleri (25, 75 ve 150 mm) ve farklı numune boyutlarında (50x50x250, 50x100x250, 100x100x250 mm) araştırılmıştır. Darbe etkisindeki dinamik eğilme dayanımının, statik eğilme dayanımından 2 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Darbe etkisi altında, kısa liflerin çatlak köprülemesi ve enerji sönümlemesinden dolayı FRAC numunelerinin kırılma tokluğunun AAC'ye kıyasla 3 kat daha fazla ölçüldüğü rapor edilmiştir. (Dey, Bonakdar ve Mobasher, 2013).

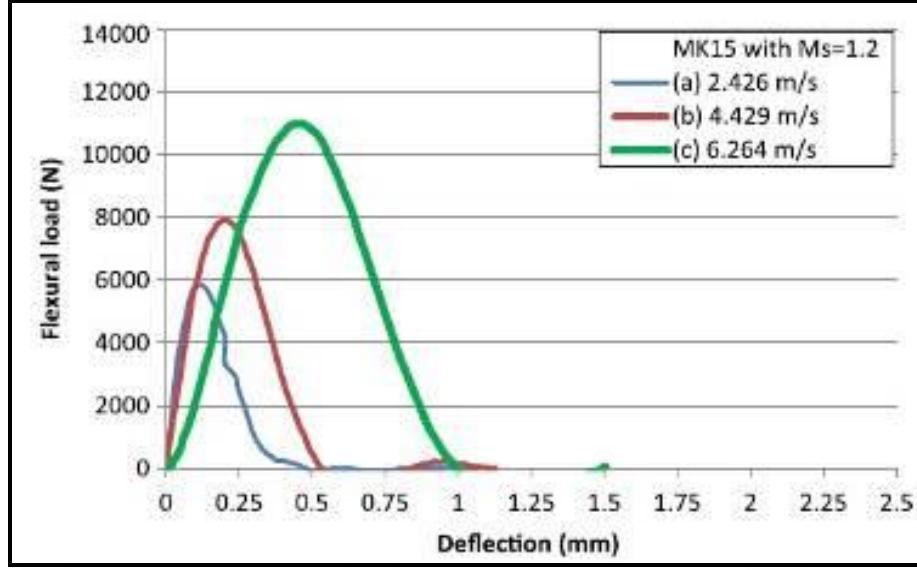
Zhang, Abd-Elazim, Ruiz ve Yu (2014), kancalı uçlu çelik lifleri $64,5 \text{ kg/m}^3$ kullanarak ürettikleri beton karışımlarından alınan kiriş örneklerin statik ve darbe yükleri altında performanslarını incelemiştir. Statik yüklemeler (10^{-3} -1 mm/s) servo-hidrolik makine ile, dinamik yüklemeler (100 mm/s ile 1000 mm/s) ise ağırlık düşürmeli darbe cihazı kullanılarak yapılmıştır. Darbe deneyleri 40, 160 ve 360 mm yüksekten 120,6 kg'lık ağırlık düşürülerek gerçekleştirilmiştir. Yüksek hızlarda, kırılma enerjisi ve maksimum yükte büyük artışlar meydana gelmiş, dinamik artış faktörleri sırasıyla 3,5 ve 2,5 civarında hesaplanmıştır (Şekil 2.11). Bu durum, atalet etkilerinin ve daha büyük lif sıyrılma direncinin bir sonucu olarak görülmüştür.



Şekil 2.11 Farklı yükleme hızlarında yük-deplasman eğrileri (Zhang ve diğer., 2014)

Hao ve diğ. (2016), yüksek dayanımlı, hacimce %0,5 ve %1 kancalı uçlu çelik lif içeren 100x100x350 mm'lik kiriş numuneler üzerinde 0,5 m ve 1 m olmak üzere iki farklı yükseklikten ağırlık düşürmeli darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kirişler üzerine 15,2 kg'lık çelik ağırlığın düşürüldüğü deneyler sonucunda numunelerin enerji yutma kapasiteleri incelenmiştir. Düşü yüksekliği 0,5 m'den 1 m ye çıkarıldığında kırılma enerjilerinde hacimce %0,5 lif içeren numunelerde %14'lük, hacimce %1 lif içeren numuneler ise %26'lık artış gözlenmiştir.

Aydın ve diğ. (2015), alkalilerle aktive edilen yüksek fırın cürufuna uçucu kül, silis dumanı ve metakaolin ekleyerek elde edilen harç numuneler üzerinde yarı statik ve darbe yüklemeleri yaparak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Darbe yüklemesinde 0,858 kg'lık ağırlık 0,3 m, 1 m ve 2 m yükseklikten çentikli eğilme örnekleri üzerine serbest düşürülerek eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve düktilite indeksi değerleri incelenmiştir. Daha sonra darbe yüklemesi altındaki eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi değerlerini yarı statik deney sonuçlarıyla karşılaştırarak DIF (dinamik artış faktörü) değerlerini hesaplamışlardır. DIF eğilme dayanımı bakımından 2,6 ile 10,4 arasında kırılma enerjileri bakımından ise 16 ile 170 arasında değişen sonuçlar göstermiştir. Mikro yapının olduğu kadar porozitenin de DIF değerlerini etkilediği görülmüş; bunun sebebi olarak ise boşluklardaki suyun varlığı öne sürülmüştür. Şekil 2.12'de çalışma kapsamında üretilen beton serilerinden bir tanesinin farklı darbe hızlarında yük-deplasman eğrilerinde oluşan farklılıklar gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Farklı darbe hızlarında yük-deplasman eğrisi (Aydın ve diğer., 2015)

Literatürde farklı araştırmacılar tarafından (Suaris ve Shah, 1983; Naaman ve Gopalaratnam, 1983; Banthia, 1987; Dancygier ve diğer., 2012; Zhang ve diğer., 2014) yapılan ağırlık düşürmeli darbe deneyleri sonucunda DIF değerleri maksimum yük için 1,5-4,98 arasında, kırılma enerjisi için ise 1,99-6,40 arasında değişmektedir.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Amaç

Bu çalışmanın amacı, farklı tip ve dozajda çelik lif kullanımının normal dayanımlı betonun statik yükler altında, yüksek dayanımlı betonun ise statik ve dinamik yükler altında mekanik özelliklerine etkisini belirlemektir.

3.2 Kapsam

Yapılan deneysel çalışmada, lif hacminin, uzunluğunun, görünüm oranının ve uç geometrisinin değişiminin betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Betona eklenen çelik liflerin görünüm oranı 40, 55, 65 ve 80 olup uzunlukları 30 mm ve 60 mm'dir. 3D, 4D ve 5D olmak üzere 3 farklı uç geometrisine sahip olan lifler, betona ağırlıkça 30 kg/m³ ile 60 kg/m³ (hacimce %0,38 ile %0,76) olarak ilave edilmiştir. Bu amaçla su/bağlayıcı (s/b) oranı 0,57 ve 0,36 olmak üzere 2 farklı kontrol betonu ve her iki sınıfta on ikişer seri çelik lifli beton olmak üzere toplam 26 seri beton üretilmiştir.

Dökülen her karışımın taze halde çökme ve birim hacim ağırlık (B.H.A.) değerleri ölçülmüş, üçer adet 15 cm ayrıtlı küp numune, normal dayanımlı seri için üçer adet, yüksek dayanımlı seri için ise altışar adet 100x100x600 mm'lik prizmatik kiriş numuneler alınmıştır. Alınan numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp yaklaşık 20 °C'deki suda 28 gün bekletilmiştir. Kür işleminin sonunda küp numunelere tek eksenli basınç deneyi, kiriş numunelere ise deplasman kontrollü eğilme deneyi yapılmıştır. Yüksek dayanımlı seride üçer tane kiriş numuneye ağırlık düşürmeli darbe deneyi yapılmıştır.

3.3 Kullanılan malzemeler

Üretilen karışımlarda çimento, uçucu kül, silis dumanı, su, kaba ve ince agregalar, çelik lif ve kimyasal katkı kullanılmıştır.

3.3.1 Çimento

Bu çalışmada, ana bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun üretici firmadan temin edilen bazı kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Çimentonun fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal özellikler	Oran (%)	Fiziksel özellikler	
SiO ₂	18,44	Özgül Ağırlık	3,10
Al ₂ O ₃	4,36	Özgül yüzey (Blaine) (m ² /kg)	343
Fe ₂ O ₃	3,22	Priz başlangıcı (sa.)	02:50
CaO	64,37	Priz sona ermesi (sa.)	04:40
MgO	1,23	Hacim Genleşmesi (mm)	0,5
Na ₂ O	0,47	Serbest CaO (%)	1,42
K ₂ O	0,80	Normal kıvam için gerekli su (%)	28,4
SO ₃	3,50	Kızdırma kaybı (%)	3,40
Cl ⁻	0,007	Çözünmeyen kalıntı (%)	0,27
C ₃ A	8,7	Basınç dayanımı (MPa)	
C ₄ AF	11,4	2 gün	30,1
C ₃ S	62	7 gün	45,8
C ₂ S	13,1	28 gün	53,8

3.3.2 Uçucu Kül

Deneyisel çalışmada, özgül ağırlığı 2,37 olan İZDEMİR ENERJİ A.Ş. ’den temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu külün tedarikçi firmadan temin edilen fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Uçucu külün fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Analizler	Sonuçlar	Deney Metodu	LİMİT DEĞERLER (TS EN 450-1)
SiO ₂ (%)	49,38	XRF METOT	(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) Min. %70
Al ₂ O ₃ (%)	22,65	XRF METOT	
Fe ₂ O ₃ (%)	8,548	XRF METOT	
CaO (%)	7,481	XRF METOT	
P ₂ O ₅ (%)	1,030	XRF METOT	
MgO (%)	1,749	XRF METOT	Max. %4
SO ₃ (%)	0,684	XRF METOT	Max. %3
Na ₂ O (%)	1,607	XRF METOT	
K ₂ O (%)	1,826	XRF METOT	
Cl (%)	<0,00020	XRF METOT	Max. %0,1
Serbest CaO (%)	0,77	TS EN 450-1	Max. %1,5
Eşdeğer Alkali (%) (Na ₂ O+0,658* K ₂ O)	2,81	XRF METOT	Max. %5
Kızdırma Kaybı (%)	2,69	TS EN 196-2	KATEGORİ A Kütlece Max. %5,0
45 µm elek üzeri (%)	17,64	TS EN 451-2	KATEGORİ N Max. %40
Su İhtiyacı (%)	92,4	TS EN 196-6	ANNEX B-450-1
Hacim Genleşmesi (mm)	3	TS EN 196-3	Deney Çimentosu için Max. %10
Aktivite İndeksi (%) (28 Günlük)	80,3	TS EN 450-1	Min. %75
Aktivite İndeksi (%) (90 Günlük)	92,1	TS EN 450-1	Min. %85

3.3.3 Silis dumanı

Deneysel çalışmada kimyasal özellikleri Tablo 3.3'te verilen ticari olarak da pazarlanan BASF firması tarafından temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. Kullanılan silis dumanının yoğunluğu 2,2 g/cm³, özgül yüzeyi 21080 m²/kg'dır.

Tablo 3.3 Silis dumanı kimyasal özellikleri

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Kızdırma kaybı
%	92,25	0,88	1,98	0,51	0,96	0,12	0,45	0,33	1,81

3.3.4 Karışım suyu

Deneysel çalışmalarda DEÜ Tınaztepe Yerleşkesi şebeke suyu kullanılmıştır.

3.3.5 Agregalar

Üretilen betonlarda, kireçtaşı kökenli, maksimum tane boyutu 15 mm olan üç farklı tane sınıfından (0-3 mm, 0-5 mm ve 5-15 mm) kırma agregalar kullanılmıştır. Kullanılan agregaların elek analizi sonuçları Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Kullanılan kaba ve ince agregaların elek analizi sonuçları

Elek No	Elekten geçen (%)		
	5-15	0-5	0-3
32	100	100	100
16	100	100	100
8	34	100	100
4	1	90	100
2	1	55	76
1	0	39	50
0,5	0	21	30
0,25	0	15	20

3.3.6 Çelik Lif

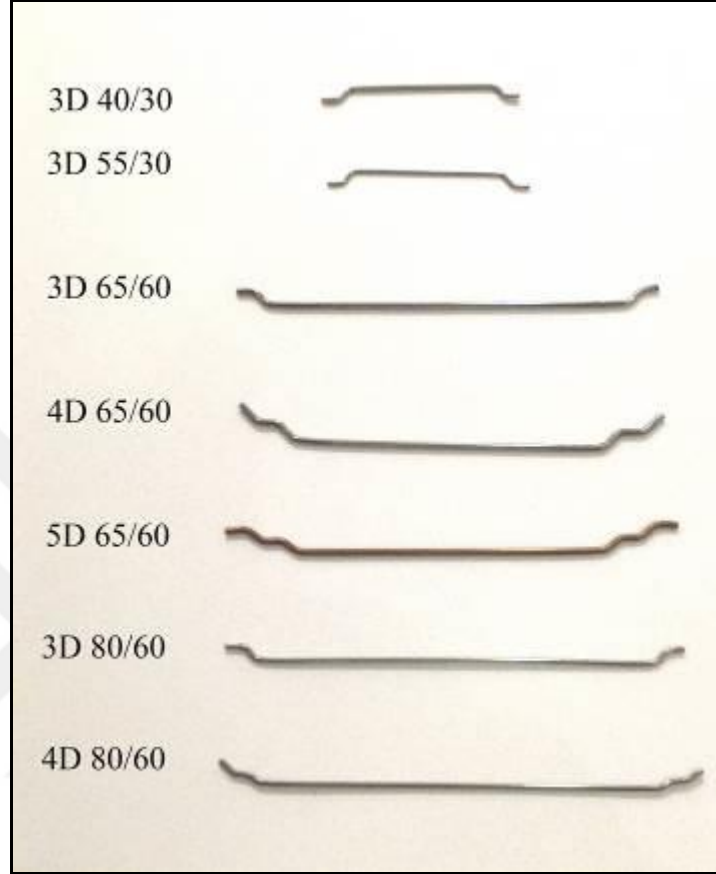
Deneyisel çalışmalarda Bekaert firmasından temin edilen yedi tür Dramix tipi uçları kancalı çelik lif kullanılmıştır. Kullanılan çelik liflerin özellikleri Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Tablo 3.5 Deneyisel çalışmada kullanılan çelik liflerin özellikleri

Lif Tipi	Kanca Tipi	Görünüm Oranı	Boy (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)
3D40/30	3D	40	30	0,75	1225
3D55/30	3D	55	30	0,55	1345
3D65/60	3D	65	60	0,90	1160
4D65/60	4D	65	60	0,90	1500
5D65/60	5D	65	60	0,90	2300
3D80/60	3D	80	60	0,75	1225
4D80/60	4D	80	60	0,75	1800

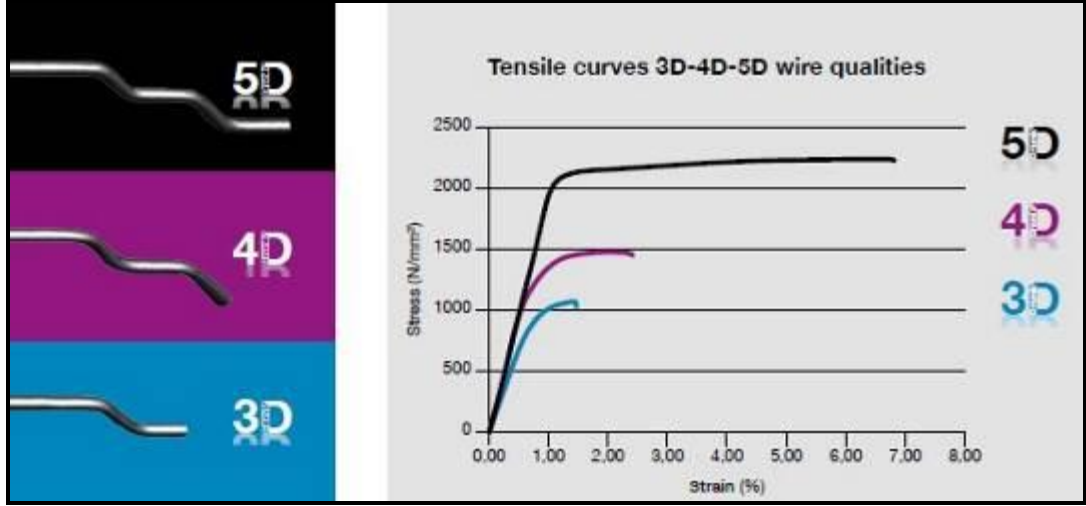
Lif boyutları 30 ve 60 mm olup, görünüm oranları 40, 55, 65 ve 80'dir. Bu çelik lifler, soğukta çekilmiş, ucu kancalı ve yüksek çekme dayanımına sahiptir. Lifler suda eriyebilen özel tutkal ile birbirine yapıştırılmış demetler halindedir. Her iki ucunda birer kanca olan lifler 3D, ikişer kanca olanlar 4D ve üçer kancalı olanlar 5D

olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.1’de kullanılan çelik liflerin fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 3.1 Deneyisel çalışmada kullanılan çelik liflerin fotoğrafları (Kişisel arşiv, 2017)

Üretici firma kataloglarında 3D liflerin kaplamalarda, 4D liflerin tabliye, temel ve beton yollarda, 5D liflerin köprüler ve yapısal uygulamalarda kullanımı önerilmiştir. Şekil 3.2’de 3D, 4D ve 5D liflere ait üretici firmanın katalogundan alınan gerilme-birim şekil değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.2 3D-4D-5D gerilme-birim şekil değişimi grafiği

3.3.7 Kimyasal Katkı

Çalışmada, BASF Yapı Kimyasalları üretimi MasterGlenium ACE 30 yüksek oranda su azaltıcı beton katkısı kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkının üretici firma kataloğundan temin edilen teknik özellikleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 Kimyasal katkının özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,06-1,07 kg/litre
Klor İçeriği % (EN 480-10)	<0,1
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	<3

3.4 Beton Karışımların Hazırlanması

Beton üretiminde, laboratuvar tipi yatay eksenli 100 lt kapasiteli betoniye kullanılmıştır (Şekil 3.3). Betoniye önce iri agreg, daha sonra ince agreg en son çimento ve uçucu kül/silis dumanı konularak kuru karışım 1 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyu, süper akışkanlaştırıcı ile betoniye yavaş bir şekilde yaklaşık 1 dakikada ilave edilmiş ve ıslak karışım yaklaşık 2 dakika karıştırılmıştır.

Çelik lifler, beton karışımına yavaş yavaş eklenmiş, homojen bir karışım elde edilene kadar yaklaşık 2 dakika daha karıştırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.3 Beton karışımlarının yapıldığı mikser (Kişisel arşiv, 2017)

3.5 Numunelerin Döküm ve Yerleştirme İşlemi

Bu çalışma kapsamında yapılacak deneyler için 2 farklı boyutta örnekler hazırlanmıştır. Bu örnekler, 150 mm ayrıtlı küp ve 100x100x600 mm boyutlarında prizmadır. Üretilen betonların kalıplara yerleştirilme işlemi, küp ve prizmatik numunelerde iki katman halinde yapılmıştır. Kalıbına yerleştirilen betonun sıkıştırılmasında tabla tipi vibratör kullanılmış ve bu işlem 30 ± 15 sn'de yapılmıştır.

3.6 Numunelerin Kür İşlemi

Tüm beton numuneler; döküm işlemlerinden 24 saat sonra kalıplarından çıkarılıp 28 gün süreyle 20 °C sıcaklıkta su içerisinde kür edilmiştir. Kür süresinin sonunda numuneler kuru yüzey doygun halde deneye tabi tutulmuştur.

3.7 Hazırlanan Karışımlar

Deneysel çalışma kapsamında normal ve yüksek dayanımlı olmak üzere iki matris baz alınarak bu matrislerin on ikişer adet lif takviyeli kompozitleri de dahil olmak üzere toplamda 26 parti beton karışımı hazırlanmıştır.

Hazırlanan karışımların adlandırılmasında kullanılan karışım kodları sırasıyla beton sınıfını, lif ucu kanca parametresini, görünüm oranını, lif boyunu ve hacimce lif dozajını göstermektedir. Örneğin: N5D6560/0,38, normal dayanımlı beton, 5D lif, görünüm oranı 65, lif uzunluğu 60 mm olan ve hacimce %0,38 lif içeren betonu ifade etmektedir.

3.7.1 Normal Dayanımlı Seri

Deneysel çalışmada normal dayanımlı seride su/bağlayıcı oranı 0,57 olup, toplam bağlayıcı dozajı 360 kg'dır. Bağlayıcısı, Portland çimentosu ve uçucu külden oluşmaktadır.

Kullanılan çelik lifler metreküpte 0, 30 ve 60 kg dozlarında kullanılmıştır. Üretilen betonların çökme değeri 85 ± 20 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu çökme değerini sağlayabilmek için karışımlarda süper akışkanlaştırıcı katkı (SA) kullanılmıştır. Normal dayanımlı seriye ait üretilen betonların isimlendirilmesi ve karışım bilgileri Tablo 3.7'de görülmektedir.

Tablo 3.7 Normal dayanımlı seri beton dizaynları

BETON KODU	Lif (Kg)	Çimento (Kg)	UK (Kg)	Su (Kg)	Agrega (Kg)			SA (Kg)
					0-3	0-5	5-15	
N0	0	290	70	205	351,7	527,5	879,1	0,91
N3D6560/0,38	30	290	70	205	349,6	524,4	874,0	1,64
N3D6560/0,76	60	290	70	205	347,6	521,3	868,9	2,32
N4D6560/0,38	30	290	70	205	349,6	524,4	874,0	1,64
N4D6560/0,76	60	290	70	205	347,6	521,3	868,9	2,32
N5D6560/0,38	30	290	70	205	349,6	524,4	874,0	1,73
N5D6560/0,76	60	290	70	205	347,6	521,3	868,9	2,32
N3D8060/0,38	30	290	70	205	349,6	524,4	874,0	1,64
N3D8060/0,76	60	290	70	205	347,6	521,3	868,9	2,32
N4D8060/0,38	30	290	70	205	349,6	524,4	874,0	1,64
N4D8060/0,76	60	290	70	205	347,6	521,3	868,9	2,32
N3D4030/0,76	60	290	70	205	347,6	521,3	868,9	2,00
N3D5530/0,76	60	290	70	205	347,6	521,3	868,9	2,00

3.7.2 Yüksek Dayanımlı Seri

Deneyssel çalışmada yüksek dayanımlı seride su/bağlayıcı oranı 0,36 olup, bağlayıcı madde olarak Portland çimentosu ve silis dumanı kullanılmıştır.

Kullanılan çelik lifler metreküpte 0, 30 ve 60 kg dozlarında kullanılmıştır. Üretilen betonlarda çökme değeri 150 ± 20 mm olacak şekilde süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı seriye ait üretilen betonların isimlendirilmesi ve karışım bilgileri Tablo 3.8’de görülmektedir.

Tablo 3.8 Yüksek dayanımlı seri beton dizaynları

BETON KODU	Lif (Kg)	Çimento (Kg)	SD (Kg)	Su (Kg)	Agrega (Kg)			SA (Kg)
					0-3	0-5	5-15	
Y0	0	420	30	162	325,4	488,1	994,3	4,17
Y3D6560/0,38	30	420	30	162	323,6	485,3	988,6	5,00
Y3D6560/0,76	60	420	30	162	321,7	482,6	983,0	6,67
Y4D6560/0,38	30	420	30	162	323,6	485,3	988,6	5,83
Y4D6560/0,76	60	420	30	162	321,7	482,6	983,0	6,67
Y5D6560/0,38	30	420	30	162	323,6	485,3	988,6	5,83
Y5D6560/0,76	60	420	30	162	321,7	482,6	983,0	6,67
Y3D8060/0,38	30	420	30	162	323,6	485,3	988,6	5,00
Y3D8060/0,76	60	420	30	162	321,7	482,6	983,0	6,67
Y4D8060/0,38	30	420	30	162	323,6	485,3	988,6	5,83
Y4D8060/0,76	60	420	30	162	321,7	482,6	983,0	6,67
Y3D4030/0,76	60	420	30	162	321,7	482,6	983,0	6,67
Y3D5530/0,76	60	420	30	162	321,7	482,6	983,0	6,67

3.8 Yapılan Deneyler

Deneyisel çalışma kapsamında üretilen beton numunelere, taze halde çökme ve birim hacim ağırlık deneyleri, sertleşmiş halde ise tek eksenli basınç deneyi, üç noktalı eğilme deneyi ve ağırlık düşürmeli darbe deneyleri uygulanmıştır.

3.8.1 Taze Hal Deneyleri

Betonun işlenebilirliğini ölçebilmek için TS EN 12350-2'ye göre çökme deneyi ve TS EN 12350-6'ya göre birim hacim ağırlık tayini yapılmıştır.

3.8.2 Basınç Deneyi

Basınç deneyleri 300 ton kapasiteli ELE marka yük kontrollü, hidrolik sistemle çalışan pres makinesinde yapılmıştır (Şekil 3.4). 15x15x15 cm'lik küp numunelerde basınç deneyi standart olarak 3,5 kN/saniye hızda yükleme yapacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.4 Basınç deneylerinin gerçekleştirildiği pres (Kişisel arşiv, 2017)

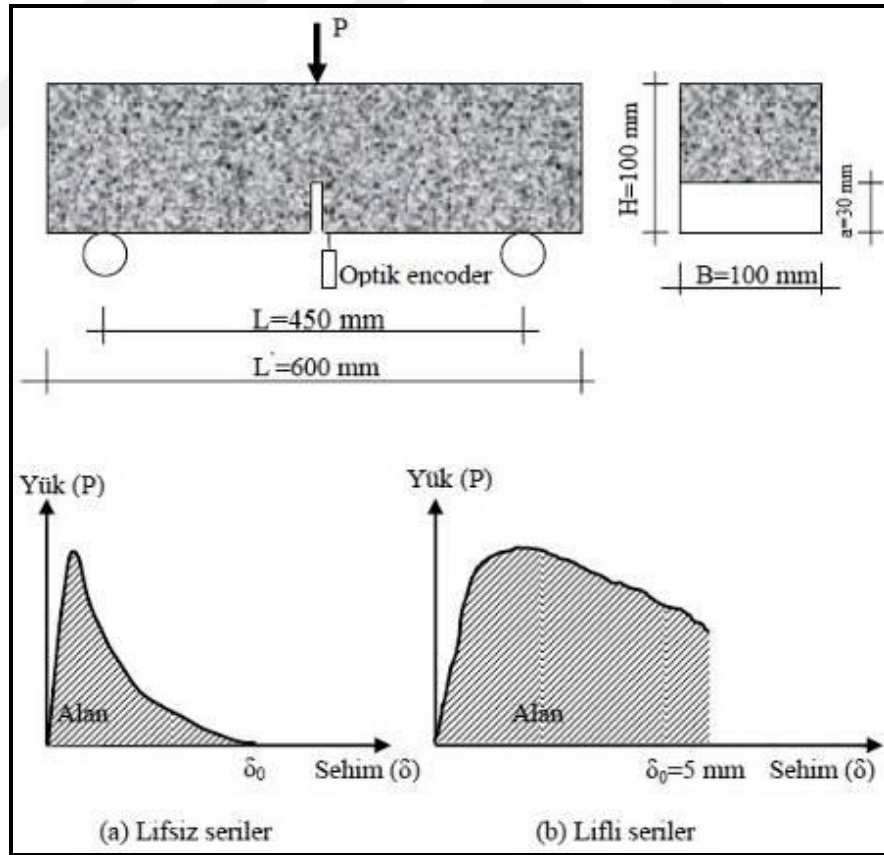
3.8.3 Eğilme Deneyi

Beton serilerinin eğilme dayanımının ve kırılma enerjilerinin belirlenmesinde sulu kesimle orta noktasına çentik açılmış 100x100x600 mm boyutundaki prizmatik örnekler kullanılmıştır. Üç noktalı eğilme deneyi RILEM TC-50 FMC (1985), Kırılma Mekanikliği Teknik Komitesi'nce önerildiği üzere çentikli numunelerde, 450 mm mesnet açıklığı kullanılarak belirlenmiştir. Elmas bıçakla sulu kesimde açılan çentiğin genişliği 4 mm, derinliği ise 30 mm'dir. Bu şekilde eğilmeye çalışan etkin kesit alanı 100x70 mm olmaktadır. Çentikli numunelerin tümü deney sırasında eşdeğerliliğin sağlanması amacıyla suya doygun halde kırılmıştır. Deney sırasında kapalı devre modun sağlanması, numunelerin ani kırılma yapmadan tamamen ayrılana kadar yük-sehim eğrisinin çıkartılabilmesi için numune orta nokta sehimlerini ölçen Heidenhein marka 1 µm ölçüm hassasiyetinde optik kodlayıcı (encoder) verileri kullanılmıştır. Kullanılan eğilme presi çerçevesi 100 kN, yükleme hücresi ise 20 kN kapasiteli ve $\pm 0,5\%$ hassasiyetindedir (Şekil 3.5). Deney lifsiz numuneler için 0,02 mm/dak, lifli numuneler için 0,2 mm/dak hızında gerçekleştirilmiş olup, lifsiz numuneler tamamen ayrılıp hiç yük taşıyamaz duruma gelinceye dek, lifli numuneler 5 mm orta nokta sehimine ulaşıncaya dek sürdürülmüştür.



Şekil 3.5 Eğilme deneylerinin gerçekleştirildiği pres (Kişisel arşiv, 2017)

Şekil 3.6’da şematik deney düzeneği ile temsili yük–orta nokta sehim eğrileri görülmektedir.



Şekil 3.6 Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi için şematik deney düzeneği ile temsili yük-sehim eğrileri

Üç noktalı eğilme deneyi sonucunda çentikli numunelerin eğilme dayanımları (f_{flex}) (3.1) denklemi ile belirlenmiştir.

$$f_{flex} = \frac{3.P.L}{2.B.(H - a)^2} \quad (3.1)$$

Bu denklemde P , L , B , H ve a sırasıyla üç noktalı eğilme deneyinde kaydedilen maksimum yük, mesnet açıklığı, kiriş eni, kiriş yüksekliği ve çentik derinliğidir.

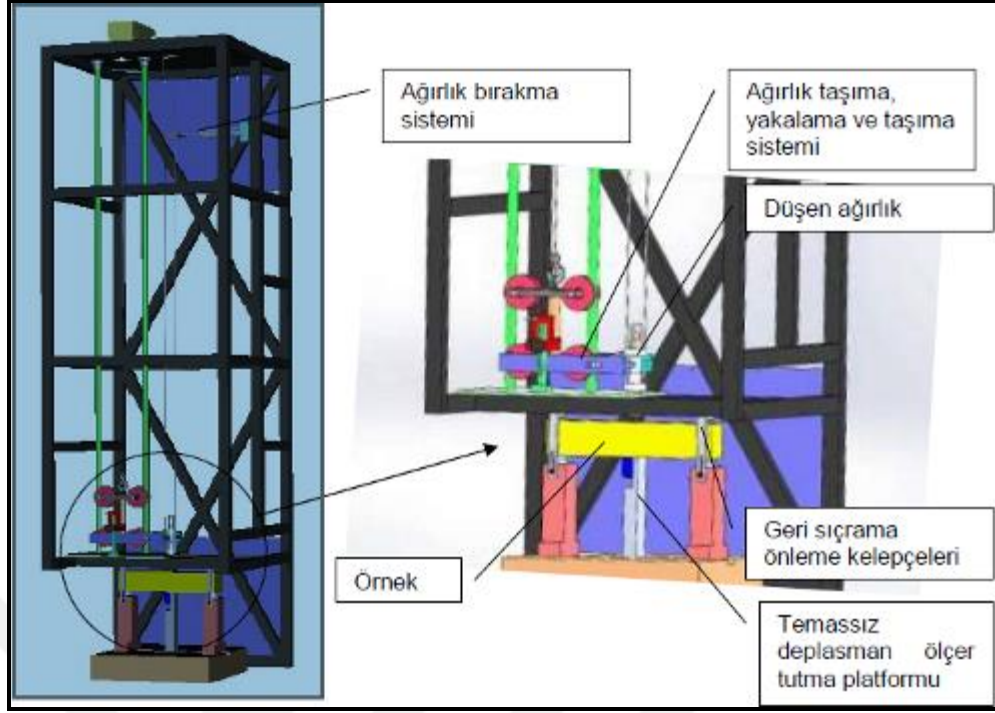
Kırılma enerjileri yük–sehim eğrilerinin altında kalan alan kullanılarak RILEM TC-50 FMC (1985), tarafından önerilen (3.2) denklemi ile belirlenmiştir.

$$G_F = \frac{W_0 + m \cdot \frac{L}{L'} \cdot g \cdot \delta_0}{B.(H - a)} \quad (3.2)$$

Bu ifadede W_0 yük–sehim eğrisi altında kalan alanı, m numunenin ağırlığını, L mesnet açıklığını, L' numune boyunu, g yerçekimi ivmesini ($9,81 \text{ m/s}^2$), δ_0 göçme anında açıklık ortasında son sehimini (bu değer lifli numuneler için 5 mm 'dir), B kiriş enini, H kiriş yüksekliğini ve a ise çentik derinliğini göstermektedir. Kırılma enerjisi (G_F), N/m veya Joule/m^2 olarak ifade edilir.

3.8.4 Darbe Deneyi

Hazırlanan karışımların darbe yükleri altında yük-sehim eğrileri, eğilme dayanımları ve kırılma enerjileri 112M262 numaralı TÜBİTAK projesi ekibince tasarlanan darbe deney düzeneği kullanılarak belirlenmiştir. Darbe deney düzeneğinin mekanik aksamının tasarımı aşamasında cihazın üretimini yapan TOTOMAK firmasınca oluşturulan katı model çizimi Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7 Darbe düzeneği mekanik aksam katı modeli

Darbe deney sisteminde beton numune üzerine düşürülecek ağırlık asansör sistemiyle istenilen yüksekliğe otomatik olarak kaldırılmaktadır. Düşen ağırlık, düşeyde çelik aksam boyunca uzanan iki adet ince çelik çubuğun kılavuzluğunda düşüşünü gerçekleştirmektedir. Ağırlık, aşağıda mesnetlenmiş kirişe çarptıktan sonra inductive tipte temassız bir sensör çelik ağırlığı algılamakta ve bu kez asansör sisteminin kolları harekete geçerek çelik ağırlığı yakalayıp yeniden otomatik olarak yukarıdaki düşü kotuna çıkarmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan darbe deneylerinde kiriş örneklerin mesnet açıklığı statik yüklemelerde de olduğu gibi 450 mm olarak ayarlanmıştır. Deneyler 4278 g'lık ağırlık 2000 mm yükseklikten düşürülerek gerçekleştirilmiştir. Sürtünmenin ihmal edildiği teorik serbest düşüş denklemine göre kirişe çarpma anındaki hız $V=6,26$ m/sn olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.8'de 112M262 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında tasarlanan ve üretimi yaptırılan darbe deney sistemi görülmektedir.



Şekil 3.8 112M262 numaralı proje ekibince tasarlanan ve üretilen darbe deney sistemi (Kişisel arşiv, 2017)

Şekil 3.9’da darbe deneyi esnasında kirişin mesnetlenme durumu ile orta nokta deplasmanını ölçmek için kullanılan lazer sensör görülmektedir.



Şekil 3.9 Darbe deneyi sonrası kirişin durumu (Kişisel arşiv, 2017)

Oluşturulan darbe sisteminin elektronik aksamı, darbe deney sistemlerinde son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan piezoelektrik yük hücreleri, ivmeölçerler, temassız deplasman ölçer ve bunların verilerini bilgisayar sisteminde PCI veri yolu ile bağlı bulunan veri toplama kartına almakta kullanılan ara elektronik düzenekleri içermektedir.

Sistem saniyede 200.000 veri (200 kHz) örnekleme hızında ağırlığın serbest düşmeye bırakılmasından hemen önce çalıştırılarak 3 saniye boyunca toplamda 600.000 veri toplayacak şekilde ayarlanmıştır. Milisaniyeler içerisinde gerçekleşen darbe olayının analizinin yapılabilmesi için gereksiz olan verilerin temizlenmesi gerekmektedir. Bunun için 112M262 numaralı proje kapsamında Matlab programında yazılan kod ile her bir deney sonucunda darbe sürecinin başlangıcı ve sonucu otomatik olarak elde edilmiştir. Matlab programında yazılan kod ile ayrıca volt olarak elde edilen sensör çıkışları her bir sensörün üreticisi tarafından sağlanan kalibrasyon verileri kullanılarak kuvvet, ivme, deplasman gibi fiziksel büyüklüklere çevrilmiş ve kaydedilmiştir. Bu işlemle fazla sayıdaki veri sadece darbe olayını içeren 10 milisaniyelik süreyi içeren 5000 civarında veriye düşürülmüştür.

Bu tez kapsamında yapılan hesaplamalar, literatürde belirtildiği gibi kaydedilen mesnet reaksiyonları esas alınarak yapılmıştır. Literatürde belirtildiği gibi, basit mesnetlenmiş lifli veya lifsiz kiriş örnekler üzerine belirli bir ağırlıktan rijit cisim düşürülmesi durumunda öncelikle kirişe çarpan rijit cisim ile kiriş arasında bir temas kuvveti oluşacaktır (P_t). Ancak bu temas kuvveti kirişte deformasyona neden olarak kırılmaya yol açan ve kirişin eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi hesaplarında kullanılan kuvvet değildir. Temas kuvveti çarpma etkisi ile kirişte oluşan atalet kuvvetleri (P_i) ve kirişe aktarılan ve kirişin kırılmasına neden olan net kuvvetin toplamına eşittir. Kirişte kırılmaya neden olan net kuvvet ise mesnet reaksiyonlarının toplamına (P_b) eşittir. Sistemdeki dinamik denge (3.3) ifadesiyle verilmektedir.

$$P_{t(t)} = P_{b(t)} + P_{i(t)} \quad (3.3)$$

Bu ifadede $P_{t(t)}$ rijit cismin basit mesnetli kirişe çarpması ile kiriş ile çarpan cisim arasında oluşan temas kuvveti, $P_{i(t)}$ kirişe etkiyen atalet kuvveti, $P_{b(t)}$ kirişe aktarılan ve mesnet reaksiyonlarının toplamından oluşan kiriş net kuvvetidir. Darbe etkisine maruz kalan eğilme örneklerinin eğilme dayanımı ve kırılma enerjilerinin hesaplanması için gerekli olan yük-sehim eğrileri yukarıdaki denklemde gösterilen $P_{b(t)}$ kiriş net kuvvetine göre çizilmekte, $P_{t(t)}$ ve $P_{i(t)}$ ise hesaplamalarda dikkate alınmamaktadır. Bu çalışmada kirişe etkiyen net kuvvetin ($P_{b(t)}$) elde edilebilmesi için her iki mesnete de birer tane piezoelektrik yük hücresi konularak darbe olayı sırasında mesnetlerde oluşan kuvvet, zaman tanım aralığında elde edilmiştir.



BÖLÜM DÖRT

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1 Taze Hal Deney Sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında üretilen tüm beton serilerine taze halde çökme deneyi ve B.H.A. deneyi yapılmıştır. Tablo 4.1’de tüm serilerin taze haldeki birim hacim ağırlık ve çökme değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1 B.H.A ve çökme değerleri

BETON KODU	Lif (Kg/m ³)	S.A (Kg/m ³)	B.H.A (Kg/m ³)	Çökme (mm)	BETON KODU	Lif (Kg/m ³)	S.A (Kg/m ³)	B.H.A (Kg/m ³)	Çökme (mm)
N0	0	0,91	2340	65	Y0	0	4,17	2400	170
N3D6560/0,38	30	1,64	2340	65	Y3D6560/0,38	30	5,00	2470	130
N3D6560/0,76	60	2,32	2340	85	Y3D6560/0,76	60	6,67	2610	145
N4D6560/0,38	30	1,64	2370	70	Y4D6560/0,38	30	5,83	2500	130
N4D6560/0,76	60	2,32	2360	100	Y4D6560/0,76	60	6,67	2560	130
N5D6560/0,38	30	1,73	2380	75	Y5D6560/0,38	30	5,83	2510	140
N5D6560/0,76	60	2,32	2370	80	Y5D6560/0,76	60	6,67	2600	130
N3D8060/0,38	30	1,64	2360	70	Y3D8060/0,38	30	5,00	2510	130
N3D8060/0,76	60	2,32	2410	80	Y3D8060/0,76	60	6,67	2640	150
N4D8060/0,38	30	1,64	2390	65	Y4D8060/0,38	30	5,83	2510	130
N4D8060/0,76	60	2,32	2380	90	Y4D8060/0,76	60	6,67	2640	130
N3D4030/0,76	60	2,00	2370	100	Y3D4030/0,76	60	6,67	2510	170
N3D5530/0,76	60	2,00	2320	105	Y3D5530/0,76	60	6,67	2620	170

Çelik lif hacminin işlenebilirliği etkileyen esas parametre olduğu görülmektedir. Artan lif hacmi işlenebilirliği olumsuz etkilemiş, akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacını arttırmıştır. Genel olarak, betona eklenen çelik liflerin uç geometrisindeki karmaşıklığın, lif uzunluğunun ve lif görünüm oranının artışı işlenebilirliği bir miktar olumsuz etkilemiştir. Bu olumsuzluk betonun yerleştirilmesini etkileyecek düzeyde olduğunda kimyasal akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmıştır.

Kullanılan çelik lif uç geometrisi ile işlenebilirlik arasında zayıf da olsa bir ilişki söz konusudur. 4D ve 5D uç geometrisine sahip liflerin 3D liflere göre işlenebilirliği hafifçe olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Bu etkiler bazı durumlarda çökme

deneylerinde fark edilmese bile, taze haldeki betonları karıştırma ve yerleştirme esnasında açıkça fark edilmiştir.

Lif hacmi arttıkça işlenebilirliği normal dayanımlı betona göre daha yüksek olan yüksek dayanımlı betonun birim hacim ağırlığı belirgin bir şekilde artmıştır. Normal dayanımlı betonda ise düşük düzeyde birim hacim ağırlık artışı oluşmuş veya değişmemiştir. Bundaki temel sebep yüksek dayanımlı beton karışımlarının bağlayıcı miktarının ve kıvamının daha yüksek olmasıdır.

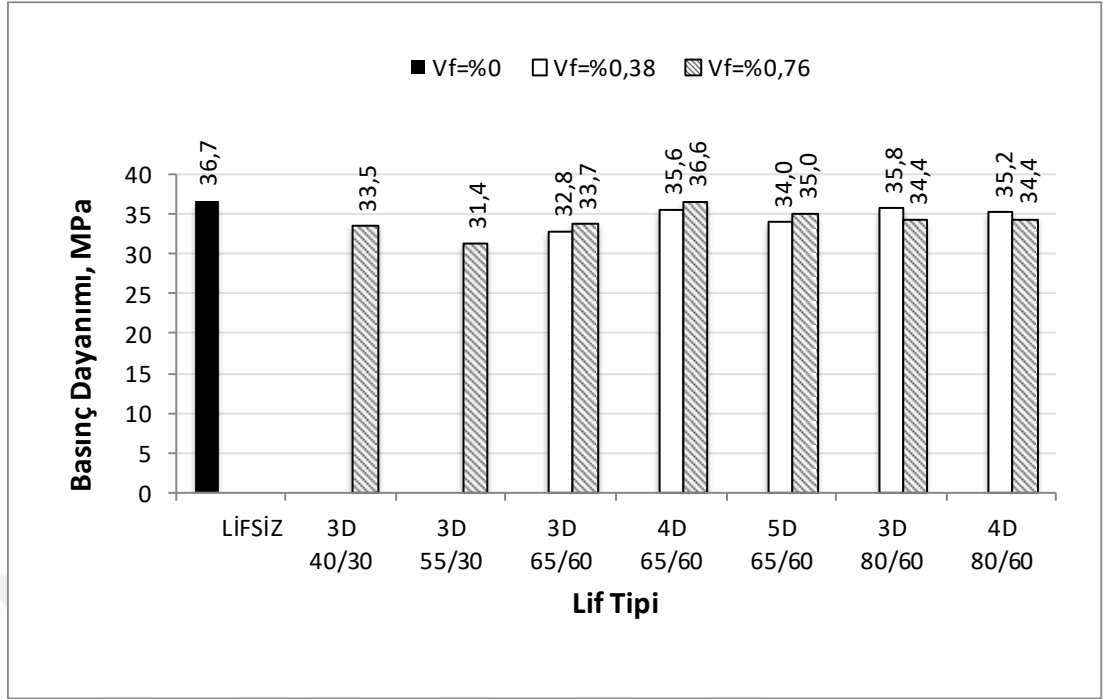
Yüksek dayanımlı seride lif hacmi %0'dan %0,38'e çıkılmasıyla birim hacim ağırlıklarında %4 oranında artış görülmüş, lif hacminin %0,76'ya çıkarılmasıyla bu artış %11 seviyesine ulaşmıştır. Normal dayanımlı seride ise lif varlığında birim hacim ağırlıklarda belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum işlenebilirliği daha yüksek olan yüksek dayanımlı beton serisinin akıcılık ve yerleşme özelliklerinin daha iyi olması ile açıklanabilir.

4.2 Sertleşmiş Haldeki Deney Sonuçları

Deneyisel çalışma kapsamında, 28 gün kür görmüş 3'er adet numuneye normal dayanımlı seride basınç ve eğilme deneyleri, yüksek dayanımlı seride ise basınç, eğilme ve darbe deneyleri uygulanmıştır.

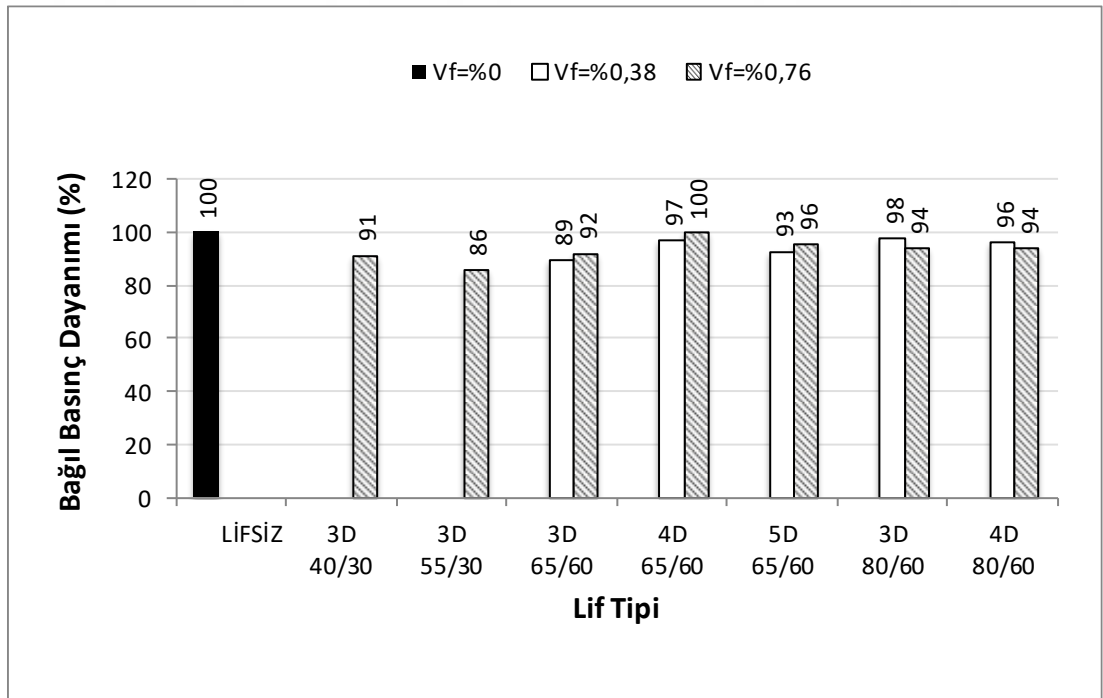
4.2.1 Normal Dayanımlı Seri Basınç Deneyi Sonuçları

Normal dayanımlı seride lifsiz matris ortalama 36,7 MPa basınç dayanımına sahipken, 30 kg lif içeren 5 karışımda ortalama 34,7 MPa, 60 kg lif içeren 7 karışımda ise ortalama 34,2 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir (Şekil 4.1). Buradan normal dayanımlı matrise 30 kg lif eklemenin ortalama %5,5 oranında, 60 kg lif eklemenin ise %6,9 oranında basınç dayanım azalmasına yol açtığı görülmüştür.



Şekil 4.1 N serisi basınç dayanımları

Şekil 4.2’de lifsiz seri %100 kabul edilerek bağıl basınç dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.2 N serisi bağıl basınç dayanımları

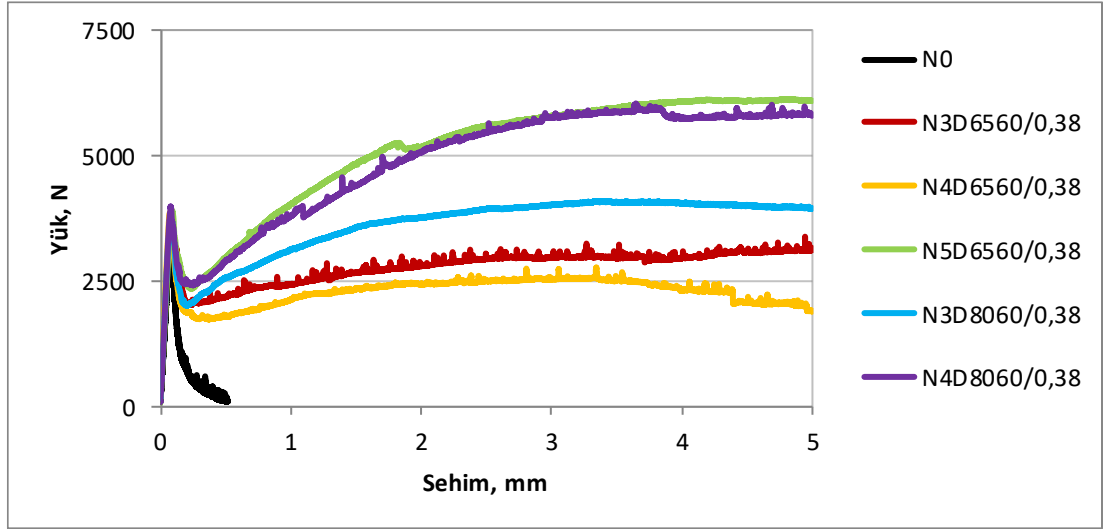
Literatürde bu hacimlerde çelik lif içeren normal dayanımlı betonlarda basınç dayanımının %10 mertebesinde artış gösterebileceği gibi değişmeyebileceği ya da bir miktar düşüş yaşayabileceği bilgisi mevcuttur. Lifli betonda oluşan bu basınç dayanımı azalmasının liflerin sisteme katılmasıyla zorlaşan sıkıştırma ve bunun sonucunda lifsiz betonlara göre daha fazla boşluk içeren bir yapının oluşması olarak açıklanmaktadır (Yiğiter, 2002).

4.2.2 Normal Dayanımlı Seri Eğilme Deneyi Sonuçları

Normal dayanımlı seride kiriş örnekler üzerinde yapılan statik eğilme deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrileri incelenmiş, eğilme dayanımları ve kırılma enerjileri hesaplanmıştır.

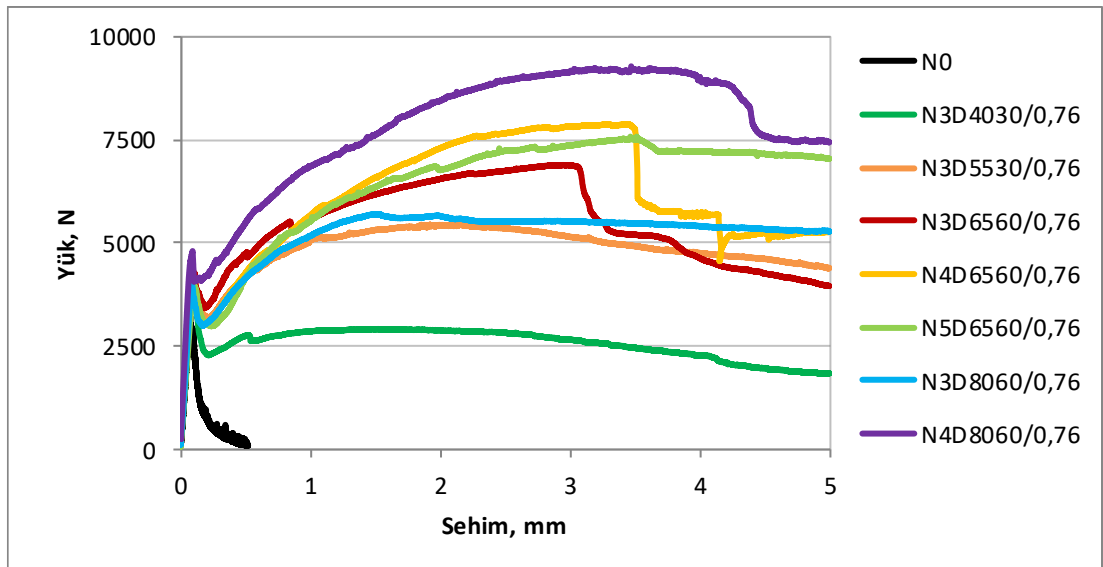
4.2.2.1 Normal Dayanımlı Seri Yük-Sehim Eğrileri

Normal dayanımlı serinin %0,38 lif hacmine sahip örneklerinin eğilme yükleri altında elde edilen yük-sehim eğrileri Şekil 4.3'de, %0,76 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri ise Şekil 4.4'te verilmiştir. Her bir seri için 3'er adet kiriş örnek kullanılmış, grafiklerde ortalama davranışı en iyi temsil eden eğriler verilmiştir. Görüldüğü gibi, çelik lif kullanıldığında numunelerin eğilme davranışında lifsiz kontrol betonuna kıyasla önemli gelişmeler oluşmuştur. Lifsiz beton maksimum yükte 0,07 mm orta nokta deplasmanı yapmış, nihai olarak ise 0,5 mm deplasmana ulaşmıştır.



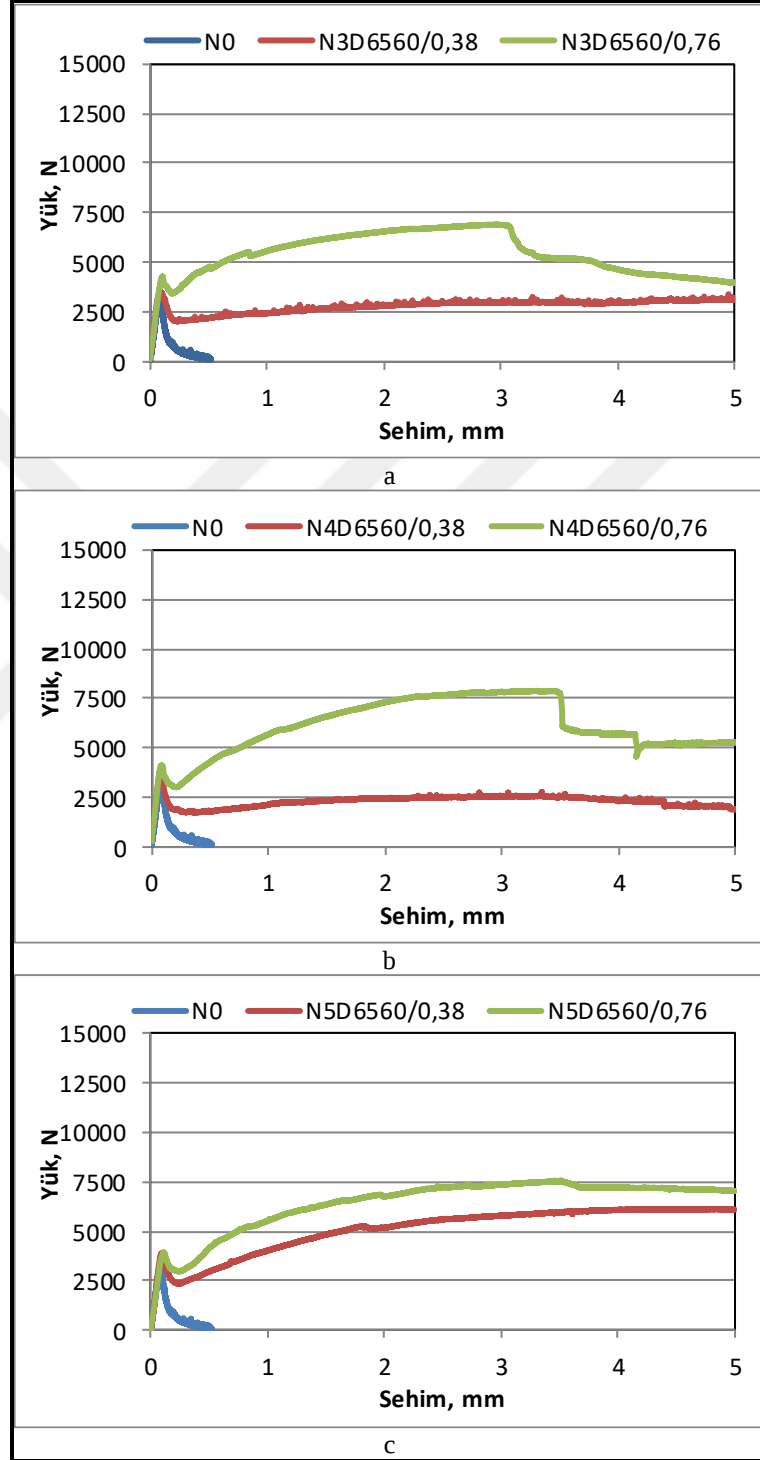
Şekil 4.3 N serisi %0,38 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri

Kullanılan lif hacmi %0,76 olduğunda eğilme davranışındaki gelişmeler çok daha belirgin hale gelmiştir. Eğilme dayanımını oluşturan tepe yüküne 2 ile 4 mm civarında ulaşılmıştır. Burada kısa ve düşük görünüm oranı değerine sahip liflerle üretilen N3D4030/0,76 serisi hariç tüm serilerde deformasyon sertleşmesi davranışı görülmüştür. N4D6560/0,76 serisinde numune 3,5 ve 4 mm sehime ulaştığı esnada yükte görülen ani düşüşler lif kopması sonucu oluşmuştur.



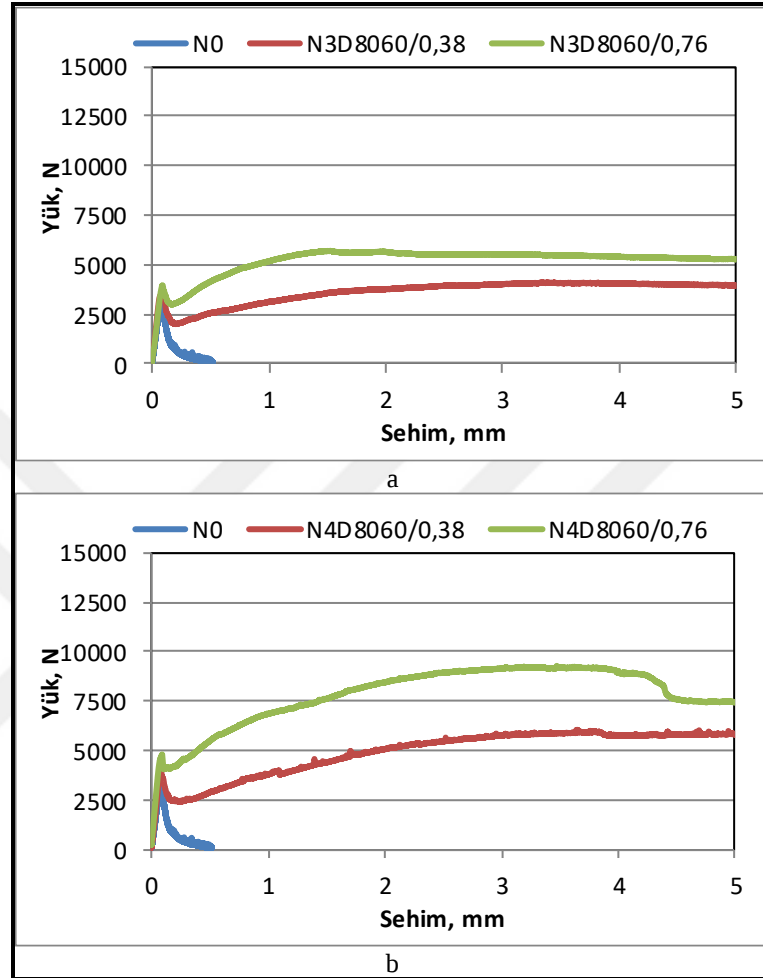
Şekil 4.4 N serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da her lif tipi için farklı lif hacimlerindeki yük-sehim eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.5 N serisi lif hacmine bağlı yük-sehim eğrileri a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60

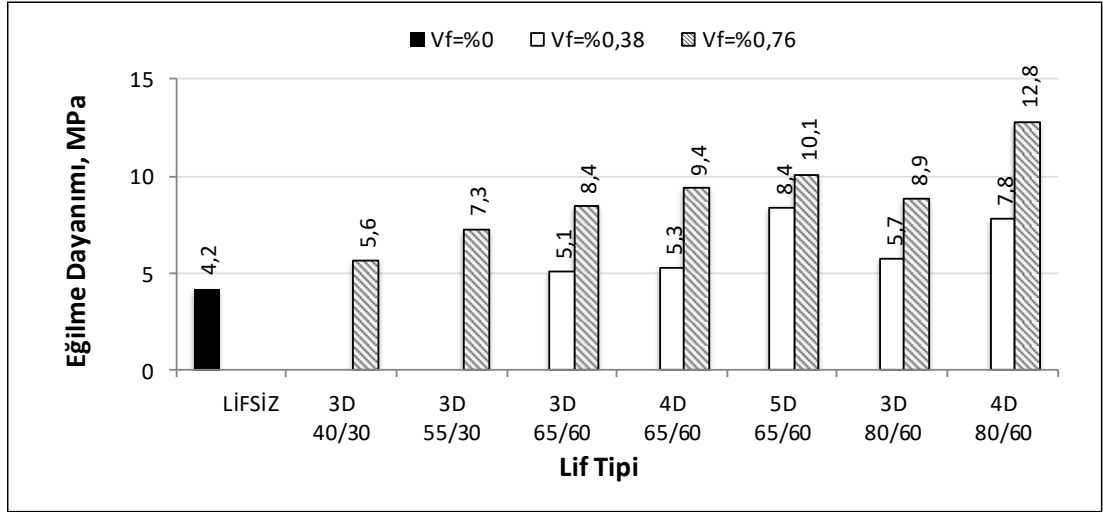
N5D65/60 ve N4D80/60 serilerinin düşük lif dozajında yüksek lif dozajındaki davranışına diğer serilerle kıyaslandığında daha yakın performans elde edilmiştir.



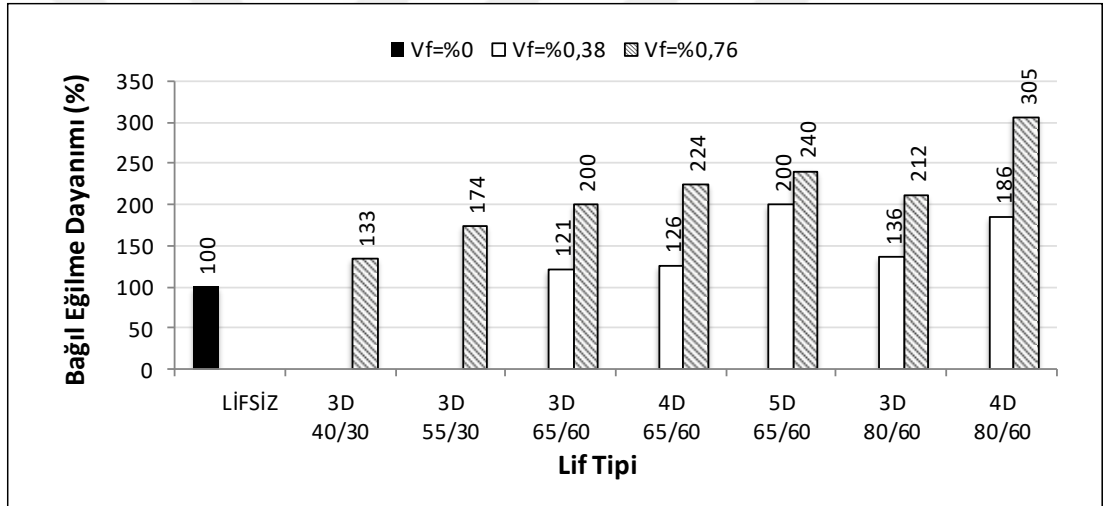
Şekil 4.6 N serisi lif hacmine bağlı yük-sehim eğrileri a) 3D 80/60, b) 4D 80/60

4.2.2.2 Normal Dayanımlı Seri Eğilme Dayanımları

Çelik liflerin betonda kullanılmasıyla eğilme dayanımlarında artış oluşmuştur. Şekil 4.7’de normal dayanımlı seride farklı miktar ve özelliklerde lif kullanımında elde edilen eğilme dayanımları, Şekil 4.8’de lifsiz seriye kıyasla bağlı eğilme dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.7 N serisi eğilme dayanımları



Şekil 4.8 N serisi bağıl eğilme dayanımları

Normal dayanımlı seride lifsiz betonun eğilme dayanımı 4,2 MPa iken %0,38 oranında lif kullanımıyla %21 ile %100 arasında artış oluşmuştur. En küçük artış %21 ile 3D 65/60 lifi ile oluşurken en büyük artış %100 ile 5D 65/60 lifi ile olmuştur. Hemen arkasından ise %86 artış ile 4D 80/60 lifine sahip betonlar gelmiştir. Burada eğilme dayanımı artışındaki etkenler lif görünüm oranı, uç geometrisi değişimi ve lif çekme dayanımıdır. Tablo 3.5'ten görüleceği üzere kanca sayısı fazla olan liflerin çekme dayanımı daha yüksektir. Kanca sayısı arttıkça liflerin matrisle aderansı artacağından liflerde oluşan kopmayı engellemek için üretici firma tarafından lifler daha yüksek dayanımda üretilmiştir. Yüksek çekme dayanımı ve

gelişmiş lif uç geometrisine sahip 4D ve 5D türü liflerin, artan kanca sayısı nedeniyle matrise mekanik ankrajının artması, mukavemetinin yüksek olması nedeniyle kancanın plastik deformasyonun daha yüksek gerilme seviyelerinde gerçekleşmesi ve ayrıca Isla, Ruano ve Luccioni, (2015) tarafından da belirtildiği gibi kancanın plastik deformasyonunu takiben kanca kıvrım bölgelerinin tam olarak düzelmemesi nedeniyle ilave sürtünme kuvvetlerinin oluşması yüksek eğilme performansının başlıca nedenlerindendir.

Görünüm oranının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓3D kanca geometrisinde 80/60 lif kullanımıyla 65/60 lif kullanımına oranla betonun eğilme dayanımında %12 artış olurken, 4D kanca geometrisine sahip liflerde bu artış %47'dir.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓65/60 lifler için 4D lif kullanımıyla 3D life kıyasla çok az bir artış (%4) oluşmuştur. Bununla birlikte kanca sayısının yanı sıra çekme dayanımı 3D liflerin yaklaşık 2 katı olan 5D lif kullanımı halinde eğilme dayanımı %65 oranında artmıştır.
- ✓80/60 lifler için 4D lif kullanımıyla 3D lif kullanımına göre göre dayanım artışı 65/60 liflere oranla daha yüksek olup, %37'dir. Bu durum 4D liflerin çekme dayanımının 3D liflere oranının 80/60 liflerde (1,47) 65/60 liflere (1,29) göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Normal dayanımlı seride %0,76 oranında lif kullanımıyla beklenildiği gibi eğilme dayanımı artışları daha belirgin hale gelmiştir. En küçük dayanım artışları %33 ve %74 ile kısa lifler (3D 40/30 ile 3D 55/30) ile üretilen betonlarda olmuştur. En büyük artış ise %205 ile 4D 80/60 lifinin kullanımı ile gerçekleşmiş onun hemen arkasında ise %140 ile 5D 65/60 lifinin kullanımıyla olmuştur.

Görünüm oranının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓3D kanca geometrisindeki 55/30 lifiyle üretilen betonun eğilme dayanımı 40/30 lifiyle üretilen betonun eğilme dayanımına kıyasla %30 daha yüksek olarak bulunmuştur.
- ✓3D kanca geometrisindeki 80/60 lifler 65/60 liflere kıyasla betonun eğilme dayanımına %6 artış sağlamıştır. Bu artış 4D liflerde daha çarpıcı olup, %36 olarak gerçekleşmiştir.
- ✓Görünüm oranının eğilme dayanımına etkisinin kısa liflerde ve kanca sayısı fazla olan liflerde daha çarpıcı olduğu söylenebilir.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓65/60 4D lifli betonun eğilme dayanımı 3D liflilere kıyasla %12 daha yüksektir. 5D lifli betonların dayanımı ise, 3D liflilere göre %20 daha yüksektir.
- ✓80/60 liflerde uç geometrisinin etkisi 65/60 liflere kıyasla daha belirgin olmuştur. 4D lifler 3D liflere kıyasla eğilme dayanımında %44 artış sağlamıştır.

Lif uzunluğunun etkisi değerlendirildiğinde:

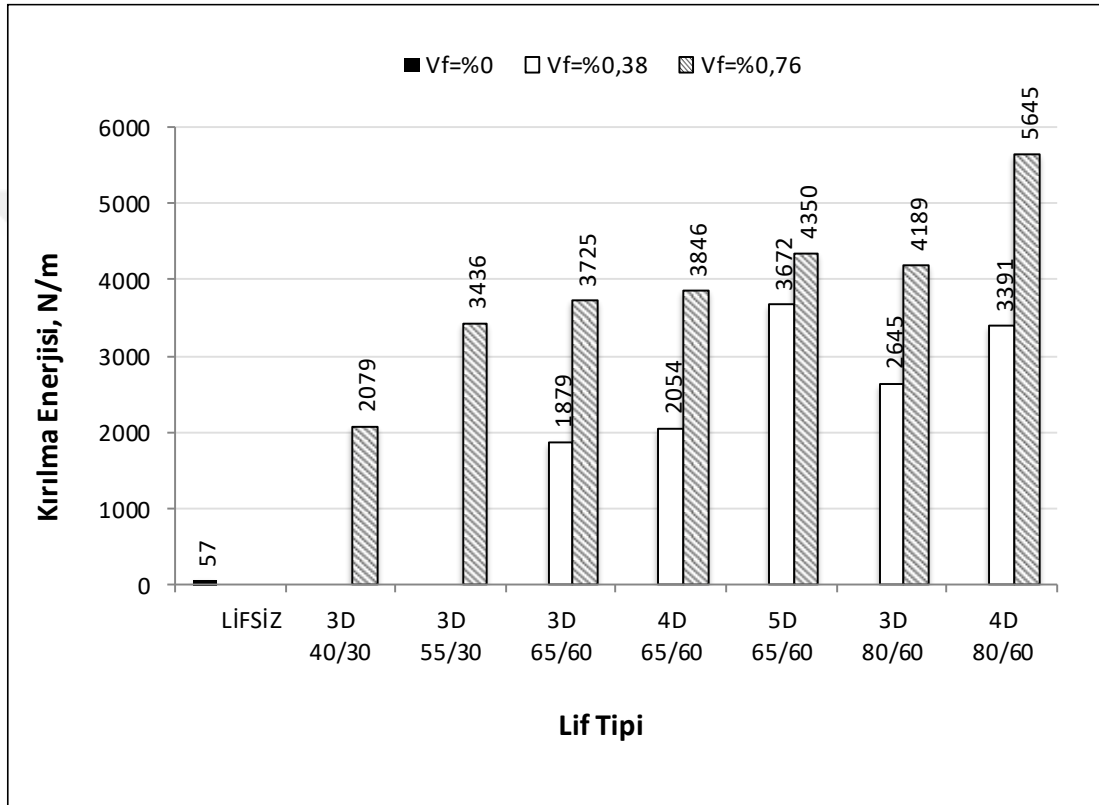
- ✓Benzer görünüm oranı ve uç geometrisine (3D) sahip olan 65/60 ve 55/30 lifleri kıyaslandığında 60 mm uzunluğa sahip olan 65/60 lifleri 30 mm uzunluğa sahip olan 55/30 liflere kıyasla eğilme dayanımında %15 artış sağlamıştır.

Normal dayanımlı seri eğilme deneyi sonuçları incelendiğinde, literatüre paralel olarak lif hacmi, lif görünüm oranı, uç geometrisi özellikleri ve lif uzunluğu arttıkça eğilme dayanımında da belirgin artışlar gözlenmiştir.

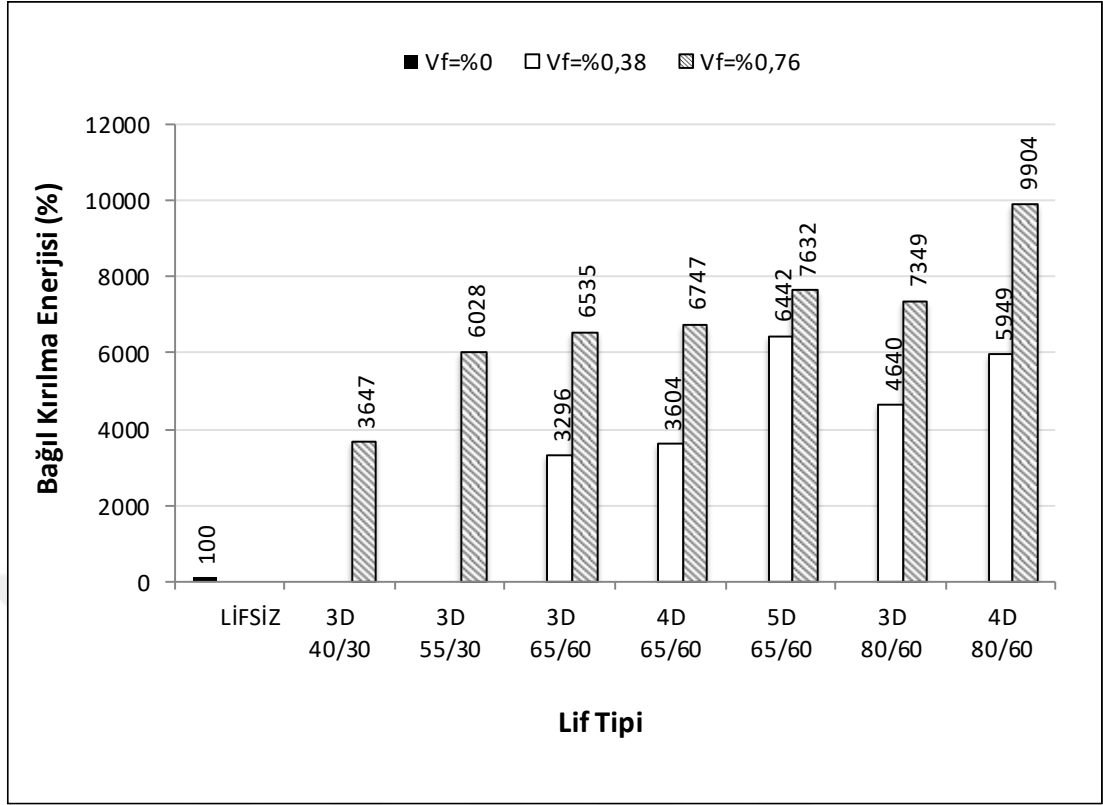
Eğilme dayanımlarındaki artışın matrisin çatlamasından sonra liflerin matrisle arasındaki bağ kırılıncaya kadar betonu yük taşımaya zorlamasından kaynaklandığı öne sürülmüştür (Gao ve Morino, 1997).

4.2.2.3 Normal Dayanımlı Seri Kırılma Enerjileri

Normal dayanımlı seride eğilme deneyinden elde edilen kırılma enerjileri Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Kırılma enerjisi hesabında yük-sehim eğrisinin 5 mm sehime kadar altında kalan alan dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır. Şekil 4.10'da ise lifsiz seriye kıyasla bağıl kırılma enerjileri verilmiştir.



Şekil 4.9 N serisi kırılma enerjileri



Şekil 4.10 N serisi bağıl kırılma enerjileri

Normal dayanımlı seride lifsiz betonun kırılma enerjisi 57 N/m iken %0,38 oranında lif kullanımıyla kırılma enerjisi 32 ile 63 kat artmıştır. En küçük artış 32 kat ile 3D 65/60 lifi ile oluşurken en büyük artış 63 kat ile 5D 65/60 lifi ile olmuştur. Hemen arkasından ise 58 kat ile 4D 80/60 lifine sahip betonlar gelmiştir.

Görünüm oranının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Lif dozajı %0,38 için lif görünüm oranındaki artışla kırılma enerjisi 3D ve 4D liflerde artış göstermiştir. Bu artış eğilme dayanımında olduğu gibi kırılma enerjisinde de 4D liflerde (%65), 3D liflere (%41) kıyasla daha belirgindir.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Uç geometrisindeki gelişme 65/60 liflerde 4D lif kullanımında 3D life oranla önemsiz mertebede iken (%9), 5D lif kullanımında çarpıcı bir hal almış ve 3D life göre %95 kırılma enerjisi artışı olmuştur.

- ✓Uç geometrisindeki değişimin kırılma enerjisine etkisi lif görünüm oranındaki artışla daha belirgin olmuştur. 65/60 liflerde 4D lif kullanımı halinde kırılma enerjisindeki artış %9 iken, 80/60 liflerde bu artış %28'dir.

Normal dayanımlı seride %0,76 oranında lif kullanımıyla beklenildiği gibi kırılma enerjisi artışları daha belirgin hale gelmiştir. Kırılma enerjisindeki en küçük artışlar 35 kat ve 59 kat ile 3D 40/30 ile 3D 55/30 lifleri ile üretilen betonlarda olmuştur. En büyük artış ise 98 kat ile 4D 80/60 lifinin kullanımı ile gerçekleşmiş onun hemen arkasında ise 75 kat ile 5D 65/60 lifinin kullanımıyla olmuştur. Lif dozajındaki artışla kırılma enerjisi artışları daha belirgin bir hal almıştır. Görünüm oranı ve kanca sayısının artışı kırılma enerjisine düşük lif dozajındaki gibi etki yapmıştır. Bununla birlikte etki daha düşük mertebede ortaya çıkmıştır. Örneğin %0,38 lif hacminde 5D 65/60 lif kullanımı ile kırılma enerjisi 3D life göre %95 artarken, %0,76 lif hacminde bu artış %17 olmuştur. Bu durum, %0,38'lik lif hacminde 3D 65/60 liflerin kopmadan sıyrılarak 5 mm sehime kadar üzerlerindeki yükü hemen hemen sabit tutabilmelerine karşılık 5D 65/60 liflerin kancanın yüksek plastik deformasyon kapasitesi nedeniyle sehim arttıkça (çatlak açıldıkça) daha fazla yük taşıyabilmeleri ile ilgilidir. Buna karşılık %0,76'lık lif dozajında 3D 65/60 lifler de bu dozajda sayıları fazla olduğu için deformasyon sertleşmesi gösterebilmiş ancak belirli bir sehimden sonra kırılmıştır. 5D 65/60 liflerin ise 3 mm sehime kadar 3D 65/60 liflerle benzer davranışı göstermeleri ancak 3 mm'lik sehimden sonra 5 mm'lik sehime kadar kırılmadan plastik deformasyonla sıyrılma sürecini tamamlayabilmelerinin getirdiği olumlu fark, 3D liflere göre daha yüksek olan kırılma enerjisini açıklamaktadır.

Görünüm oranının kırılma enerjisine etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Kısa liflerde (30 mm) 3D kanca geometrisindeki 55/30 lifiyle üretilen betonun kırılma enerjisi 40/30 lifiyle üretilen betonun kırılma enerjisine kıyasla %65 daha yüksek olarak bulunmuştur.
- ✓Uzun liflerde (60 mm) 3D 80/60 lif kullanımıyla kırılma enerjisi 3D 65/60 lifine göre %13 artarken 4D 80/60 lifi 4D 65/60 lifine göre %47 kırılma enerjisi artışı sağlamıştır.

- ✓Görünüm oranının kırılma enerjisine etkisi, 3D kısa liflerde uzun liflere kıyasla daha fazla olmuştur. Ayrıca 4D liflerde görünüm oranı etkisi 3D liflere kıyasla daha belirgin olmuştur. Bu durum 4D 80/60 liflerin çekme dayanımının 3D 80/60 liflere kıyasla belirgin bir şekilde yüksek olmasının bir sonucudur.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓65/60 4D lifi betonun kırılma enerjisini 3D life kıyasla %3, 5D lifler ise 3D liflere göre %17 arttırmıştır.
- ✓80/60 liflerde uç geometrisinin etkisi 65/60 liflere kıyasla daha belirgin olmuştur. 4D lifler 3D liflere kıyasla kırılma enerjisinde %35 artış sağlamıştır.

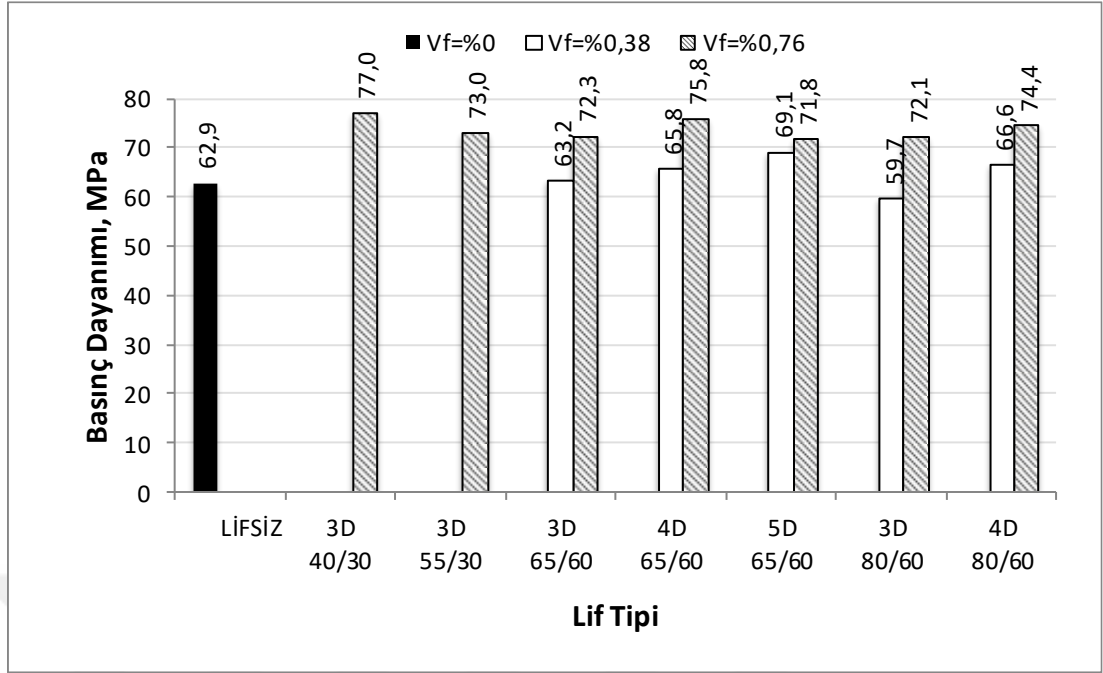
Lif uzunluğunun etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Eğilme dayanımında olduğu gibi benzer görünüm oranında lif uzunluğunun 30 mm'den 60 mm'ye artışı kırılma enerjisini (%8) arttırmıştır.

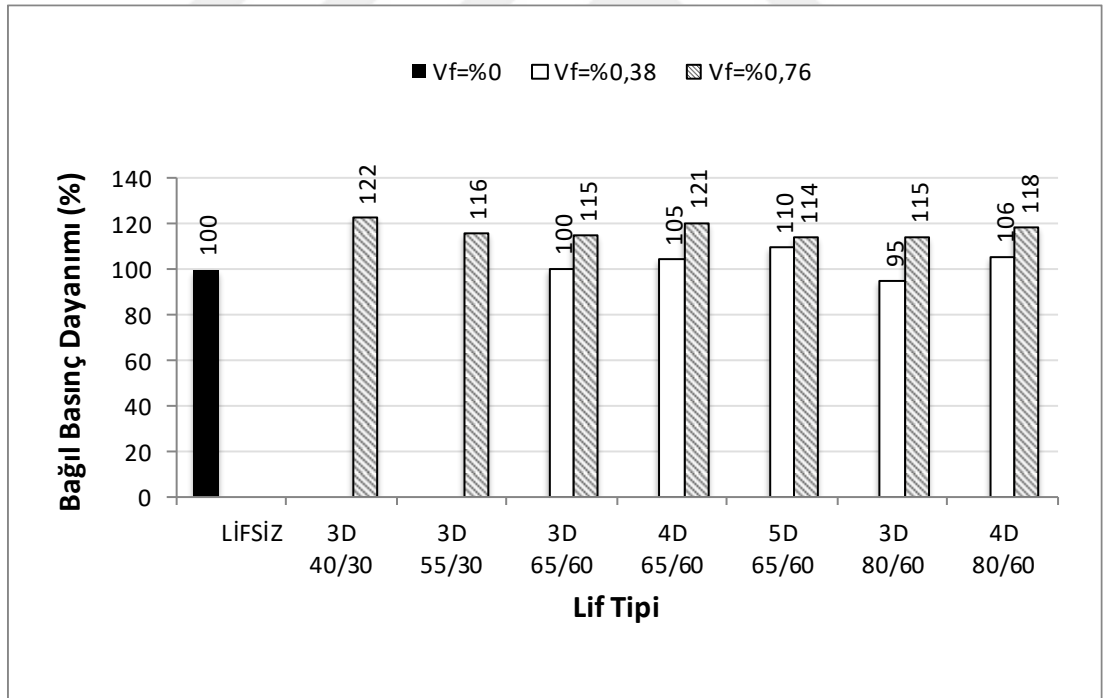
Lif miktarının artması ile artan kırılma enerjisinin nedeni çelik lifli betonda kırılma sürecinde liflerin matrsten aşamalı olarak sıyrılması ve çok sayıda ve rastgele dağılı çelik liflerin çatlakların birleştirilmesinde bir köprü rolü oynaması ve böylece dolaylı çatlak yayılmasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Bayramov, 2004; Yardımcı, 2007). Kırılma enerjisi lif dozajının yanı sıra, kanca sayısı, lif uzunluğu ve görünüm oranı artışıyla artmıştır.

4.2.3 Yüksek Dayanımlı Seri Basınç Deneyi Sonuçları

Yüksek dayanımlı seride lifsiz matris ortalama 62,9 MPa basınç dayanımı verirken, 30 kg lif içeren 5 karışımda ortalama 64,8 MPa, 60 kg lif içeren 7 karışımda ise ortalama 73,8 MPa dayanımları elde edilmiştir (Şekil 4.11). Ayrıca kısa liflerin basınç dayanımı arttırmada uzun liflere göre daha etkin olduğu görülmüştür. Şekil 4.12'de lifsiz seriye göre bağıl basınç dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.11 Y serisi basınç dayanımları



Şekil 4.12 Y serisi bağıl basınç dayanımları

Buradan yüksek dayanımlı matrise, %0,38 oranında lif eklemenin ortalama %3, %0,76 oranında lif eklemenin ise %17 oranında basınç dayanımı artışı

gerçekleştirdiği gözlenmiştir (Şekil 4.11). Basınç dayanımlarındaki artışın, literatürdeki çalışmalara benzer olduğu görülmüştür (Gao ve Morino, 1997; Lee, 2002; Ünal ve diğer., 2003; Yazıcı ve diğer., 2007).

Öte yandan bu çalışmada yüksek dayanımlı betonlarda hedef çökme değeri normal dayanımlı betona kıyasla daha yüksek olup, 150 ± 20 mm değerinde sabit tutulmuştur. Yüksek dayanımlı beton serisinde yüksek bağlayıcı oranı ve yüksek çökme değeri taze hal özelliklerinde iyileşmeyi de beraberinde getirerek, daha iyi yerleşme ve sıkışma koşulları sağlamıştır. Yüksek dayanımlı seride lifli betonların basınç dayanımlarının kontrol betonuna göre belirgin miktarda artış göstermesinin bu sebepten olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca lif yöneliminin de basınç dayanımına olumlu katkıları rapor edilmiştir. Özellikle yükleme yönüne dik liflerin aderans kuvvetleri vasıtasıyla yanal çekme gerilmelerini sınırlayarak basınç dayanımına katkı sağlayabildiği bilinmektedir (Tokyay ve diğer., 1991).

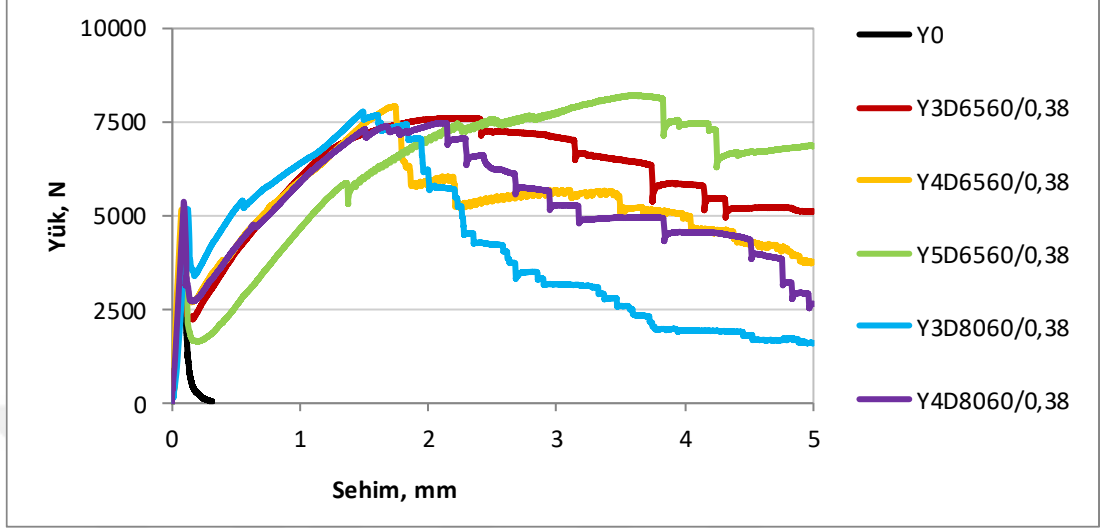
4.2.4 Yüksek Dayanımlı Seri Eğilme Deneyi Sonuçları

Yüksek dayanımlı seride kiriş örneklere yapılan eğilme deneyi sonucunda tüm serilerin yük-sehim eğrileri incelenmiş, eğilme dayanımları ve kırılma enerjileri hesaplanmıştır.

4.2.4.1 Yüksek Dayanımlı Seri Yük-Sehim Eğrileri

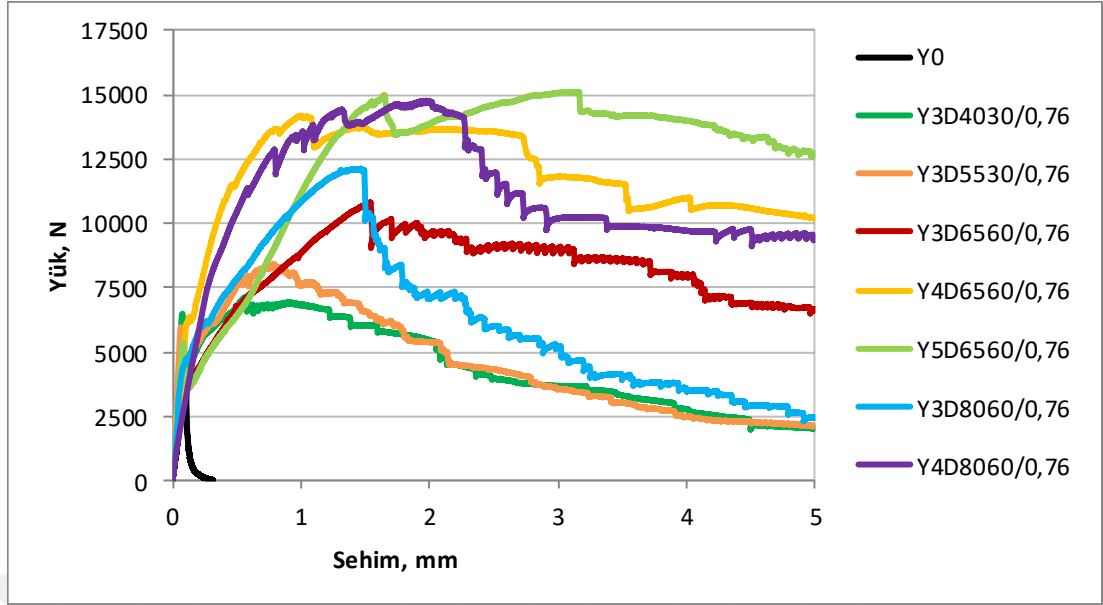
Yüksek dayanımlı serinin lifsiz kontrol betonu maksimum yükte 0,1 mm orta nokta deplasmanı yapmış, nihai olarak ise 0,2 mm deplasmana ulaşmıştır. %0,38 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri Şekil 4.13'te verilmiştir. Eğilme dayanımını oluşturan tepe yüküne 1,5-2,5 mm, arasında ulaşılmıştır. Normal dayanımlı betonlardan farklı olarak matris ve lifler arasındaki aderans kuvvetleri daha büyük olduğundan tüm serilerde deformasyon sertleşmesi davranışı görülmüştür. Çelik lif dozajındaki ve geometrik özelliklerindeki değişimin çatlak oluşmadan önceki davranış üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, yükteki artışla birlikte sehim değerlerinin de doğrusala yakın bir şekilde arttığı görülmektedir.

Çatlak oluştuktan sonraki davranış ise lif dozajından ve lif geometrik özelliklerinden önemli bir şekilde etkilenmiştir.



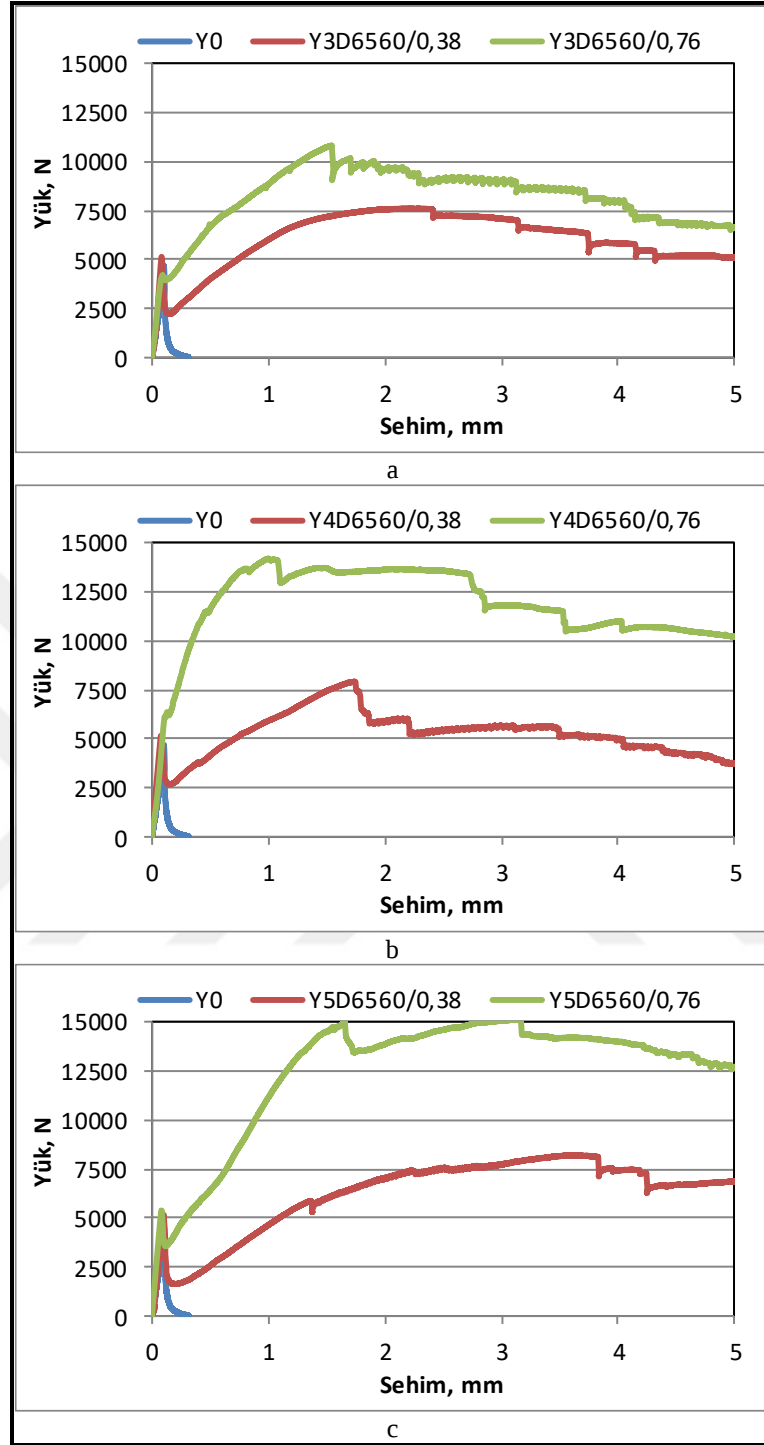
Şekil 4.13 Y serisi %0,38 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri

Yüksek dayanımlı serinin %0,76 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri Şekil 4.14'te verilmiştir. Eğilme dayanımını oluşturan tepe yüküne 1-2 mm arasında ulaşılmıştır. %0,38 lif hacminde olduğu gibi tüm serilerde deformasyon sertleşmesi davranışı görülmüştür. Ancak yaklaşık 2-3 mm orta nokta sehiminden sonra muhtemelen lif kopmalarına bağlı olarak ani yük düşmeleri gözlenmiştir. Yüksek dayanımlı betonlarda lif kopmasının ve matrsten sıyrılmasının bir sonucu olarak ortaya çıkan bu durum Yardımcı, (2007) ve Aydın, (2013) tarafından da rapor edilmiştir.

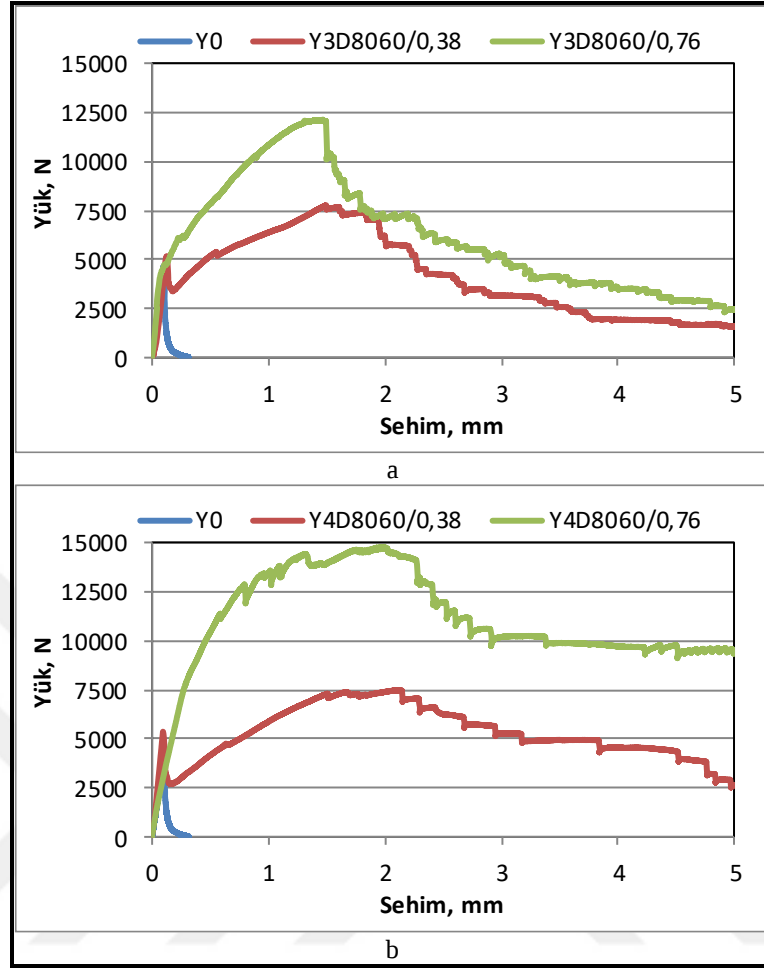


Şekil 4.14 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin yük-sehim eğrileri

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da her lif tipi için farklı lif hacimlerindeki yük-sehim eğrileri verilmiştir. Lif dozajındaki artışın 4D ve 5D liflerde eğilme davranışını daha belirgin bir şekilde etkilediği görülmüştür. Ancak bu serilerde gözlenen ani yük düşmeleri %0,38 lif hacmindeki serilere oranla daha erken sehim değerlerinde gözlenmiştir (1–2 mm arasında). Bu durum ilk çatlak oluşuktan sonra çatlak açıldıkça lif başına düşen gerilmenin lifin kopmasına neden olacak kadar yüksek olabileceğini düşündürmektedir. Bu açıdan, yüksek dayanımlı ve daha fazla kancaya sahip liflerin daha iyi davranış göstermesi bu davranışı desteklemektedir.



Şekil 4.15 Y serisi lif hacmine bağlı yük-sehim eğrileri a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60

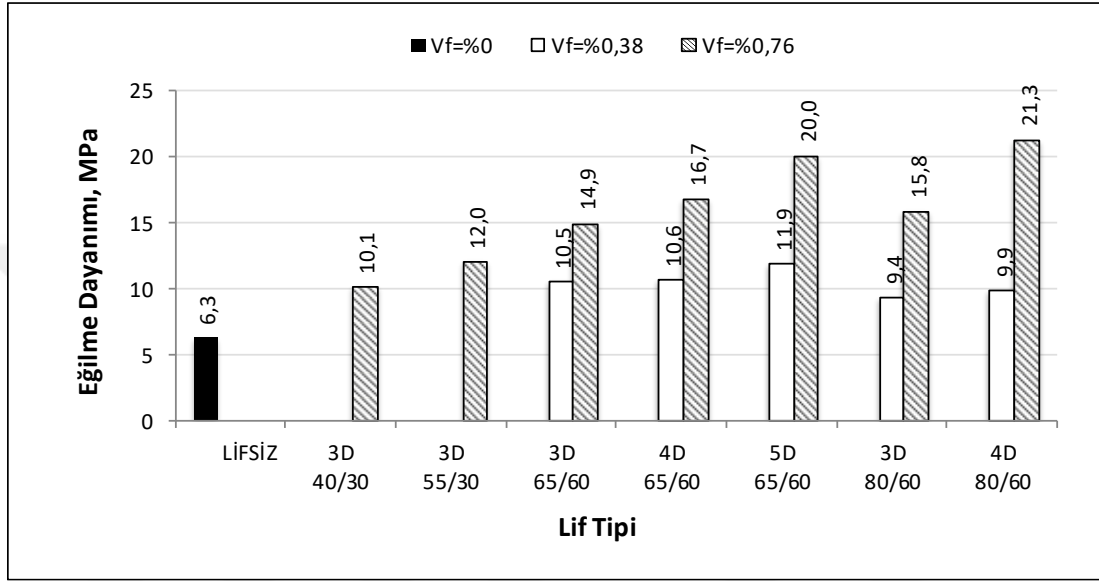


Şekil 4.16 Y serisi lif hacmine bağlı yük-sehim eğrileri a) 3D 80/60, b) 4D 80/60

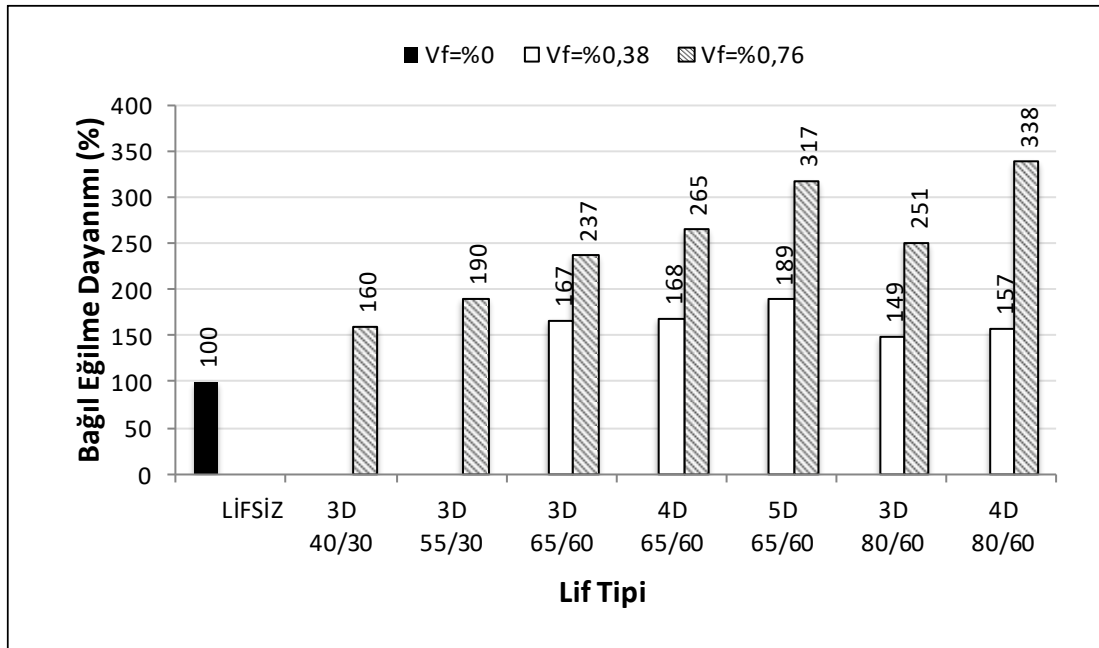
Yüksek dayanımlı seri yük-sehim eğrileri incelendiğinde, %0,38 lif hacmine sahip 3D ve 5D 65/60 serilerinde nihai deplasman seviyesinde (5 mm) numunenin yük taşıma kapasitesinin yüksek seviyede (%75), 4D 65/60 serisinde orta seviyede (%50), 3D ve 4D 80/60 serilerinde ise düşük seviyede (%25) olduğu görülmektedir. %0,76 lif hacmine sahip 3D, 4D ve 5D 65/60 ile 4D 80/60 serilerinde yük taşıma kapasitesinin yüksek seviyede (%75), 3D 80/60, 40/30 ve 55/30 serilerinde ise düşük seviyede (%30) olmuştur.

4.2.4.2 Yüksek Dayanımlı Seri Eğilme Dayanımları

Şekil 4.17’de yüksek dayanımlı seride farklı miktar ve özelliklerde lif kullanımıyla oluşan eğilme dayanımları, Şekil 4.18’de ise lifsiz seriye göre bağıl eğilme dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.17 Y serisi eğilme dayanımları



Şekil 4.18 Y serisi bağıl eğilme dayanımları

Yüksek dayanımlı seride lifsiz betonun eğilme dayanımı 6,3 MPa iken %0,38 oranında lif kullanımıyla %49 ile %89 arasında artış gözlenmiştir. En küçük artış %49 ile 3D 80/60 lifi ile oluşurken en büyük artış %89 ile 5D 65/60 lifi ile olmuştur.

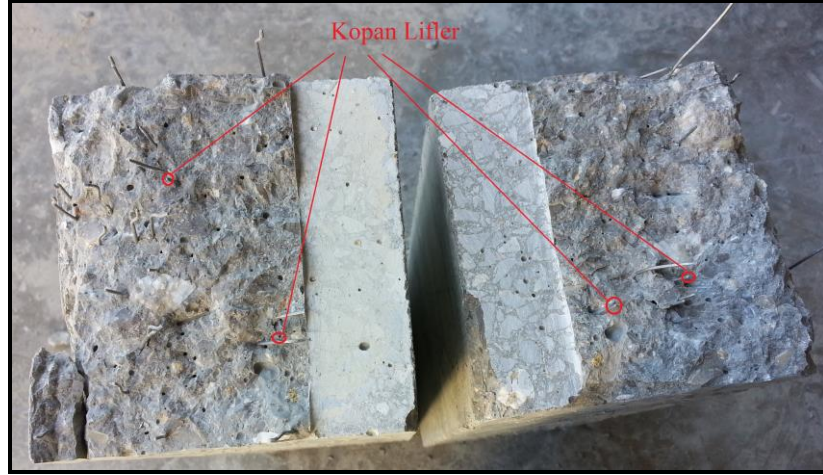
Görünüm oranının etkisi değerlendirildiğinde:

3D kanca geometrisinde 80/60 lif kullanımıyla 65/60 lif kullanımına oranla betonun eğilme dayanımında %10 azalma, 4D kanca geometrisinde ise %7 azalma olmuştur. Bu durum, 80/60 ve 65/60 liflerin aynı boyda olduğu (60 mm) ve benzer çekme dayanımında olduğu göz önüne alındığında, görünüm oranının artmasıyla azalan en kesit alanına bağlı olarak kopan lif sayılarında artış olmasıyla ilgilidir. 3D 65/60 serisinde numunelerin kırılma kesitindeki ortalama 26 liften 2 tanesi koparken, 80/60 serisinde ortalama 32 liften 5 tanesinin kopmuş olduğu deneyler sonrasında kırık yüzeylerde yapılan görsel incelemelerden tespit edilmiştir (Şekil 4.19). Öte yandan, 4D 65/60 serisinde (28 liften 4 kopma) kopan lif oranı, çekme dayanımı daha yüksek olan 4D 80/60 serisi numunelere (38 liften 4 kopma) kıyasla daha fazladır. Literatürde statik yükleme altında aynı boydaki kancalı uçlu geleneksel çelik liflerin görünüm oranının 65'den 80'e yükselmesiyle çekme gerilmeleri altında kopan lif oranının arttığı Eren ve Çelik, (1997) ve Bayramov ve diğer. (2004) tarafından da vurgulanmıştır.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓65/60 lifler için 4D lif kullanımıyla 3D life benzer eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bununla birlikte kanca sayısının yanı sıra 3D liflere kıyasla çekme dayanımı yaklaşık 2 kat olan 5D lif kullanımı halinde eğilme dayanımı %13 oranında artmıştır.
- ✓80/60 lifler için 4D lif kullanımıyla 3D lif kullanımına göre dayanım artışı 65/60 liflere oranla biraz daha yüksek olup, %5'dir. 4D liflerin çekme dayanımının 3D liflere oranının 80/60 liflerde 65/60 liflere göre daha fazla olmasının buna sebep olabileceği düşünülmüştür.

Şekil 4.19'da Y3D6560/0,38 serisinden bir numunenin kırılma kesit fotoğrafı verilmiş, kopan lifler gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Y3D6560/0,38 serisi kırılma kesiti (Kişisel arşiv, 2017)

Yüksek dayanımlı seride %0,76 oranında lif kullanımıyla beklenildiği gibi eğilme dayanımı artışları daha belirgin hale gelmiştir. En küçük dayanım artışları %60 ve %90 ile sırasıyla 3D 40/30 ile 3D 55/30 lifleri ile üretilen betonlarda olmuştur. En büyük artış ise %238 ile 4D 80/60 lifinin kullanımı ve %217 ile 5D 65/60 lifinin kullanımıyla olmuştur.

Görünüm oranının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓3D kanca geometrisindeki 55/30 lifiyle üretilen betonun eğilme dayanımı 40/30 lifiyle üretilen betonun eğilme dayanımına kıyasla %19 daha yüksek olarak bulunmuştur.
- ✓3D kanca geometrisindeki 80/60 lifler 65/60 liflere kıyasla betonun eğilme dayanımına %6 artış sağlamıştır. Bu artış 4D liflerde daha çarpıcı olup, %28 olarak gerçekleşmiştir.
- ✓Görünüm oranının eğilme dayanımına etkisi kısa liflerde uzun liflere kıyasla ve 4D liflerde 3D liflere kıyasla daha belirgin olmuştur.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓65/60 4D lifli betonun eğilme dayanımı 3D lifli betona kıyasla %12 daha yüksektir. 5D lifli betonun eğilme dayanımı ise 3D lifli betona göre %34 daha yüksektir.

✓80/60 liflerde uç geometrisinin etkisi 65/60 liflere kıyasla daha belirgin olmuştur. 4D lifler 3D liflere kıyasla eğilme dayanımında %35 artış sağlamıştır. Bu durum daha önceden belirtildiği gibi 80/60 lifler için 4D/3D çekme dayanımı oranının (1,47), 65/60 liflere kıyasla daha yüksek (1,29) olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, 4D 65/60 liflerde lif kopmalarının artması sebebiyle, 4D 80/60 liflerdeki kadar iyi bir performans artışının (3D liflere kıyasla) ortaya çıkmadığı düşünülmektedir.

Lif uzunluğunun etkisi değerlendirildiğinde:

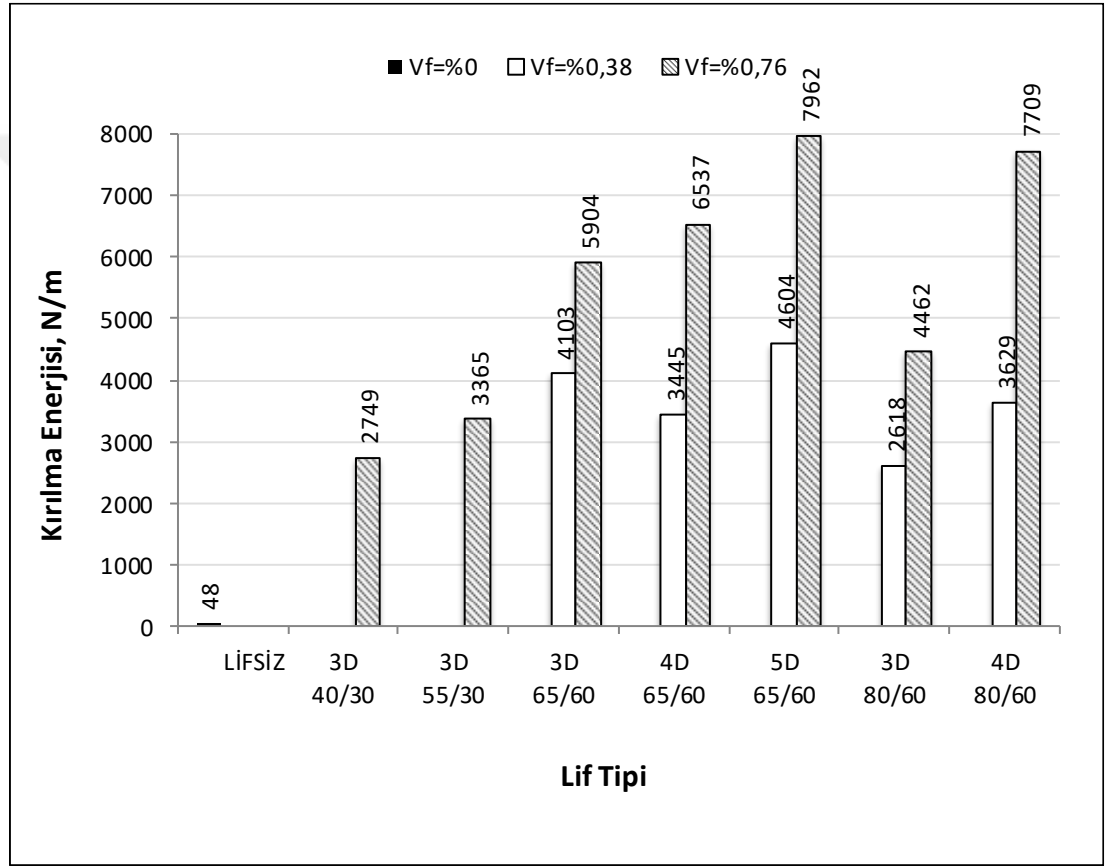
✓Benzer görünüm oranı ve uç geometrisine sahip olan (3D) 65/60 ve 55/30 lifleri kıyaslandığında 60 mm uzunluğa sahip olan 65/60 liflerin 30 mm uzunluğa sahip olan 55/30 liflere kıyasla eğilme dayanımında %24 artış sağlamıştır.

Yüksek dayanımlı seri eğilme deneyi sonuçları incelendiğinde, genel olarak literatüre paralel sonuçlar elde edildiği görülmüş olup; lif hacmi, lif görünüm oranı ve uç geometrisi özellikleri arttıkça eğilme dayanımında da belirgin artışlar gözlenmiştir. Buna rağmen lif hacmi %0,38 gibi nispeten düşük olduğu bir durumda lif görünüm oranının değişimiyle beklenen etkinin tam olarak sağlanamayabileceği gözlenmiştir. Lif hacmi %0,76 iken en yüksek dayanım artışı elde edilen 4D 80/60 lifinin %0,38 lif hacminde beklenen performansı gösteremediği gözlenmiştir. Öte yandan bu türden makro lifli betonlarda liflerin beton içerisinde, kırılma kesitinde ve özel olarak kırılma kesitinin çekme bölgesindeki uygun doğrultuda yerleşimleri sonucunda büyük dayanım artışları sağlayabildiği ancak liflerin bu etkin bölgelere homojen dağılmasının ve uygun yönlendirilmesinin ise özellikle düşük lif dozajlarında daha zor olduğu belirtilmektedir (Yardımcı, 2007). %0,38 lif hacminde kanca sayısı fazla olan 5D 65/60 serisi en iyi performansı gösterirken, %0,76 lif haminde 4D 80/60 ve 5D 65/60 en iyi performansı göstermiştir. Elde edilen sonuçlara göre genel olarak, düşük lif dozajlarında kanca sayısı fazla olan liflerin yüksek lif dozajına sahip görünüm oranı düşük liflerden daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Ancak

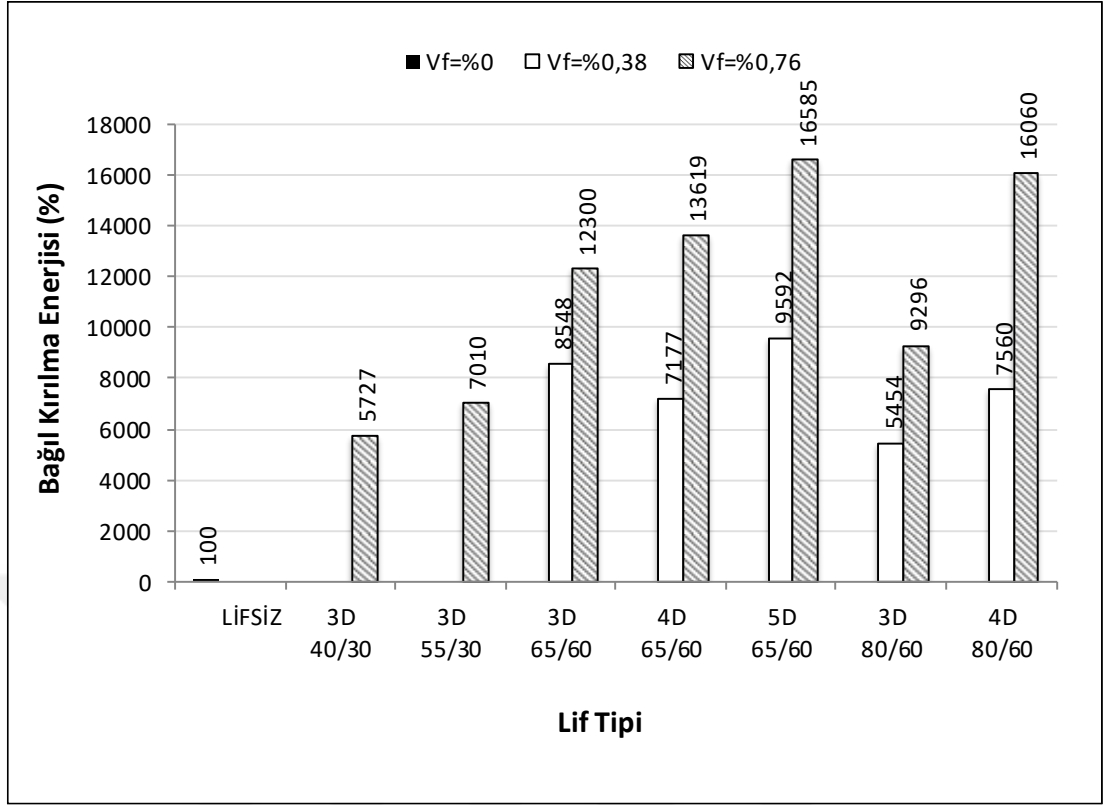
kırılma kesitlerindeki liflerin farklı konum ve yönlenmesinin de sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi olduğu unutulmamalıdır.

4.2.4.3 Yüksek Dayanımlı Seri Kırılma Enerjileri

Yüksek dayanımlı seride eğilme deneyi sonrası elde edilen kırılma enerjileri Şekil 4.20’de, lifsiz seriye kıyasla bağlı kırılma enerjileri Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.20 Y serisi kırılma enerjileri



Şekil 4.21 Y serisi bağıl kırılma enerjileri

Görüldüğü gibi lifsiz betonun kırılma enerjisi 48 N/m iken %0,38 oranında lif kullanımıyla 54 ile 95 kat arasında artmıştır. En küçük artış 54 kat ile 3D 80/60 lifi ile oluşurken en büyük artış 95 kat ile 5D 65/60 lifi ile olmuştur.

Görünüm oranının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Lif dozajı %0,38 için lif görünüm oranındaki artışla kırılma enerjisi 3D liflerde azalırken 4D liflerde artış göstermiştir. Görünüm oranı artışının kırılma enerjisine etkisi eğilme dayanımında da olduğu gibi 4D liflerde (%5 artış), 3D liflere (%36 azalma) kıyasla daha belirgindir.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Uç geometrisindeki gelişmenin kırılma enerjilerine etkisi, 65/60 liflerde 4D lif kullanımı halinde 3D life oranla azalma iken, 5D lif kullanımında 3D life göre %12 artış şeklinde olmuştur. 65/60 serisinde 4D lif kullanımıyla oluşan azalma incelendiğinde her iki serinin numunelerinde de benzer

sayıda lif gözlenmiştir ancak, 4D 65/60 serisi numunelerinde kopan lif sayıları (28 liften 4 kopma) daha fazla olduğu görülmüştür. Bu değer 3D 65/60 numunelerinde (27 liften 2 lif kopması) şeklindedir. 3D'den 4D'ye geçişle kanca artışından kaynaklanan aderans gelişimi lifler üzerindeki gerilmeyi de arttırmaktadır. Bu gerilme artışı lif tarafından karşılanamazsa (lifin çekme dayanımı yetersiz kalırsa), burada olduğu gibi lif kopmalarının artmasına ve kırılma enerjisinin azalmasına yol açabilir.

- ✓Uç geometrisindeki değişimin kırılma enerjisine etkisi yüksek lif görünüm oranında daha belirgin olmuştur. 65/60 liflerde 4D lif kullanımı halinde kırılma enerjisinde %16 azalma olurken, 80/60 liflerde %39 artış olmuştur.

Yüksek dayanımlı seride %0,76 oranında lif kullanımıyla beklenildiği gibi kırılma enerjisi artışları daha belirgin hale gelmiştir. Kırılma enerjisindeki en küçük artışlar 56 kat ve 69 kat ile 3D 40/30 ile 3D 55/30 lifleri ile üretilen betonlarda olmuştur. En büyük artış ise 165 kat ile 4D 80/60 ve 160 kat ile 5D 65/60 lifinin kullanımıyla olmuştur. Görünüm oranı ve kanca sayısının artışı kırılma enerjisine düşük lif dozajındaki gibi etki yapmıştır. Bununla birlikte etki daha büyük mertebede ortaya çıkmıştır. Örneğin %0,38 lif hacminde 5D 65/60 lif kullanımı ile kırılma enerjisi 3D life göre %12 artarken, %0,76 lif hacminde bu artış %35 olmuştur.

Görünüm oranının kırılma enerjisine etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Kısa liflerde 3D kanca geometrisindeki 55/30 lifiyle üretilen betonun kırılma enerjisi 40/30 lifiyle üretilen betonun kırılma enerjisine kıyasla %22 daha yüksek olarak bulunmuştur.
- ✓Uzun liflerde 3D 80/60 lif kullanımıyla kırılma enerjisi 3D 65/60 lifine göre %24 azalırken 4D 80/60 lifi 4D 65/60 lifine göre %18 kırılma enerjisi artışı sağlamıştır.
- ✓Görünüm oranının artışı 3D kısa liflerde (30 mm) kırılma enerjisini arttırırken, uzun liflerde (60 mm) kırılma enerjisini azaltmıştır. Bu durum görünüm oranı artışıyla kopan lif sayısının artışına bağlanmıştır. 4D liflerde ise görünüm oranı artışı kırılma enerjisini arttırmıştır. Bu artış ise görünüm oranı artışı ile lif çekme dayanımının da 1500 MPa'dan 1800

MPa'a yükselmesine (%20 dayanım artışı) ve dolayısıyla kopan lif sayısında önemli bir değişim olmamasına bağlanmıştır. 3D liflerde görünüm oranı 80/60 olan liflerin çekme dayanımı 65/60 olan liflere kıyasla sadece %5 daha fazladır.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓65/60 4D lifi betonun kırılma enerjisini 3D life kıyasla %11, 5D lifler ise 3D liflere göre %35 arttırmıştır.
- ✓80/60 liflerde uç geometrisinin etkisi 65/60 liflere kıyasla daha belirgin olmuştur. 4D lifler 3D liflere kıyasla kırılma enerjisinde %73 artış sağlamıştır. Bu durum uç geometrisinin yanı sıra 3D lifin çekme dayanımının 1225 MPa, 4D lifin çekme dayanımının ise 1800 MPa olmasından kaynaklanmaktadır.

Lif uzunluğunun etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Benzer görünüm oranında lif uzunluğunun 30 mm'den 60 mm'ye artışı kırılma enerjisini oldukça çarpıcı bir şekilde (%75) arttırmıştır.

3D 80/60 serisi numunelerinde beklenen kırılma enerjisi performansı görülememiş, kırılma kesitleri incelendiğinde ortalama 49 lif olduğu ve bu liflerin 5'er tanesinin koptuğu görülmüştür (Şekil 4.22). 3D 65/60 serisinde ise 54 liften 3 adedi kopmuştur.



Şekil 4.22 Y38060/0,76 serisi kırılma kesiti (Kişisel arşiv, 2017)

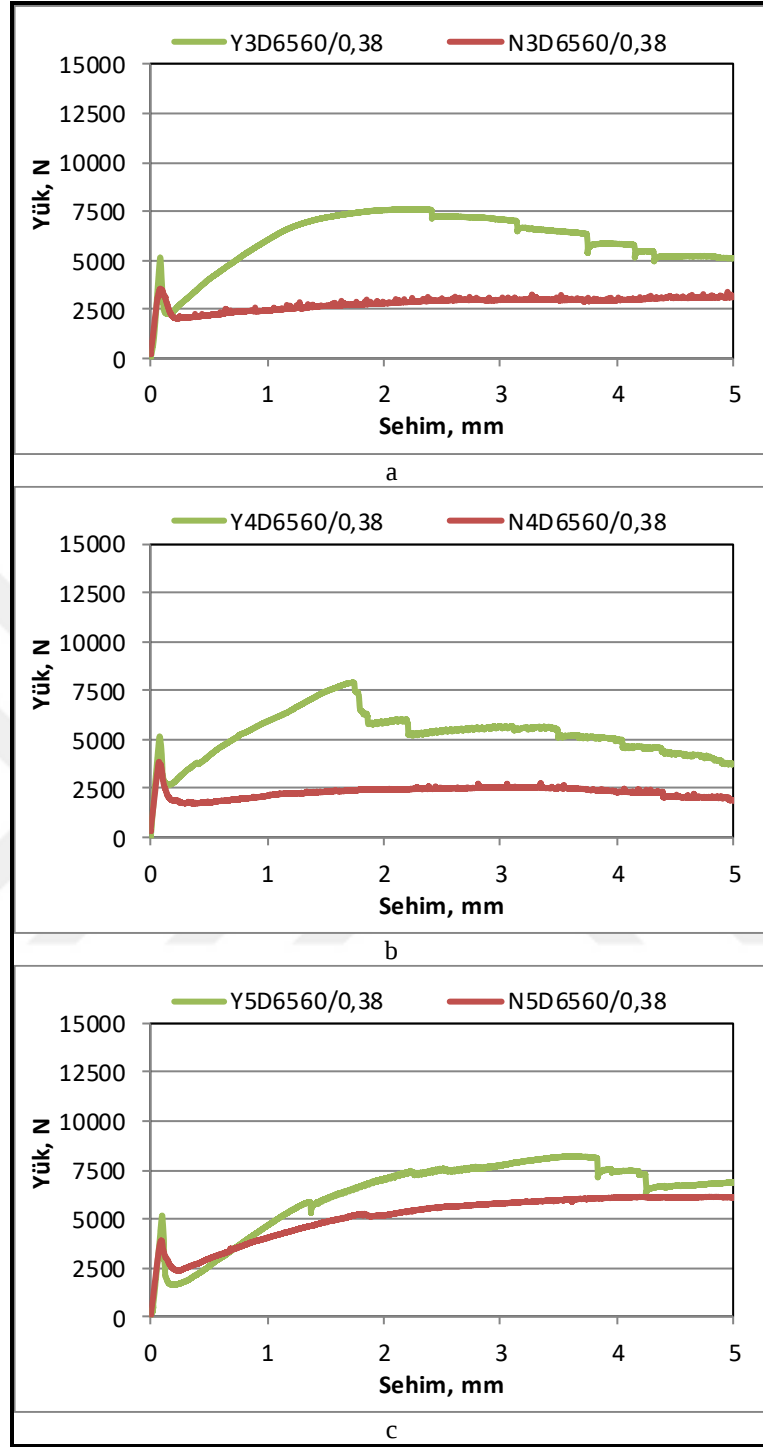
4.2.5 Normal ve Yüksek Dayanımlı Seri Eğilme Deney Sonuçlarının Birlikte Değerlendirilmesi

Normal ve yüksek dayanımlı serilerin eğilme deneyi sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi ile lifli betonda matris dayanımının eğilme davranışına etkisi bu bölümde irdelenmiştir.

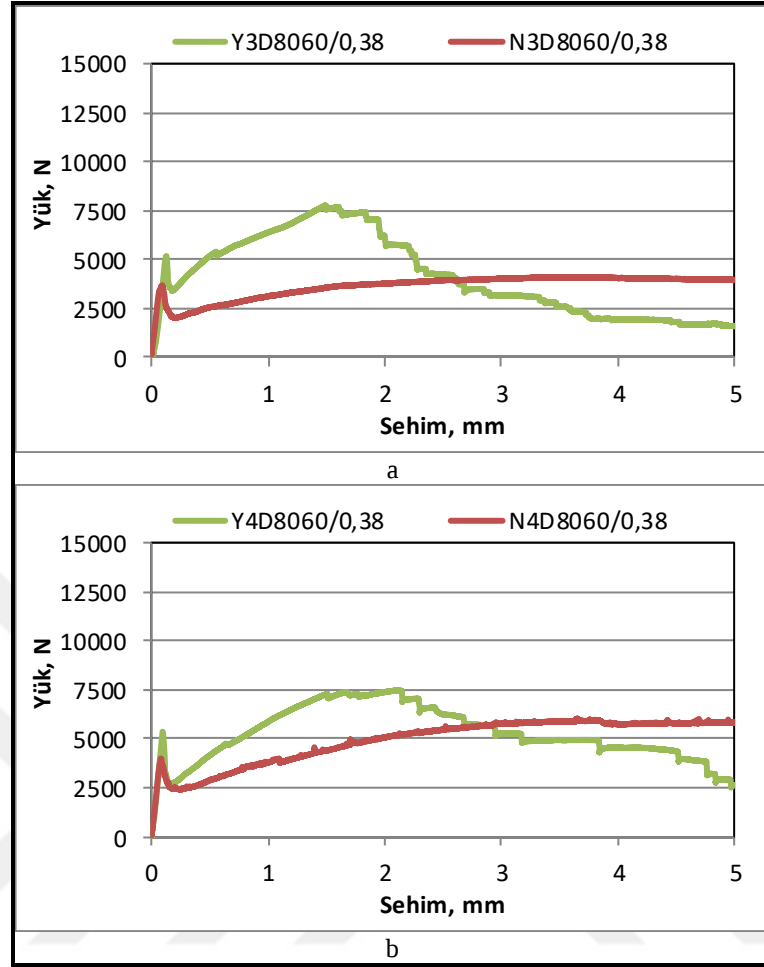
4.2.5.1 Normal ve Yüksek Dayanımlı Seri Yük-Sehim Grafikleri

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te %0,38 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı serilerin yük-sehim grafikleri verilmiştir.

Şekil 4.23b ve Şekil 4.24c'den görüldüğü gibi düşük lif dozajlarında kanca sayısı artışı ile normal dayanımlı betonda yüksek dayanımlı betona benzer davranış elde edilmiştir.



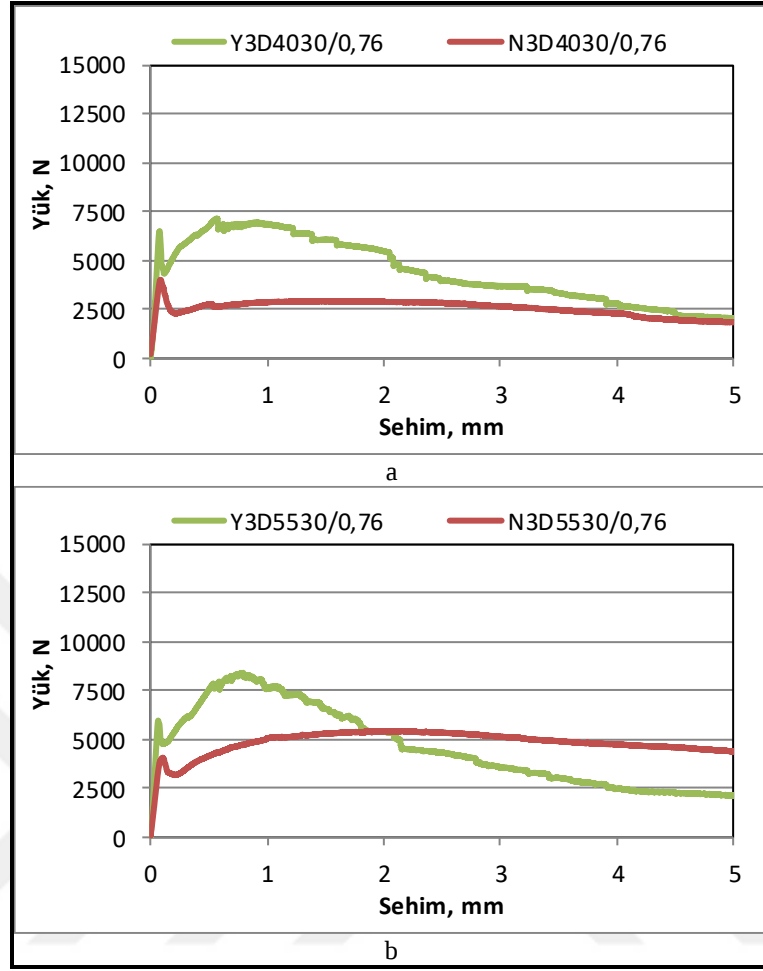
Şekil 4.23 %0,38 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60 serileri yük-sehim grafikleri



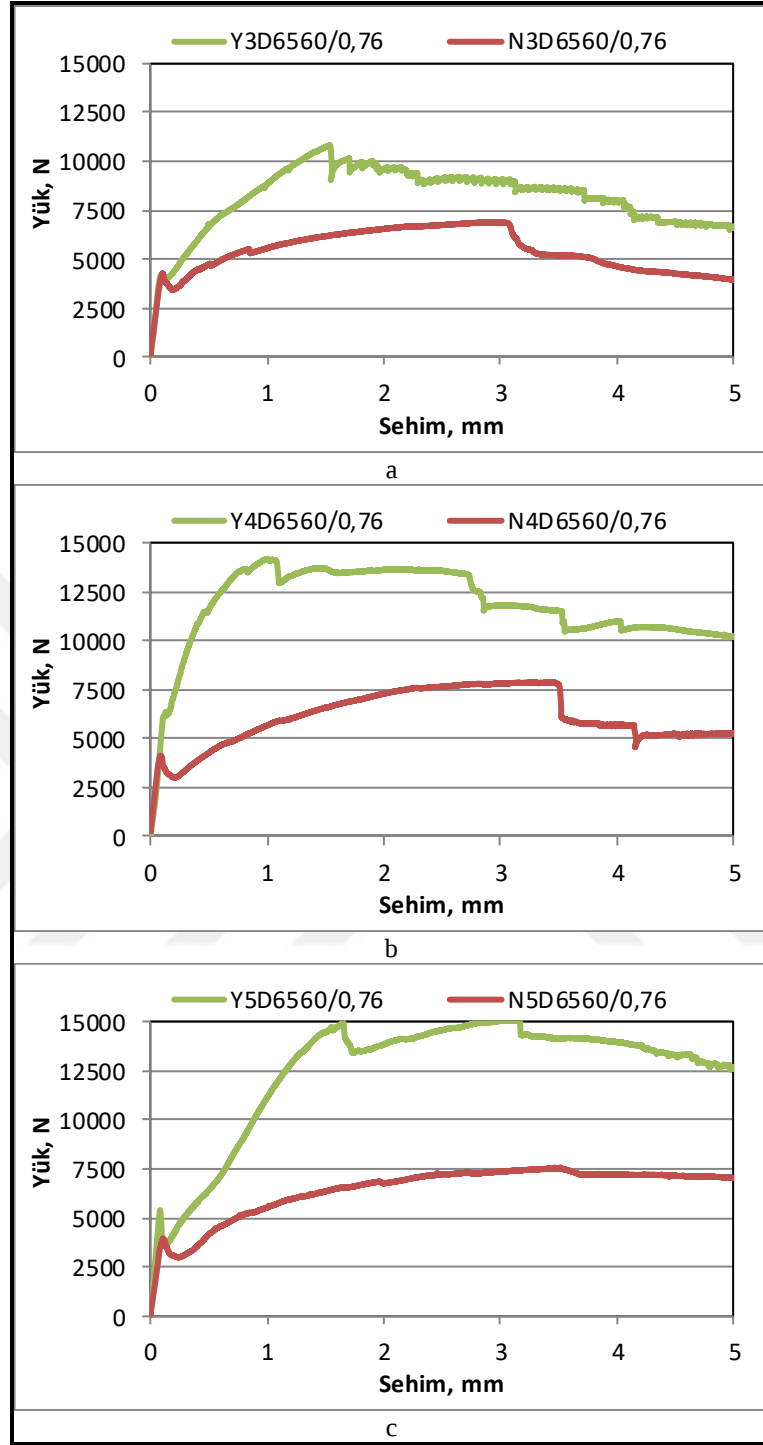
Şekil 4.24 %0,38 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 80/60, b) 4D 80/60 serileri yük-sehim grafikleri

Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de %0,76 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı serilerin yük-sehim grafikleri verilmiştir.

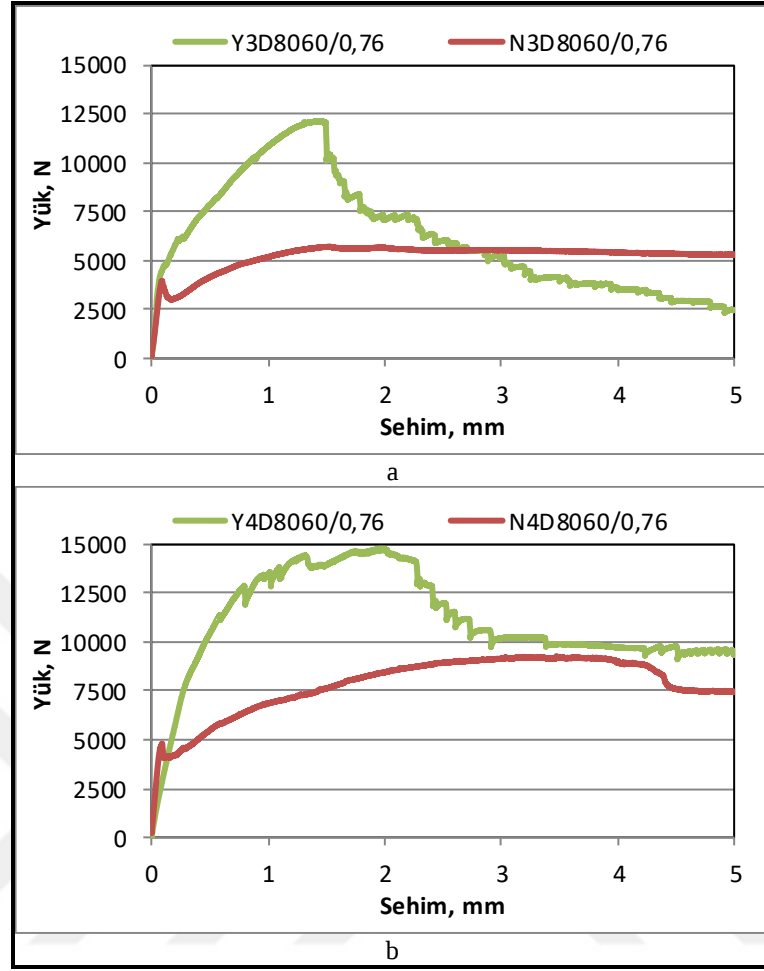
Şekil 4.23-4.27’den görüleceği gibi yüksek dayanımlı betonlar maksimum yüke daha düşük sehim değerlerinde ulaşmıştır. Ayrıca, bu noktadan itibaren daha gevrek bir davranış göstererek yük taşıma kapasitelerini kaybetmişlerdir. Normal dayanımlı betonlar ise maksimum yüke daha yüksek sehim değerlerinde ulaşmış olup, bu noktadan sonra yük taşıma kapasiteleri önemli bir değişim göstermemiştir. Bu durumun, yüksek dayanımlı seride lif-matris aderansı daha fazla olduğu için liflerin sıyrılma yerine kopma davranışı sergilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.25 %0,76 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 40/30, b) 3D 55/30 serileri yük-sehim grafikleri



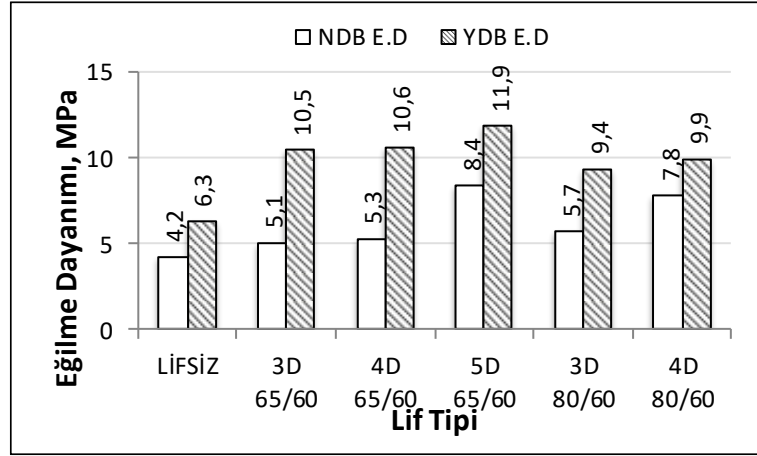
Şekil 4.26 %0,76 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60 serileri yük-sehim grafikleri



Şekil 4.27 %0,76 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı a) 3D 80/60, b) 4D 80/60 serileri yük-sehim grafikleri

4.2.5.2 Normal ve Yüksek Dayanımlı Seri Eğilme Dayanımları

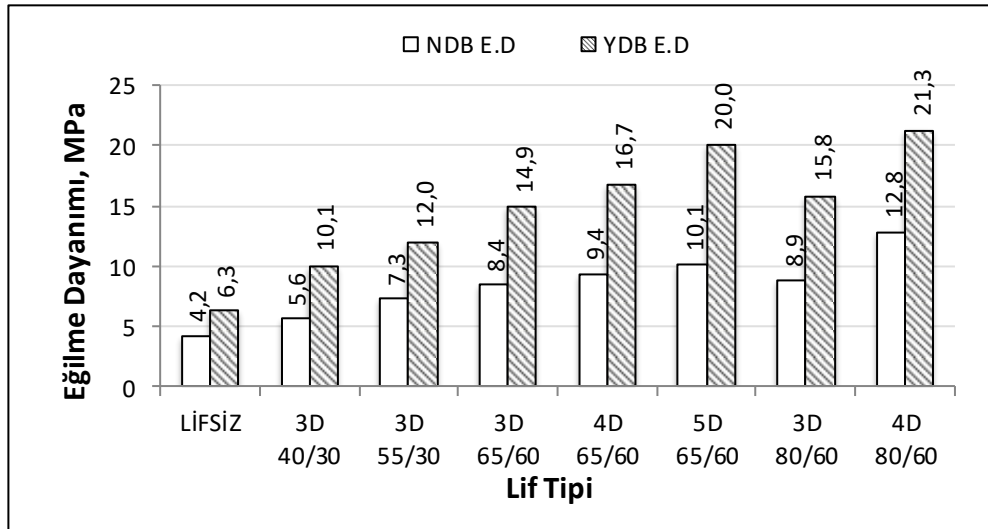
Şekil 4.28’de %0,38 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı serilerin eğilme dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.28 N ve Y serisi %0,38 lif hacmine sahip numunelerin eğilme dayanımı

Matris dayanımının artırılmasıyla lifsiz seride eğilme dayanımlarında %50'lik bir artış oluşurken, %0,38 lif hacmine sahip 65/60 liflerde 3D, 4D ve 5D uç geometrisi için sırasıyla %106, %100 ve %42 artış olmuştur. 80/60 liflerde ise 3D ve 4D için sırasıyla %65 ve %14 artış oluşmuştur. Lif kanca sayısının ve görünüm oranının artışı ile matris dayanımının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi azalmıştır.

Şekil 4.29'da %0,76 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı serilerin eğilme dayanımları verilmiştir.

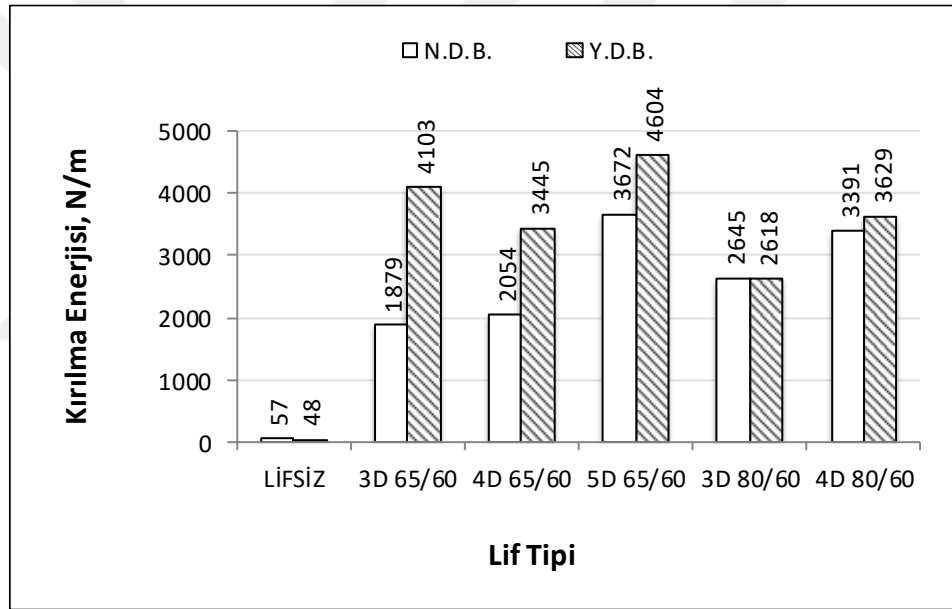


Şekil 4.29 N ve Y serisi %0,76 lif hacmine sahip numunelerin eğilme dayanımı

Matris dayanımının arttırılmasıyla %0,76 lif hacmine sahip 3D 40/30 ve 3D 55/30 serilerinde sırasıyla %80 ve %64 artış olmuştur. 65/60 liflerde 3D, 4D ve 5D uç geometrisi için sırasıyla %77, %78 ve %98 artış olmuştur. 80/60 liflerde ise 3D ve 4D için sırasıyla %78 ve %66 artış oluşmuştur. Görünüm oranının artmasıyla matris dayanımının eğilme dayanımına etkisi azalmıştır.

4.2.5.3 Normal ve Yüksek Dayanımlı Seri Kırılma Enerjileri

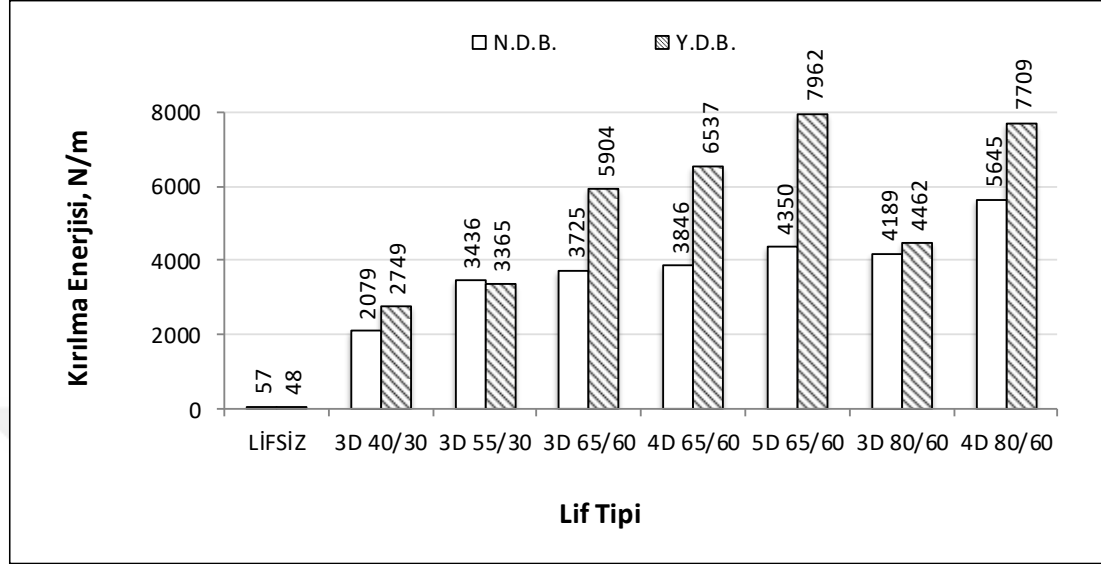
Şekil 4.30'da %0,38 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı serilerin kırılma enerjileri verilmiştir.



Şekil 4.30 N ve Y serisi %0,38 lif hacmine sahip numunelerin kırılma enerjisi

Matris dayanımının arttırılmasıyla lifsiz seride kırılma enerjilerinde %16'lık bir azalma oluşurken, %0,38 lif hacmine sahip 3D, 4D ve 5D 65/60 serilerinde sırasıyla %118, %68 ve %25 artışlar oluşmuştur. 3D ve 4D 80/60 serilerinde kırılma enerjileri normal dayanımlı beton ve yüksek dayanımlı beton için benzer sonuç vermiştir. Düşük lif dozajında kanca sayısı artışının kırılma enerjisi performansına etkisinin matris dayanımı arttıkça azaldığı saptanmıştır. 80/60 serisinde matris dayanımının kırılma enerjisine etkisi oldukça düşük düzeyde olmuştur.

Şekil 4.31’de %0,76 lif hacmine sahip normal ve yüksek dayanımlı serilerin kırılma enerjileri verilmiştir.



Şekil 4.31 N ve Y serisi %0,76 lif hacmine sahip numunelerin kırılma enerjisi

Matris dayanımının artırılmasıyla %0,76 lif hacmine sahip 3D 40/30, 3D 65/60, 4D 65/60, 5D 65/60, 3D 80/60 ve 4D 80/60 serilerinde sırasıyla %32, %58, %70, %83, %7 ve %37’lik artışlar oluşmuştur. Burada 3D 55/30 lifinde matris dayanımı artışının kırılma enerjisini %2 azalttığı sonucu çıksa da bu lifle üretilen betonlar incelendiğinde normal dayanımlı serideki kırılma kesitine düşen ortalama lif sayılarının (74) yüksek dayanımlı seriye göre (64) %16 daha fazla olduğu görülmüştür. Eğer her iki seride de benzer lif sayıları sağlanabilseydi matrisi daha güçlü olan serinin kırılma enerjisinin de daha fazla olacağı tahmin edilebilirdi. Yüksek lif dozajında görünüm oranı artışı kırılma enerjisi performansını matris dayanımı arttıkça azaltmıştır. Kanca sayısı artışı ise matris dayanımı artışı ile kırılma enerjisi performansını arttırmıştır. Görünüm oranı artışıyla lif kopmalarında artış gözlenmiştir.

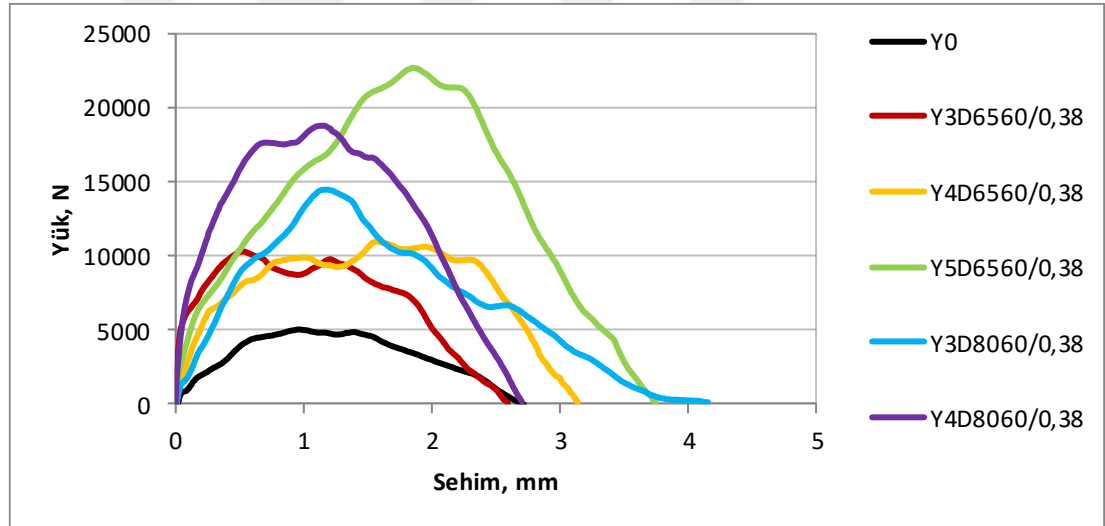
4.2.6 Yüksek Dayanımlı Seri Darbe Deneyi Sonuçları

Yüksek dayanımlı seride kiriş örneklere ağırlık düşürmeli darbe deneyi uygulanmıştır. Darbe deney düzeneğinden elde edilen veriler analiz edilerek yük-

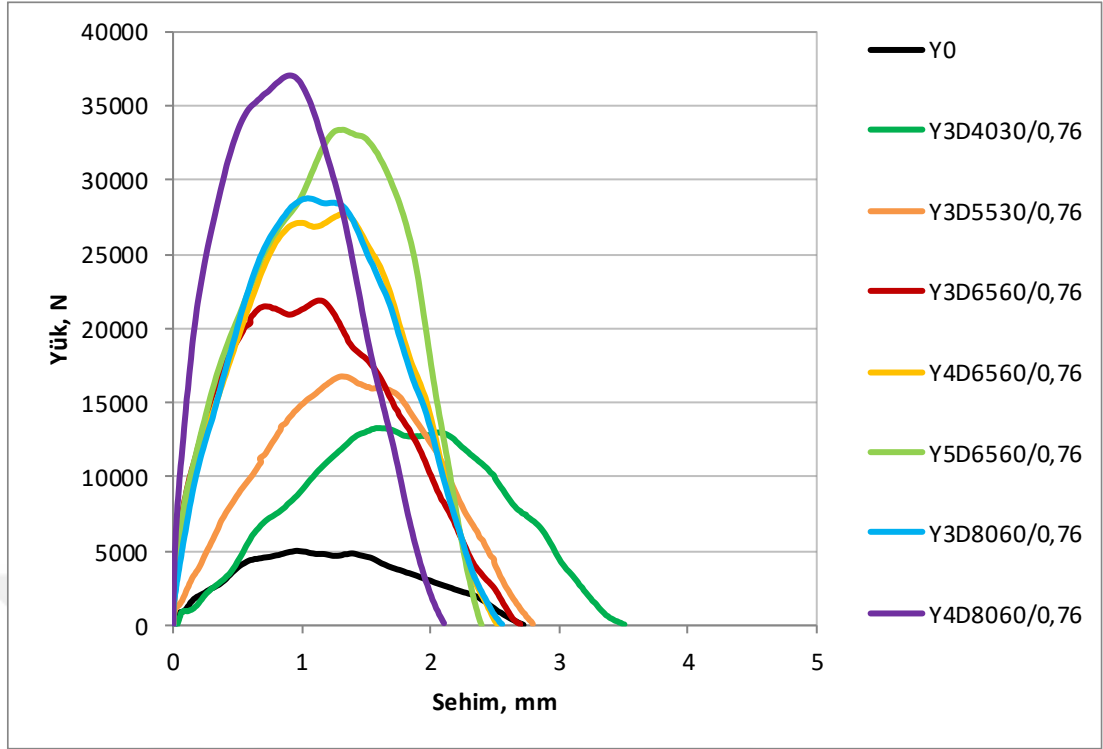
sehim eğrileri çizdirilmiştir. Darbe deneyinden elde edilen bu yük-sehim eğrileri incelenerek eğilme dayanımları ve kırılma enerjilerini statik yükleme sonuçlarıyla karşılaştırılabilmek için bazı yaklaşımlar yapılarak dinamik artış faktörleri (DIF) hesaplanmıştır.

4.2.6.1 Yüksek Dayanımlı Seri Darbe Deneyi Yük-Sehim Eğrileri

Yüksek dayanımlı serinin %0,38 ve %0,76 lif hacmine sahip örneklerinin dinamik yükler altında elde edilen yük-sehim eğrileri sırasıyla Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmiştir. En yüksek yük değerlerine 1-2 mm sehim arasında ulaşılmıştır. Lif dozajındaki artışla tepe yüküne karşılık gelen sehim değerlerinin azaldığı görülmektedir.

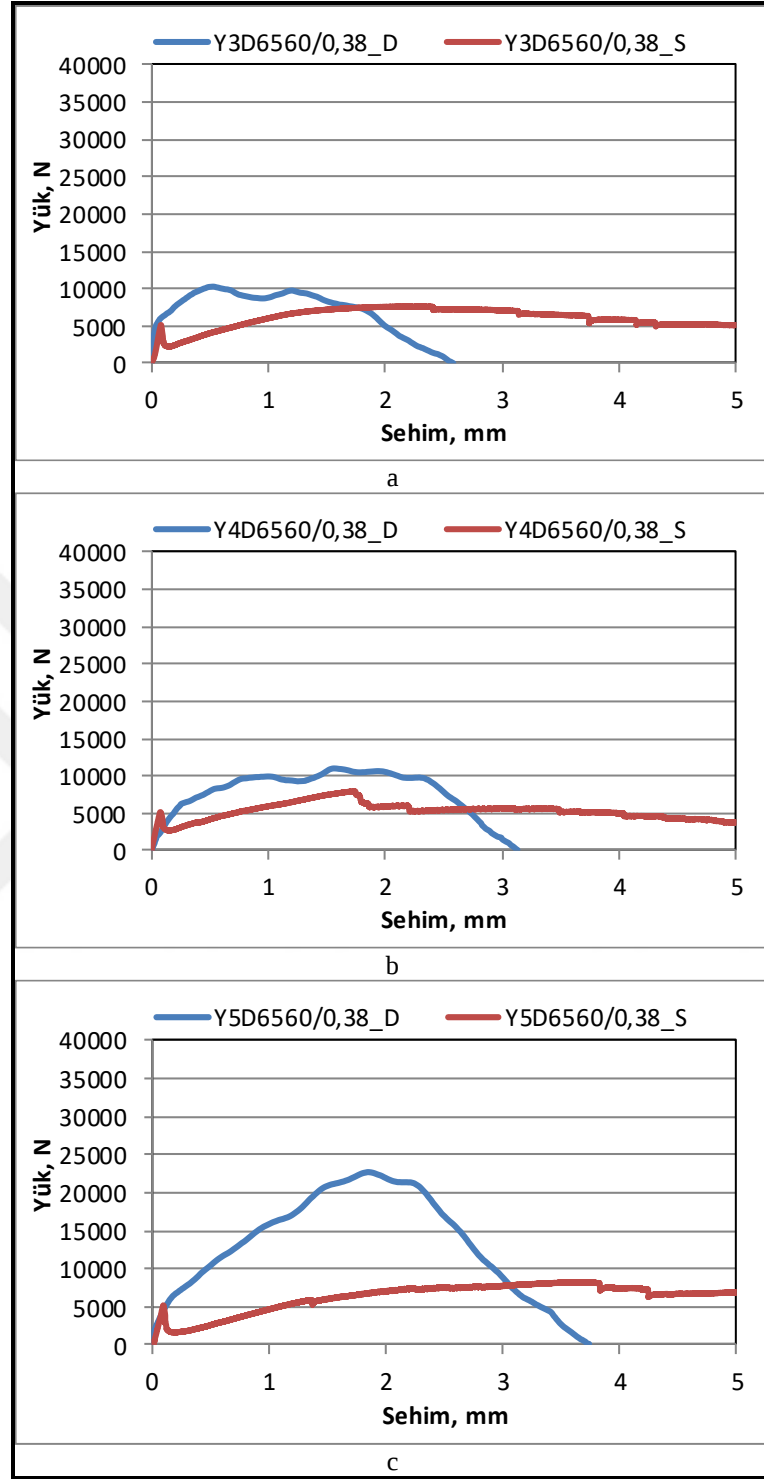


Şekil 4.32 Y serisi %0,38 lif hacmine sahip örneklerin darbe etkisinde yük-sehim eğrileri

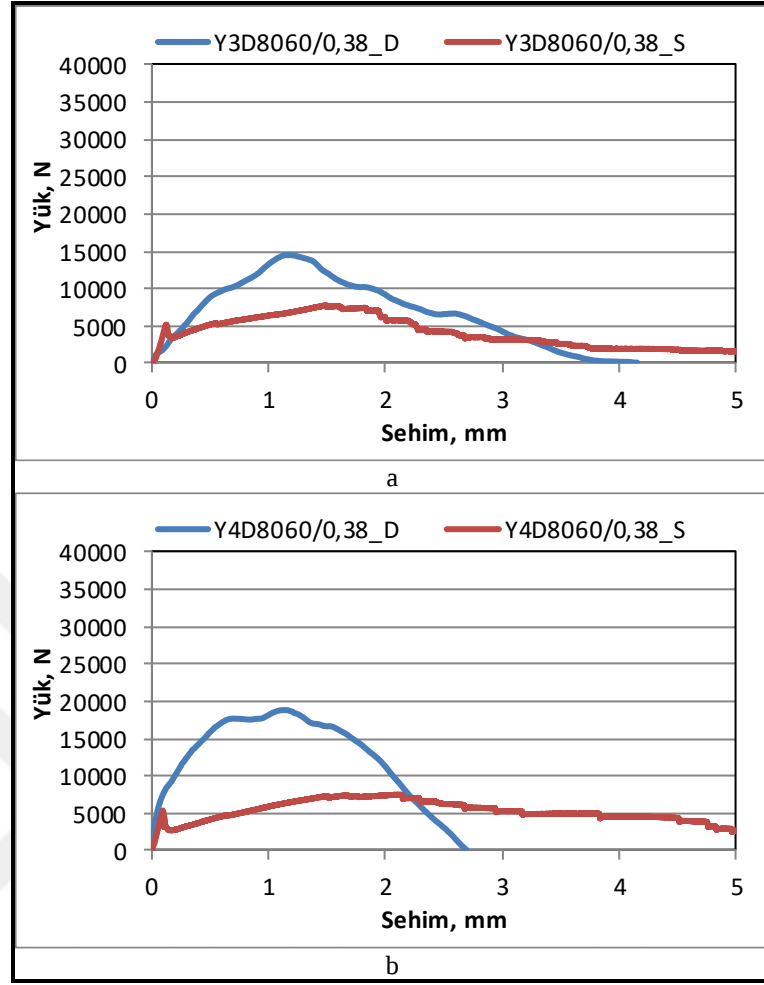


Şekil 4.33 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin darbe etkisinde yük-sehim eğrileri

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te yüksek dayanımlı seri %0,38 lif hacmine sahip örneklerin statik ve dinamik yükler altındaki yük-sehim grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'ten görüldüğü gibi %0,38 lif hacminde Y5D 65/60 ve Y4D 80/60 serilerinde dinamik yüklemeye göre belirgin eğilme dayanımı artışı kaydedilmiştir.

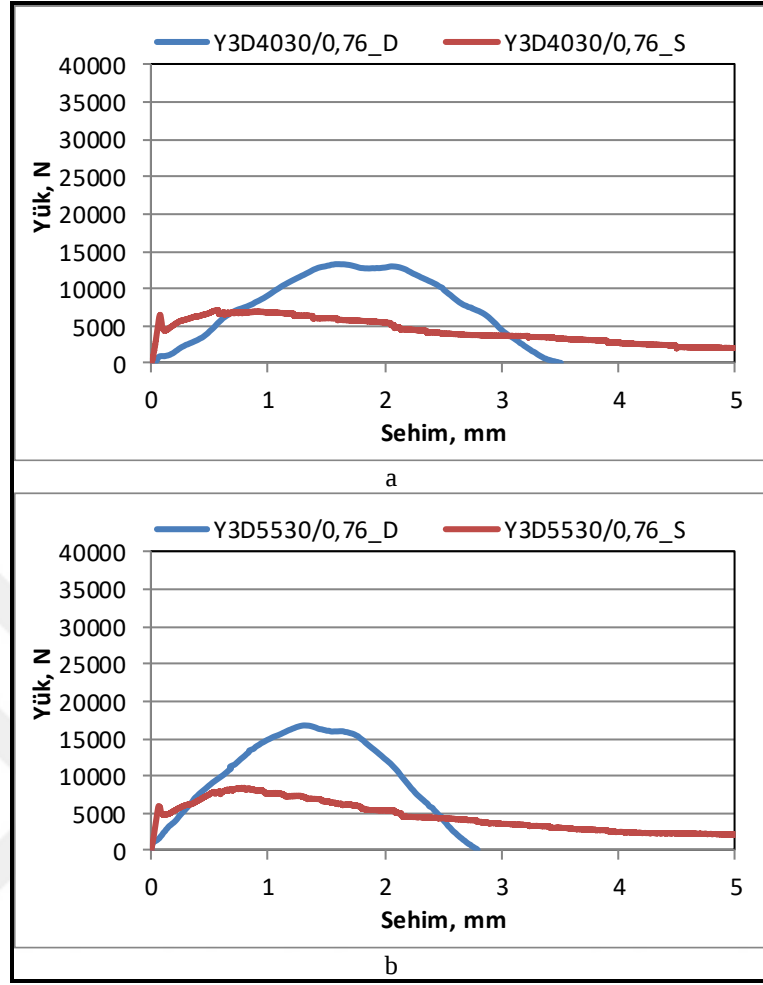


Şekil 4.34 Y serisi %0,38 lif hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60

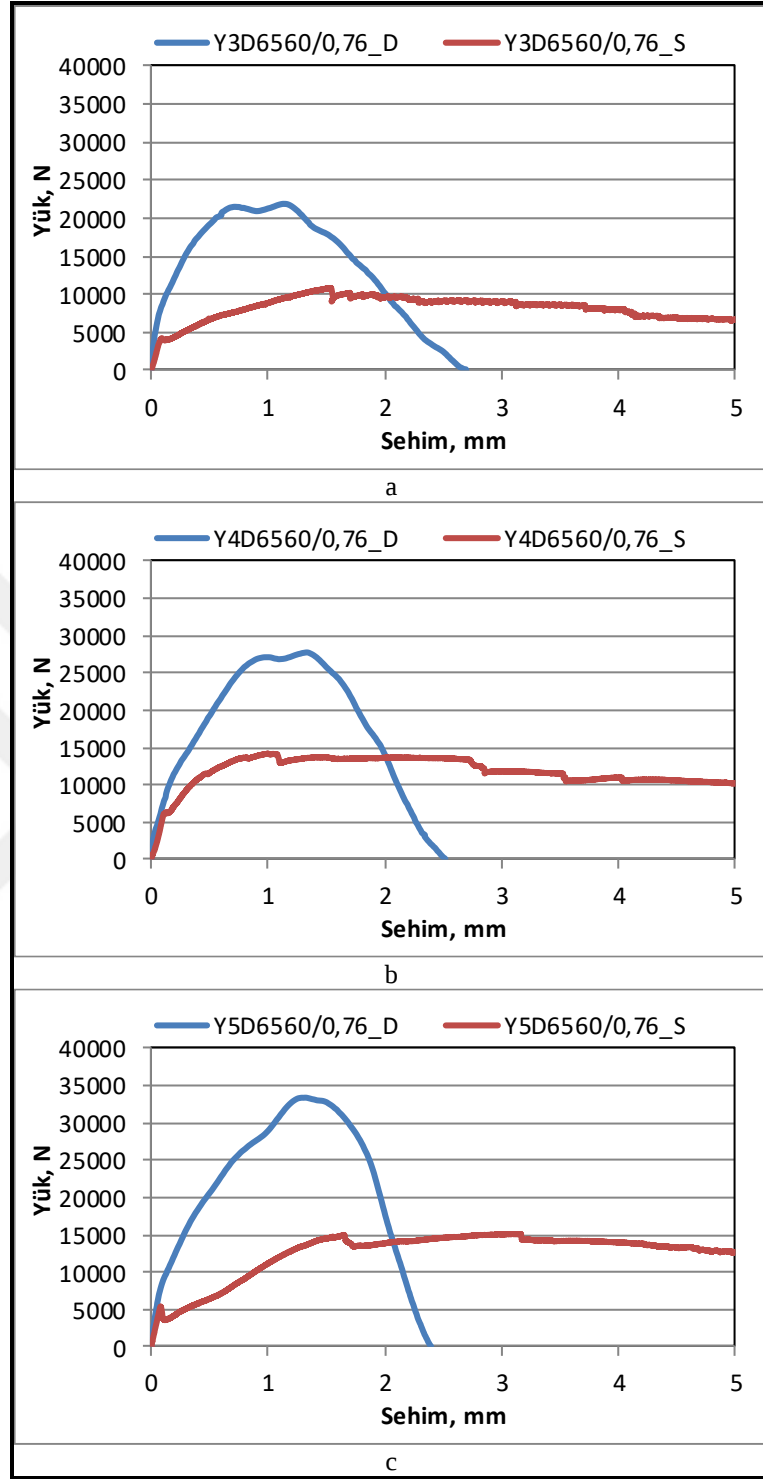


Şekil 4.35 Y serisi %0,38 hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 80/60, b) 4D 80/60

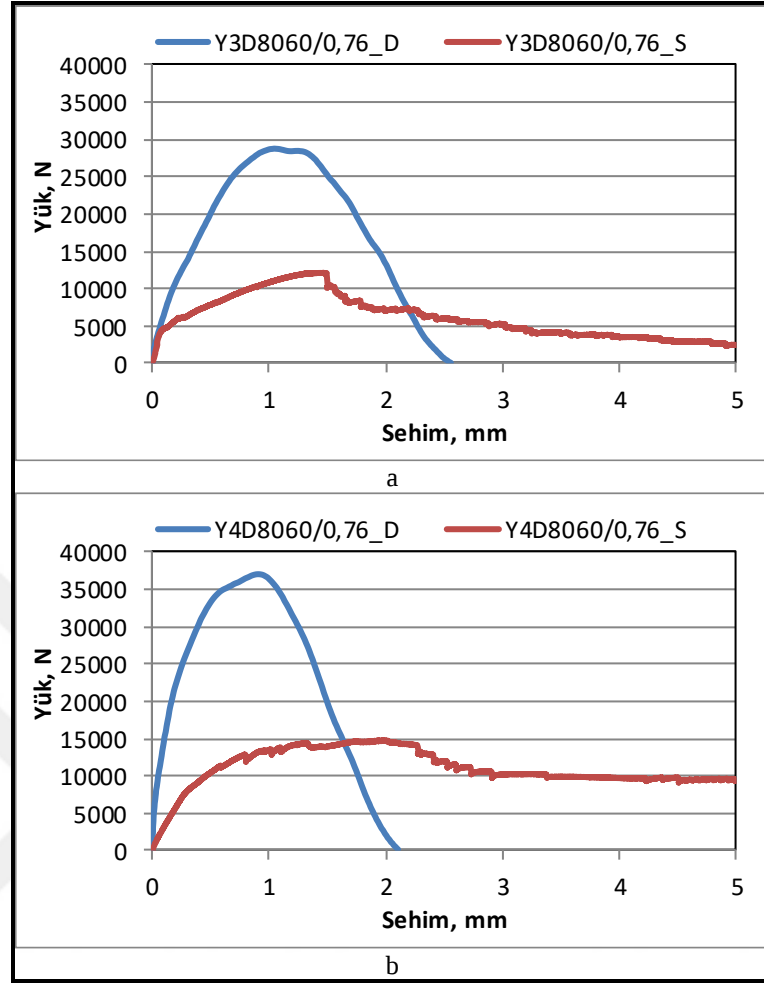
Şekil 4.36-4.38’de hacimce %0,76 oranında lif içeren örneklerin statik ve dinamik yükler altındaki yük-sehim grafikleri karşılaştırılmıştır. Y5D 65/60 ve Y4D 80/60 numunelerinin darbe eğilme dayanımı statik yüklemedekine kıyasla daha belirgin şekilde yüksektir.



Şekil 4.36 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 40/30, b) 3D 55/30

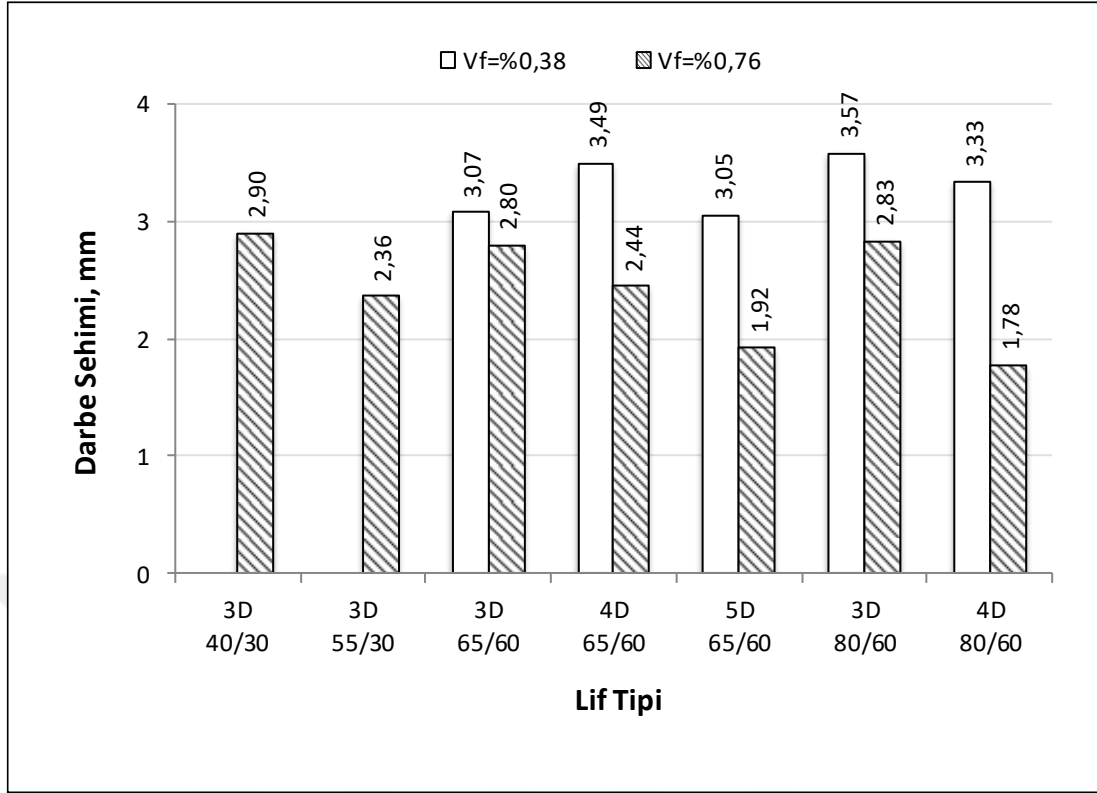


Şekil 4.37 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 65/60, b) 4D 65/60, c) 5D 65/60



Şekil 4.38 Y serisi %0,76 lif hacmine sahip örneklerin dinamik ve statik yükler altında yük-sehim grafikleri a) 3D 80/60, b) 4D 80/60

Şekil 4.39’da tek darbe deneyi sonrası numunelerin yapmış olduğu maksimum sehimler gösterilmiştir. Lif hacmi ve kanca sayısının artmasıyla darbe sonrası oluşan sehim değerlerinde azalma görülmüştür. Görünüm oranı artışı kısa liflerde (30 mm) ve 4D liflerde sehim değerini azaltırken 3D liflerde arttırmıştır.

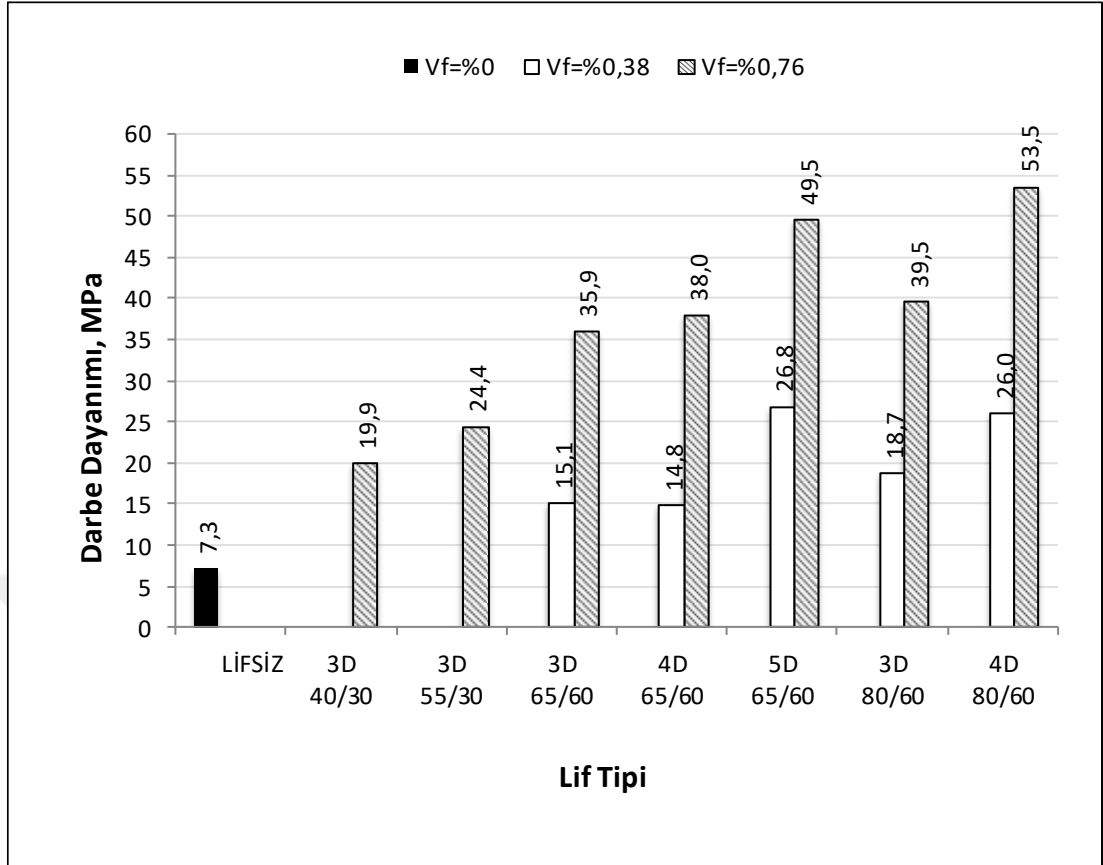


Şekil 4.39 Y serisi darbe sonrası sehim değerleri

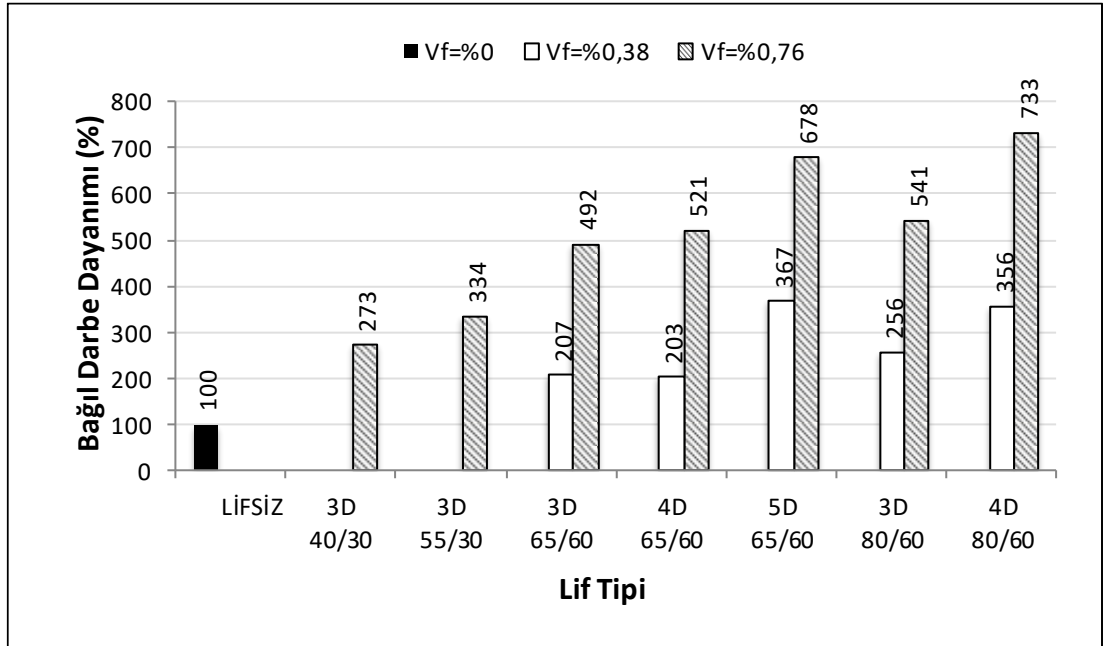
Tek darbe sonucu sehim değerleri incelendiğinde 3D 65/60 lifinin %0,38 lif hacminde 4D 65/60 liflerinden daha az sehim yapmış olduğu göze çarpmıştır. Ancak bu seride kırılma kesitine denk gelen ve kırılma kesitinin çekme bölgesinde konumlanan lif sayıları (Ortalama 25 adet) incelendiğinde darbe deneyi yapılan 3 örnekten 2 tanesinin ortalamanın üzerinde performans gösterdiği görülmüştür. Aynı şekilde %0,76 lif hacminde 3D 80/60 lifine sahip örneklerde beklenenin altında performans gözlenmiş ve bunun sebebi olarak kırılma kesitindeki etkin lif sayıları (Ortalama 43 adet) düşünülmüştür.

4.2.6.2 Yüksek Dayanımlı Seri Darbe Deneyi Eğilme Dayanımları

Darbe deneyi sonrası oluşan yük-sehim grafiklerindeki tepe yükü esas alınarak bulunan eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.40'da, lifsiz seriye göre bağıl eğilme dayanımları ise Şekil 4.41'de verilmiştir.



Şekil 4.40 Y serisi darbe etkisi altında eğilme dayanımları



Şekil 4.41 Y serisi darbe etkisi altında bağıl eğilme dayanımları

Darbe etkisi altındaki lifsiz betonda eğilme dayanımı 7,3 MPa iken %0,38 lif kullanılarak üretilen betonlarda bu değer %103 ile %267 arasında artmıştır. En küçük artış %103 ile 4D 65/60 lifine sahip betonlarda olurken en büyük artış %267 ile 5D 65/60 lifine ve %256 ile 4D 80/60 lifine sahip betonlarda olmuştur.

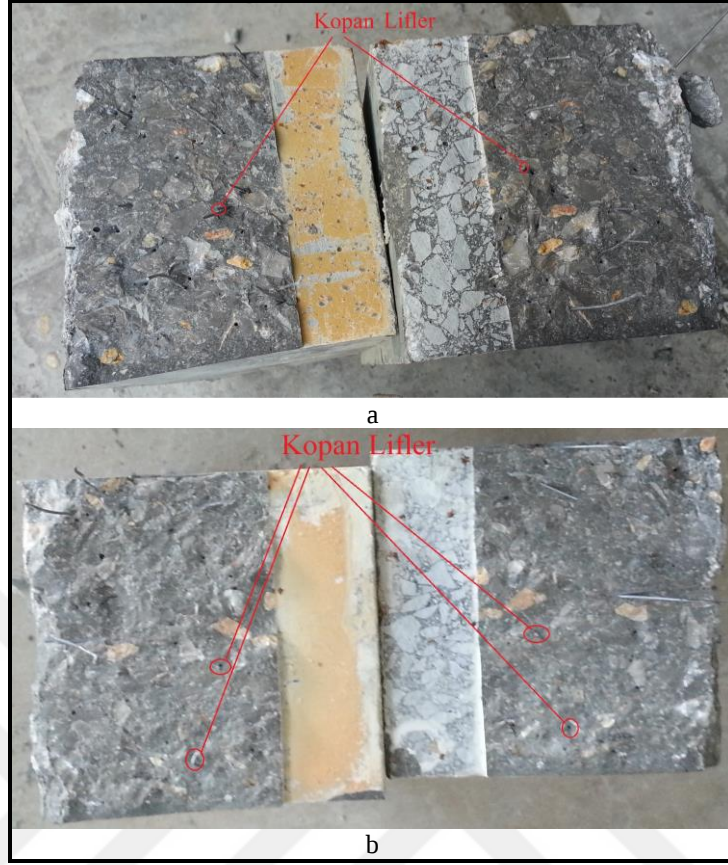
Görünüm oranının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓3D kanca geometrisinde 80/60 lif kullanımıyla 65/60 lif kullanımına oranla betonun eğilme dayanımında %24 artış, 4D kanca geometrisinde ise %76 artış olmuştur.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓65/60 lifler için 4D lif kullanımıyla 3D life kıyasla çok az bir azalma (%2) oluşmuştur. Bununla birlikte 3D liflere kıyasla çekme dayanımı yaklaşık 2 kat olan 5D lif kullanımı halinde eğilme dayanımı %77 oranında artmıştır.
- ✓80/60 lifler için 4D lif kullanımıyla 3D lif kullanımına göre 65/60 liflerdeki azalma eğiliminden farklı olarak %39 artış görülmüştür. 4D liflerin çekme dayanımının 3D liflere oranının 80/60 liflerde 65/60 liflere göre daha fazla olmasının buna sebep olabileceği düşünülmüştür.

Burada dikkat çeken 4D 65/60 serisinin eğilme dayanımı performansının 3D 65/60 serisinden düşük olmasıdır. Ancak kırılma kesitleri incelendiğinde 3D 65/60 serisinde ortalama 25 lif tespit edilmiş, yalnızca 1'er tanesi kopan lif olarak kaydedilmiştir, 4D 65/60 serisinde ise ortalama 22 lif tespit edilmiş ve bu liflerin 2 tanesi kopan lif olarak kaydedilmiştir (Şekil 4.42).



Şekil 4.42 Darbe yükleri altında kırılma kesitleri a) 3D 65/60 b) 4D 65/60 (Kişisel arşiv, 2017)

Darbe etkisinde %0,76 lif oranına sahip betonların eğilme dayanımları lifsiz betona göre %173 ile %633 arasında artış göstermiştir. En küçük artış %173 ile 3D 40/30 lifleriyle üretilen betonlarda olurken en büyük artış ise %633 ile 4D 80/60 lifi ve %578 ile 5D 65/60 lifi kullanılarak üretilen betonlarda olmuştur.

Görünüm oranının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓3D kanca geometrisindeki 55/30 lifiyle üretilen betonun eğilme dayanımını 40/30 lifiyle üretilen betonun eğilme dayanımına kıyasla %23 daha yüksek olarak bulunmuştur.
- ✓3D kanca geometrisindeki 80/60 lifler 65/60 liflere kıyasla betonun eğilme dayanımına %10 artış sağlamıştır. Bu artış 4D liflerde daha çarpıcı olup, %41 olarak gerçekleşmiştir.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓65/60 4D lifi betonun eğilme dayanımı 3D life kıyasla %6, 5D lifler ise 3D liflere göre %38 arttırmıştır.
- ✓80/60 liflerde uç geometrisinin etkisi 65/60 liflere kıyasla daha belirgin olmuştur. 4D lifler 3D liflere kıyasla eğilme dayanımında %35 artış sağlamıştır.

Lif uzunluğunun etkisi değerlendirildiğinde:

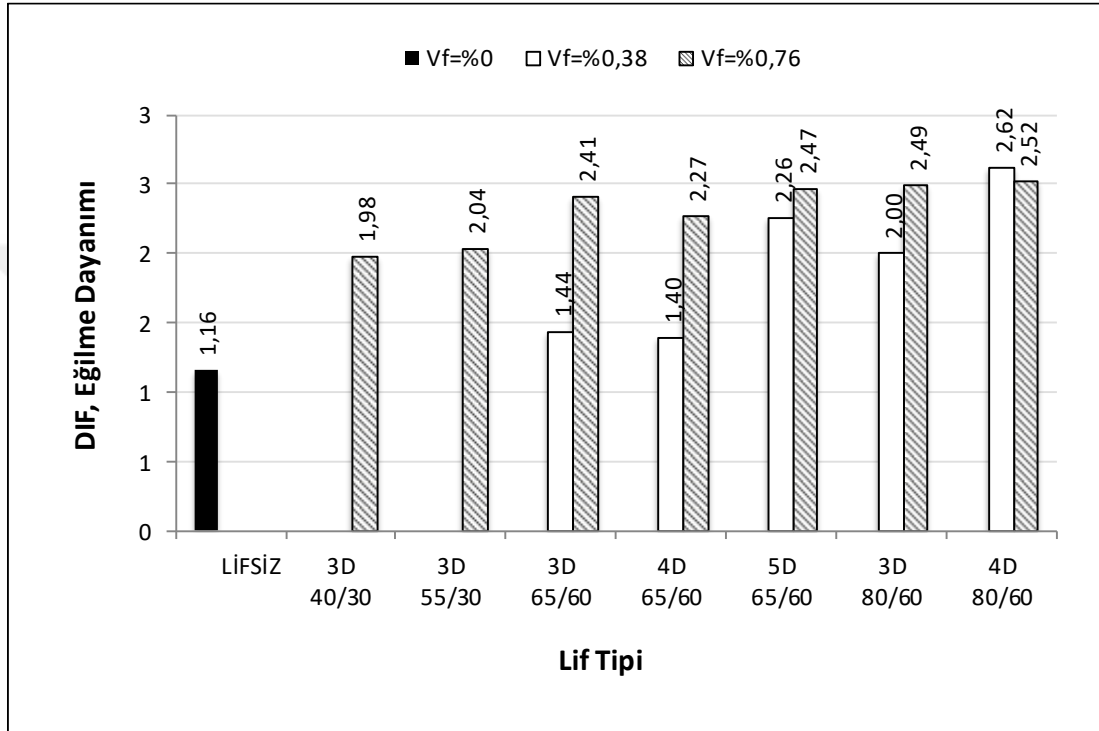
- ✓Benzer görünüm oranı ve uç geometrisine sahip olan (3D) 65/60 ve 55/30 lifleri kıyaslandığında 60 mm uzunluğa sahip olan 65/60 liflerin 30 mm uzunluğa sahip olan 55/30 liflere kıyasla eğilme dayanımında %47 artış sağlamıştır.

Şekil 4.43'te dinamik ve statik yüklemelerdeki eğilme dayanımları baz alınarak hesaplanan DIF (dinamik artış faktörü) değerleri gösterilmiştir. DIF hesabında kısaca bir serinin dinamik yüklemesindeki eğilme dayanımının statik yüklemesindeki eğilme dayanımına oranı bulunmuştur. Yükleme hızı arttıkça matriste çatlakların başlaması ve yayılması zorlaşmaktadır. Bu sebeple, lif-matris arayüzeyinde mikro çatlak oluşumuna yol açan yük darbe yüklemelerinde statik yüklere kıyasla daha yüksek olmakta, betona gömülü çelik lifler yükleme hızındaki artışla daha büyük yükleri taşıyabilmektedir. Lif kullanımıyla DIF değerlerinde artış oluşmuştur. Lifli betonların yalın betonlara kıyasla yükleme hızındaki artışa daha duyarlı olduğu ve lif hacmindeki artışla DIF değerinin arttığı Bindiganavile ve Banthia, (2001) ve Gopalaratnam ve Shah, (1986) tarafından da rapor edilmiştir.

- ✓Lifsiz betonda 1,16 olan eğilme dayanımı DIF değeri %0,38 lif hacminde 3D ve 4D 65/60 liflerine sahip betonlarda ortalama 1,4 değerini alırken 5D 65/60, 3D 80/60 ve 4D 80/60 serilerinde ortalama 2,3 olmuştur. Lif kanca sayısının eğilme dayanımı DIF değerlerine etkisi düşük lif dozajlarında belirgin olmuş, yüksek lif dozajlarında ise önemsiz olmuştur.
- ✓Eğilme dayanımı DIF değerleri %0,76 lif hacmine sahip betonlarda ise kısa liflerde (3D 40/30 ve 55/30) ortalama 2, uzun liflerde ise (3D, 4D ve 5D 65/60 ile 3D ve 4D 80/60) 2,4 değerini almıştır. Uzun liflerin

kullanılmasıyla daha yüksek eğilme dayanımı DIF değerleri elde edilmiştir.

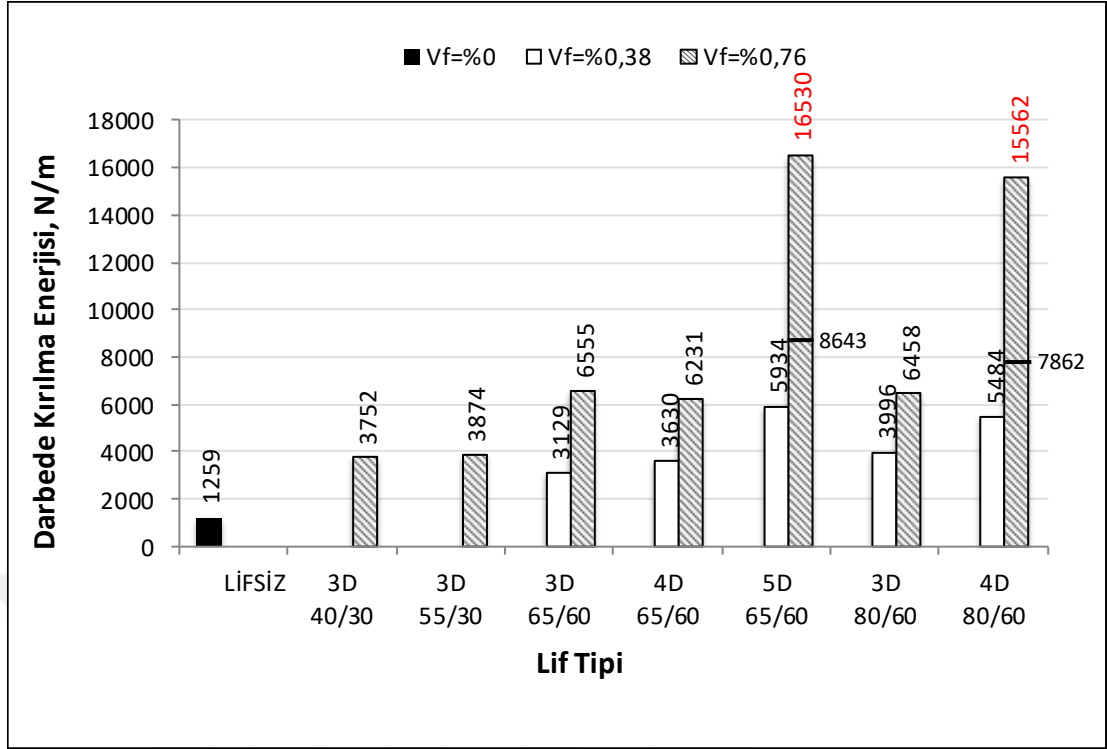
- ✓Görünüm oranı artışı %0,38 lif dozajına sahip betonların eğilme dayanımı DIF değerlerinde artış oluştururken, %0,76 lif hacmine sahip betonlarda etki yapmamıştır.



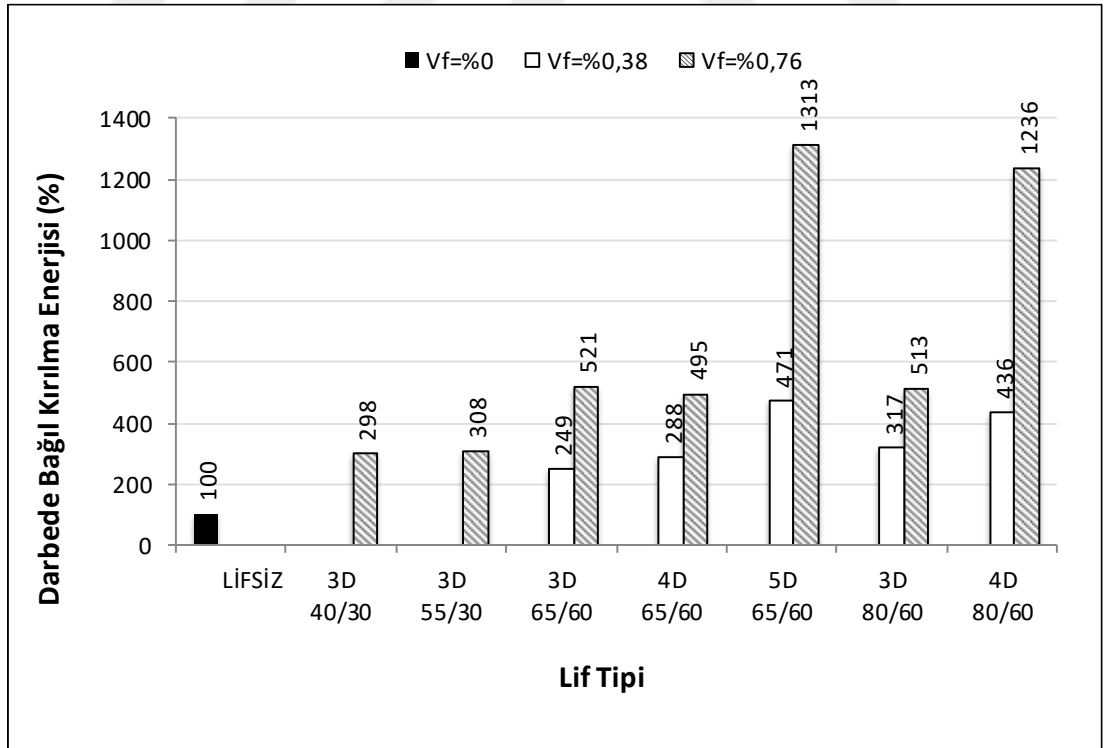
Şekil 4.43 Y serisi darbe etkisi altında eğilme dayanımı dinamik artış faktörleri

4.2.6.3 Yüksek Dayanımlı Seri Darbe Deneyi Kırılma Enerjileri

Yüksek dayanımlı seride yapılan darbe deneyleri sonrasında oluşan yük-sehim eğrilerinin altında kalan alan hesabıyla ortaya çıkan enerji yutma kapasiteleri Şekil 4.44'te verilmiştir, lifsiz seriye göre bağlı kırılma enerjileri ise Şekil 4.45'te verilmiştir.

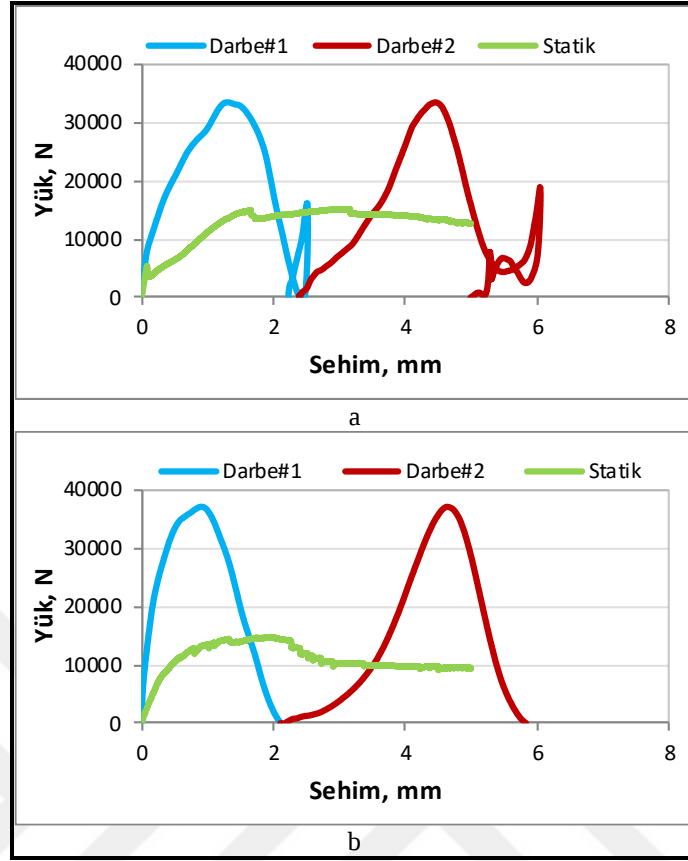


Şekil 4.44 Y serisi darbe etkisi altında kırılma enerjileri



Şekil 4.45 Y serisi darbe etkisi altında bağlı kırılma enerjileri

Özellikle %0,76 oranında lif kullanımıyla 5D 65/60 ve 4D 80/60 liflerinin gösterdiği enerji yutma kapasitesi değerleri diğer liflerin çok üstünde olmuştur. Öte yandan bu iki lif ile üretilen betonlarda hedeflenen sehim değerini tutturabilmek için 2. darbelerin de vurulması gerektiğinin göz ardı edilmemesi gerekir. Darbe deneylerinde 5 mm ye kadar ölçülen statik yükleme sonuçlarıyla kıyaslanabilmesi için 5 mm ve altında sehim göstermesi hedeflenmiş ve bunun için seçilen uygun darbe yüksekliği ve ağırlığı sonucunda tüm seriler 3 ± 1 mm sehim yapmıştır. 2 mm ve altında sehim yapan 5D 65/60 ve 4D 80/60 serilerinde 2 darbe vurularak hedeflenen sehimi yapmaları sağlanmıştır. 5D 65/60 serisinde 1. darbenin kırılma enerjisi 8643 N/m olurken 2. darbe ile 16530 N/m değerine ulaşılmıştır. 4D 80/60 serisinde ise 1. darbede 7862 N/m olan kırılma enerjisi 2. darbenin vurulmasıyla 15562 değerine ulaşmıştır (Şekil 4.44). Şekil 4.46’da 2 darbe vurulan serilerin yük-sehim grafikleri verilmiştir. Numunenin darbe yüklemesinde maksimum deplasmana ulaştıktan sonra bir miktar elastik toparlanma yaparak nihai deplasmana gerilemesi açıkça görülebilmektedir. Şekil 4.46’da dikkat çeken önemli bir nokta ardışık uygulanan darbe etkilerinde kaydedilen tepe yükü seviyeleridir. Birinci darbe etkisi nedeniyle bir miktar hasar gören kirişe ikinci darbe uygulandığında kirişin hemen hemen birinci darbede olduğu kadar yük taşıyabildiği görülmektedir. Bu durum birinci darbe sonucunda kirişte çentik ucundan başlayarak ilerleyen çatlağın tüm kesit boyunca ilerlemeden lifler tarafından durdurulduğu, dolayısıyla kesitin üst kısımlarındaki liflerin birinci darbede aktif olmadıkları, ikinci darbede ise kesitin kalan kısmına çatlağın ilerlemesiyle ilk darbede etkin olmayan liflerin devreye girmesi sonucunda hasarlı kirişin yük taşımaya devam edebildiği şeklinde yorumlanmaktadır. Tekrarlı darbe etkisi altındaki kompozitler için benzer davranış daha önce Dancygier ve diğer. (2012) ve Aydın ve diğer. (2015) tarafından da rapor edilmiştir.



Şekil 4.46 2 darbe vurulan a) Y5D6560, b) Y4D8060 serileri yük-sehim grafikleri

Darbe yükleri altında 1259 N/m olan lifsiz betonun kırılma enerjisi %0,38 oranında lif kullanımıyla %149 ile %371 artış göstermiştir. En küçük artış %149 ile 3D 65/60 lifi ile oluşurken en büyük artış %371 ile 5D 65/60 lifi ile olmuştur.

Görünüm oranının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Lif dozajı %0,38 için lif görünüm oranındaki artışla kırılma enerjisi artışı 4D liflerde (%51) 3D liflere göre (%28) daha belirgin olmuştur.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓Uç geometrisindeki gelişmenin kırılma enerjilerine etkisi 65/60 liflerde 4D lif kullanımında 3D life oranla (%16) artış, 5D lif kullanımında ise daha çarpıcı hale gelerek 3D life göre %90 artış şeklinde olmuştur.
- ✓Uç geometrisindeki değişimin kırılma enerjisine etkisi lif görünüm oranındaki artışla daha belirgin olmuştur. 65/60 liflerde 4D lif kullanımı

halinde kırılma enerjisindeki artış %16 iken, 80/60 liflerde bu artış %37'dir.

%0,76 oranında lif kullanımı halinde ise lifsiz betona göre enerji yutma kapasiteleri %198 ile %1213 arasında artış göstermiştir. En küçük artış %198 ile 3D 40/30 lifi ile oluşurken en büyük artış %1213 ile 5D 65/60 lifi ile olmuştur. Lif dozajındaki artışla kırılma enerjisi artışları daha belirgin bir hal almıştır. Görünüm oranı ve kanca sayısının artışı kırılma enerjisine düşük lif dozajındaki gibi etki yapmıştır. Bununla birlikte etki daha büyük mertebede ortaya çıkmıştır. Örneğin %0,38 lif hacminde 5D 65/60 lif kullanımı ile kırılma enerjisi 3D life göre %90 artarken, %0,76 lif hacminde bu artış %152 olmuştur.

Görünüm oranının kırılma enerjisine etkisi değerlendirildiğinde:

- ✓ Kısa liflerde 3D kanca geometrisindeki 55/30 lifiyle üretilen betonun kırılma enerjisi 40/30 lifiyle üretilen betonun kırılma enerjisine benzerdir.
- ✓ Uzun liflerde 3D 80/60 lif kullanımıyla elde edilen kırılma enerjisi 3D 65/60 lifine benzerken, 4D liflerde görünüm oranı etkisi çok çarpıcı olmuş, 80/60 lifi 65/60 lifine göre %150 kırılma enerjisi artışı sağlamıştır.

Statik yükler altında 3D 80/60 lifiyle üretilen betonların kırılma enerjisinin 65/60 lifiyle üretilenlere kıyasla %24 daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 4.20). Dinamik yükler altında ise her iki betonun kırılma enerjileri benzerdir. Bu durumun dinamik yükler altında kopan lif sayısında meydana gelen azalmayla ilişkili olduğu düşünülmüştür. Kırılma kesitleri incelendiğinde statik yükler altında 3D 65/60 serisinde kopan lif sayısı ortalama 3 iken, 80/60 serisinde ortalama 5 lif kopmuştur. Dinamik yüklemede ise kopan lif sayısı her iki lif için 1 adet olmuştur.

Kanca sayısının etkisi değerlendirildiğinde:

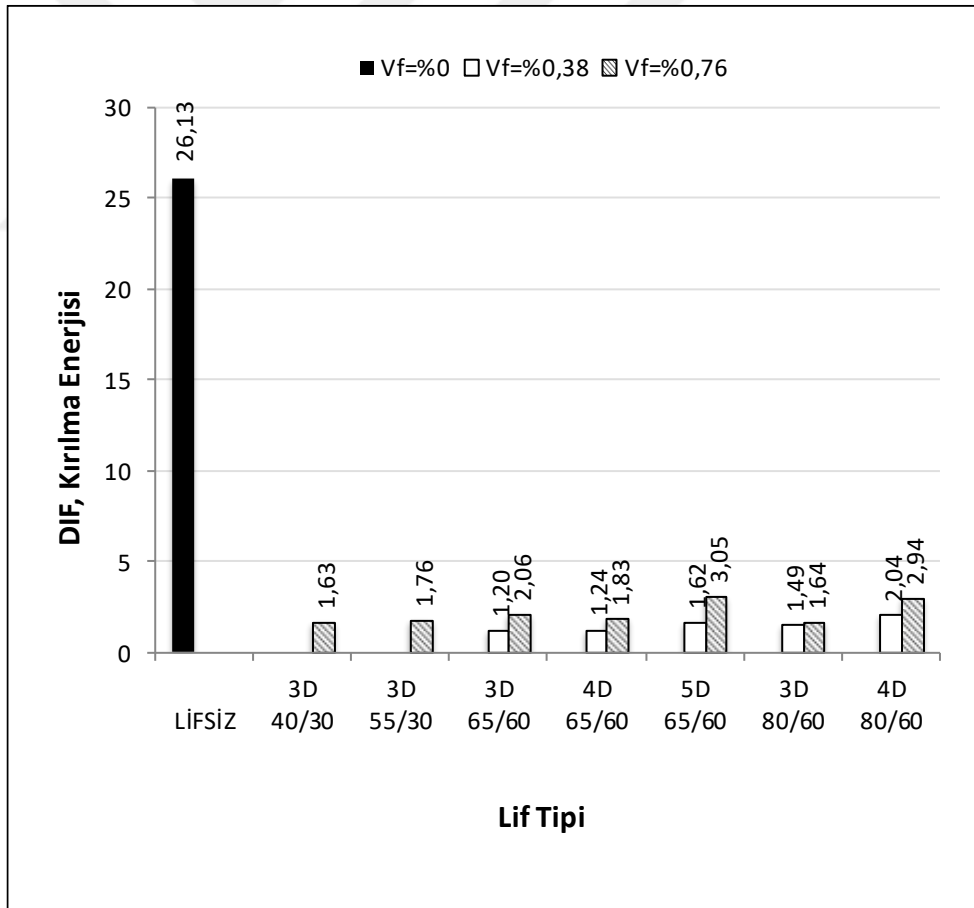
- ✓ 4D 65/60 lifli betonun kırılma enerjisi 3D lifli betona benzerken, 5D liflerin kullanımı halinde 3D liflere göre çok çarpıcı (%152) kırılma enerjisi artışı oluşmuştur.

✓80/60 liflerde uç geometrisinin etkisi 65/60 liflere kıyasla daha belirgin olmuştur. 4D lifler 3D liflere kıyasla kırılma enerjisinde %141 artış sağlamıştır.

Lif uzunluğunun etkisi değerlendirildiğinde:

✓Lif uzunluğunun kırılma enerjisine etkisi kısa liflerde uzun liflere göre daha belirgin olmuştur. Benzer görünüm oranında lif uzunluğunun 30 mm'den 60 mm'ye artışı kırılma enerjisini oldukça çarpıcı bir şekilde (%69) arttırmıştır.

Şekil 4.47'de dinamik ve statik yüklemelerdeki kırılma enerjileri baz alınarak hesaplanan DIF (dinamik artış faktörü) değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.47 Y serisi darbe etkisi altında kırılma enerjisi dinamik artış faktörleri

Kırılma enerjisi için DIF hesabında serilerin dinamik yüklemedeki kırılma enerjisinin statik yüklemedeki kırılma enerjisine (dinamik yüklemeler sonrası oluşan ortalama sehim değerine kadarlık kısım) oranı bulunmuştur. Düşük hızlı darbe sistemleri için literatüre paralel sonuçlar elde edilmiştir. Lif hacmi ve lif kanca sayısı arttıkça elde edilen kırılma enerjisi DIF değerlerinde artış oluşmuştur.

Şekil 4.47’de lifsiz beton için kırılma enerjisi DIF değerinin oldukça yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Literatürde eğilme örnekleri üzerinde düşük hızlı yüklemeye yapılan bu türden darbe deneylerinde lifsiz beton örneklerin eğilme dayanımlarında çok fazla görülmesi de kırılma enerjilerinde aşırı yüksek değerlere rastlanabilmektedir. Bu da DIF değerlerinin aşırı miktarda artmasına sebep olmaktadır. Darbe etkisi altındaki lifsiz betonlarda kaydedilen yüksek kırılma enerjisi değerlerinin, yük-sehim eğrisinin maksimum yük sonrası kuyruk kısmı ile karakterize edilen kırılma gelişme bölgesinin dinamik yüklemede atalet etkilerinden çok fazla etkilenmesinden dolayı daha uzun olduğu ve buna bağlı olarak da dinamik yükleme altında yüksek kırılma enerjisi değerlerinin olduğu rapor edilmiştir (Ozbolt, Weerheijm ve Sharma, 2013). Ayrıca düşük hızlı darbe deneylerinde kırılma enerjisinin oluşan mikro çatlaklardan eğilme dayanımı hesabındaki tepe yüküne göre çok daha fazla etkilendiği belirtilmiştir (Zhang ve diğer., 2009).

BÖLÜM BEŞ

GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

5.1 Genel Değerlendirme

Tez kapsamında yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çökme deneyi sonuçlarına göre işlenebilirlik üzerindeki esas değişken matrisle eklenen çelik lif miktarıdır. Çelik lif miktarı, lif uzunluğu, görünüm oranı ve kanca sayısındaki artışla işlenebilirlikte azalma meydana gelmiş, aynı işlenebilirlik için gerekli katkı ihtiyacı artmıştır.

Normal dayanımlı beton serisinde çelik lif ilavesiyle beton yoğunluğunda yaklaşık %1, yüksek dayanımlı beton serisinde ise %0,38 lif ilavesi ile yalın betona göre yoğunlukta yaklaşık %4, %0,76' lif hacminde ise yaklaşık %11 artış meydana gelmiştir.

Normal dayanımlı beton serisinde çelik lif kullanımı ile basınç dayanımında yaklaşık %6 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Yüksek dayanımlı seride ise hacimce %0,38 lif kullanımıyla %3, %0,76 lif kullanımıyla ise %17 oranında basınç dayanımı artışı gerçekleşmiştir. Yüksek dayanımlı beton serisinde basınç dayanımlarında lif ilavesiyle oluşan artışın bu beton serisinin işlenebilirliğinin daha yüksek olması nedeniyle sıkıştırma işleminin daha etkili bir şekilde gerçekleştirilmesinin beklenen bir sonucudur.

Statik eğilme yükleri altında yük-sehim ilişkileri değerlendirildiğinde, normal dayanımlı betonlarda %0,38 lif hacminde yalnızca 4D ve 5D liflerde deformasyon sertleşmesi davranışı görülürken, %0,76 lif hacminde 3D 40/30 serisi hariç tüm betonlarda deformasyon sertleşmesi görülmüştür. Yüksek dayanımlı betonlarda ise her iki lif hacminde ve tüm serilerde deformasyon sertleşmesi davranışı görülmüştür.

Çelik lifli betonların eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi, kullanılan lifin hacmi, uzunluğu, çekme dayanımı ve kanca sayısındaki artışla gelişmiştir.

Lif hacminin %0,38'den %0,76'ya çıkışıyla normal dayanımlı beton serisinde %20-%77, yüksek dayanımlı beton serisinde ise %42-115 arasında eğilme dayanımı artışı ortaya çıkmıştır. Kırılma enerjisindeki artış ise sırasıyla, %18-98 ve %44-112 arasında olmuştur.

Lif uç geometrisinin eğilme dayanımına ve kırılma enerjisine etkisi 80/60 liflerde 65/60 liflere kıyasla daha belirgin olmuştur. Örneğin, yüksek dayanımlı beton serisinde %0,76 lif hacminde 4D 65/60 lifi kullanımıyla eğilme dayanımı 3D lifi kullanımına göre %12 artarken, 80/60 lif kullanımı halinde uç geometrisindeki bu değişiklik %35 artış sağlamıştır. Kırılma enerjisi için bu artış oranları daha belirgin olup, sırasıyla %11 ve %73'tür.

Lif uç geometrisindeki değişim (3D, 4D ve 5D 65/60 lifleri) incelendiğinde, 4D lifler 3D liflere göre eğilme dayanımı ve kırılma enerjisinde önemli bir etki yaratmazken, 5D lif kullanımı halinde eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi önemli ölçüde gelişmiştir. Bu etki yüksek dayanımlı betonda yüksek lif dozajında, düşük dayanımlı betonda ise düşük lif dozajında oldukça belirgin olmuştur. Yüksek dayanımlı betonda %0,76 lif hacminde eğilme dayanımında ve kırılma enerjisinde 3D life kıyasla %35, normal dayanımlı beton eğilme dayanımında %0,38 lif hacminde %65 kırılma enerjisinde ise %95 artış kaydedilmiştir.

Lif görünüm oranının eğilme dayanımına etkisi 4D liflerde 3D liflere kıyasla çok daha belirgin olmuştur. Normal dayanımlı beton serisinde görünüm oranındaki artışla eğilme dayanımı her iki lif dozajında ve iki lif türü için artmıştır. Yüksek dayanımlı betonda ise, 3D lifler için lif hacmi %0,38 olduğunda görünüm oranındaki artışla eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi azalırken, %0,76 lif dozajında eğilme dayanımı artmış fakat kırılma enerjisi azalmıştır. 4D türü lifler için ise her iki lif dozajında da eğilme dayanımı ve kırılma enerji artmış veya önemli ölçüde değişim göstermemiştir. Eğilme dayanımında %0,76 lif dozajında oluşan artış, 3D lifte

oldukça düşük seviyede (%6) iken, 4D liflerde önemli mertebelerde (%28) olmuştur. Kırılma enerjisi ise, görünüm oranındaki artışla 3D liflerde %24 azalırken, 4D liflerde %18 artmıştır. Bu durum kullanılan liflerin çekme dayanımı ile önemli ölçüde ilişkili olup, 3D 80/60 liflerin dayanımının yetersizliği sonucu meydana gelen lif kopmaları ile ilişkilidir.

Lif uzunluğunun artmasıyla eğilme dayanımı ve kırılma enerjisinde artış görülmüştür. Bu artışlar beton dayanımındaki artışla daha çarpıcı bir hal almıştır.

Beton dayanımı arttıkça aynı lif tipi ve dozajı için eğilme dayanımları artmıştır. Bununla birlikte, kırılma enerjileri lif hacmi 0,38 olduğunda 80/60 3D ve 4D liflerde, lif hacmi 0,76 olduğu durumda ise 3D 80/60 ve 3D 55/30 lifleri için değişmemiştir. Bu durum kısa liflerde liflerin aderans boyunun yeterli olmamasına, uzun liflerde ise lif dayanımının yetersiz kalması sonucu lif kopmalarının artmasına bağlanmıştır.

Darbe yükleri altında statik yüklemeye göre eğilme dayanımı ve kırılma enerjileri artış göstermiştir.

Lif hacmi ve kanca sayısının artmasıyla darbe sonrası oluşan sehim değerleri azalmıştır.

Dinamik yüklemedeki eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi değerlerinin statik yüklemedekilere oranı DIF (dinamik artış faktörü) bakımından kıyaslandığında, kısa liflerle üretilen betonların DIF değeri (eğilme dayanımı için yaklaşık 2) uzun liflere (eğilme dayanımı için 2,3-2,6 arasında) kıyasla daha düşüktür. Ayrıca, düşük lif dozajlarında 65/60 3D ve 4D lifler için DIF değerleri (eğilme dayanımı için 1,4) diğer liflere kıyasla daha düşüktür. Darbe yükleri bakımından en üstün performans, hacimce %0,76 oranında 4D 80/60 ve 5D 65/60 lifleri içeren betonlardan elde edilmiştir. Bu betonların eğilme yükleri altında tek darbeye yaptığı sehim diğer lifli betonların yarısı kadar olmuştur.

Sonuç olarak:

- ✓Çelik lif kullanımı ile betonun mekanik özelliklerinde oluşan bu gelişmelerde lifin çekme dayanımının katkısı oldukça önemli düzeyde olup, lifin mekanik özelliklerinde yeterli düzeyde gelişme sağlanmaksızın lif görünüm oranının ve lif kanca sayısının arttırılmasının betonların statik ve darbe yükleri altındaki performansına önemli bir katkı sağlamayacağı görülmüştür.
- ✓Özellikleri geliştirilmiş, 5D 65/60 ve 4D 80/60 tipi lifler 3D tipi liflere kıyasla daha düşük oranlarda kullanılarak daha ekonomik ve daha düşük dozajda lif kullanımının bir sonucu olarak daha işlenebilir (yerleştirme ve sıkıştırma vb.) beton tasarımlarının mümkün olabileceği görülmüştür.
- ✓Yüksek dayanımlı betonlarda lif dayanımı, görünüm oranı ve uç kanca geometrisinin lif kopmaları üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermiş olup, yüksek dayanımlı lifli betonların tasarımının bu ilişkiler ve betonun dayanım sınıfı göz önüne alınarak yapılması gerektiği ortaya çıkarılmıştır.

5.2 Öneriler

Bu konuda çalışma yapacak araştırmacılara:

- ✓Kendiliğinden yerleşen çelik lifli betonlar ve yüksek oranda mineral katkı içeren betonlar için benzer bir çalışmanın yapılması,
- ✓Farklı lif hacimleri de denenerek basınç, eğilme ve darbe dayanımları açısından optimizasyon çalışması yapılması,
- ✓Darbe deneylerinde farklı darbe ağırlığı ve yüksekliği kullanılarak çarpan cisim hız ve enerjisinin lifli betonların darbe dayanımına etkisinin incelenmesi önerilir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 544. (1988). Measurement of properties of fibre reinforced concrete. *ACI Journal*, 85 (6), 583-593.
- ACI Committee 544.1R-96. (1973). State of the art report on fiber reinforced concrete. *ACI Journal*, 70 (11), 729-744.
- ACI Committee 544.1R-96. (2002). State of the art report on fiber reinforced concrete. *ACI Journal*, 544, 1-66.
- ACI Committee 544.3R-93. (1998). Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. *ACI Journal*, 90 (1), 94-103.
- ACI Committee 544.4R-88. (1988). Design considerations for Steel fiber reinforced concrete. *ACI Journal*, 85 (5), 563-579.
- Akın, S. K. (1999). *Kolon giriş birleşim bölgesinde fiber betonun taşıma kapasitesine etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Alparslan U. (2015). *Çelik lif uç geometrisinin beton özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Arslan, A. (1993). Çelik lifli betonların özellikleri ve kullanım potansiyeli. *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 369, 29.
- Arslan, A. (1995). Mixed mode fracture performance of fiber reinforced concrete under impact loading. *Materials and Structures*, (28), 473-478.
- Arslan, A. ve Aydın, A. C. (1999). Lifli betonların genel özellikleri. *Hazır Beton Dergisi*, Kasım-Aralık, 67-75.

- Ashour, A. S., Wafa, F. F. ve Kamal M. I. (2001). Effect of the compressive strength and tensile reinforcement ratio on the flexural behavior of fibrous concrete beams. *Engineering Structures, Elsevier Science Ltd*, 22 (9), 1145-1158.
- Aydın S. (2013). Effects of fiber strength on fracture characteristics of normal and high strength concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 57 (2), 191–200.
- Aydın, S., Yardımcı, M. Y., Baradan, İ. B. (2015). *Darbe ve aşınma etkilerine dayanıklı Portland Çimentosu içermeyen bağlayıcı geliştirilmesi*. Tübitak projesi, (112M262). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Yardımcı, M. Y. ve Aydın, S. (2016). Alkalilerle aktive edilmiş standard kürlü harçların statik ve dinamik yükleme altındaki mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18-3 (54), 381-398.
- Banthia, N. (1987). *Impact resistance of concrete*. Doktora Tezi, British Columbia Üniversitesi, Vancouver.
- Banthia, N., Mindess, S., Bentur, A. ve Piegion, M. (1989). Impact testing of concrete using a drop-weight impact machine. *Experimental Mechanics*, 29 (1), 63-69.
- Balaguru, P. (1992). Properties of fiber reinforced rapid hardening cement composites. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, 300-310.
- Banthia, N., Mindess, S., Bentur, A., Pigeon, M. 1988. Impact testing of concrete using a drop-weight impact machine. *Experimental Mechanics*, 29 (1), 63-69.
- Banthia, N. ve Trottier, J. F. (1995). Concrete reinforced with deformed steel fibres, part II: toughness characterization. *ACI Materials Journal*, 92 (2), 146-154.

- Banthia, N. P., Mindness, S. ve Trottier, J. F. (1996). Impact resistance of steel fibre reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 93-M54, 472-479.
- Baradan B., Türkel S., Yazıcı H., Ün H., Yiğiter H., Felekoğlu B., Tosun Felekoğlu K., Aydın S., Yardımcı M. Y., Topal A., Öztürk A. U. (2012). *Beton*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yayınları.
- Bayramov, F. (2004). *Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Bayramov, F., Taşdemir, C. ve Taşdemir, M. A. (2004). Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method. *Cement and Concrete Composites*, 26 (6), 665–675.
- Bentur, A. ve Mindness, S. (1990). *Fiber reinforced cementitious composites*. Throwbridge: E and FN Spon.
- Bentur, A. ve Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. New York: Taylor and Francis.
- Betterman, L. R., Ouyang, C. ve Shah, S. P. (1995). Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar. *Advanced Cement Based Materials*, 2, 53-61.
- Bindiganavile, V. ve Banthia N. (2001). Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading-part 2: Flexural toughness. *ACI Materials Journal*, 98 (1).
- Birkimer, D. L. ve Lidemann, R. (1971). Dynamic tensile strength of concrete materials. *ACI Materials Journal*, 68 (8), 47-49.
- Brandt, A. M. (1995). *Cement-based composites: materials, mechanical properties and performance*. Londra: E and FN Spon.

- Butler, J. E. ve Keating, J. (1981). Preliminary data derived using a flexural cyclic loading machine to test plain and fibrous concrete. *RILEM Materials and Structures*, 14 (79), 25-33.
- Dancygier, A., Katz, A., Yardımcı, M. Y. ve Yankelevsky, D. (2012). Behavior of high ductility cement composite beams under low impact. *International Journal of Protective Structures*, 3 (2), 177-192.
- Dey, V., Bonakdar A. ve Mobasher B. (2014). Low-velocity flexural impact response of fiber-reinforced aerated concrete. *Cement & Concrete Composites* 49 (2014), 100–110.
- Eren, Ö. ve Çelik T. (1997) Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 11, 372-382.
- Fanelle, D. ve Naaman A. E. (1985). Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression, *Journal of the American Concrete Institute*, 82(4), 475-483.
- Gao, J., Sun, W. ve Morino K. (1997). Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 344 (2), 307-313.
- Gopalaratnam V.S. ve Shah S.P. (1986). Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact loading. *Journal of the American Concrete Institute*, 83 (1), 117-126.
- Gopalaratnam, V. S. ve Shah S. P. (1987). Tensile failure of Steel fiber-reinforced mortar. *Journal of Engineering Mechanics*, 113 (5), 635-652.

- Hao, Y., Hao, H. ve Chen, G. (2016). Experimental investigation of the behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete beams subjected to drop-weight impact loads. *Materials and Structures*, 49 (2016) 353–370.
- Isla, F., Ruano, G. ve Luccioni, B. (2015). Analysis of steel fibers pull-out. Experimental study. *Construction and Building Materials*, 100, 183-193.
- Kayalı, O., Haque, M. N. ve Zhu, B. (2003). Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25 (2), 207-213.
- Kobayashi, K. ve Cho, R. (1981). Flexural behavior of polyethylene fibre reinforced concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3 (1), 19-25.
- Lee, I. (2002). *Complete stress-strain characteristic of high performance concrete*. PhD. Thesis, New Jersey Institute of Technology, New Jersey.
- Look, T. S. ve Xiao, J. R. (1999). Flexural strength assessment of steel fiber reinforced concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 11 (3), 188-196.
- Meddah, A., Belagraa, L. ve Beddar, M. (2015). Effect of the fibre geometry on the flexural properties of reinforced steel fibre refractory concrete. *Procedia Engineering*, 108 (2015), 185–192.
- Mindess S. ve Yan, C. (1992). Bond of reinforced bars in fiber reinforced concrete under impact loading. *Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, Edited by H.W. Reinhardt ve A.E. Naaman, London, 26 (1), 9-14.

- Naaman, A. E. ve Gopalartnam, V. S. (1983). Impact properties of steel fibre reinforced concrete in bending. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 5 (4), 225-233.
- Najatara, M. C., Dhang, N. ve Gupta, A. P. (1999). Variations in impact resistance of steel reinforced concrete subjected to drop weight. *Cement and Concrete Research*, 29 (9), 989-995.
- Ong, K. C. G., Basheerkhan, M. ve Paramasivam, P. (1999). Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact. *Cement and Concrete Composites*, 21 (5-6), 391-401.
- Ozbolt, J., Weerheijm, J. ve Sharma, A. (2013). Dynamic tensile resistance of concrete-Split Hopkinson Bar Test. *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-8*.
- RILEM Technical Committee 50-FMC (1985). Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams. *Materials and Structures*, 18, (106), 287-291.
- Robins, P. J. ve Calderwood, R. W. (1978). Explosive testing of fiber reinforced concrete. *Concrete*, 12 (1), 26-38.
- Schrader, E. K. (1981). Impact resistance and test procedure for concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 78 (6), 141-146.
- Sevil, C. (2002). *Uçucu küllü, lifli beton kompozitinde lif tipinin beton özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Shafei, Y. (2012). *Influence of hooked-end steel fibers on some engineering properties of Sifcon*. Yüksek Lisans Tezi, Eastern Mediterranean Üniversitesi, Gazimağusa.

- Song, P. S. ve Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18 (9), 669-673.
- Song, P. S., Wu J. C., Hwang, S. ve Sheu, B. C. (2005). Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel–polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 19, 1-9.
- Suaris, W. ve Shah, S. P. (1982). Strain rate effects in fiber reinforced concrete subjected to impact and impulsive loading. *Composites*, 13 (2), 153-159.
- Şahmaran, M. ve Yaman, O.I. (2007). Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Construction and Building Materials*, 21 (1), 150-156.
- Şimşek, O. (2004). *Beton ve beton teknolojisi*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Tabak, V. (2004). *Çelik lifli betonda lif ve lif boy/çap özelliklerinin değişiminin betonun mekanik özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Taşdemir, M. A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, 1 (2), 1-11.
- Taşdemir, M. A. (2003). Çelik tel donatılı betonlar. *Seminer Notları, İMO İzmir, Haziran*.
- Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Kocatürk, A. N. ve Yerlikaya, M. (2004). Betonun performansa göre tasarımında yeni gelişmeler. *Beton 2004 Kongresi Bildirileri, Haziran, İstanbul*.
- Taşdemir, M. A., Şengül, Ö. ve Şengül, C. (2013). Çelik tel donatılı betonların mekanik davranışı. *İston Teknik Rapor, İTÜ*.

Tatnall P. C. (2006). Fiber-Reinforced Concrete. J. F. Lamond ve J. H. Pielert, (Ed.), *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials* içinde (578-590).

Tokyay, M., Ramyar, K. ve Turanlı, L. (1991). Polipropilen ve çelik lifli yüksek dayanımlı betonların basınç ve çekme yükleri altındaki davranışları. 2. *Ulusal Beton Kongresi, İstanbul*, 303-311.

TS 10513. (1992). *Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS 10514. (1992). *Beton-çelik tel takviyeli-çelik telleri betona karıştırma ve kontrol kuralları*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS 10515. (1992). *Beton-çelik tel takviyeli-eğilme mukavemeti deney metodu*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

Uğurlu, A. (1994). Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun özellikleri ve su yapılarında kullanılması. *DSİ Teknik Bülteni* (80), 17-25.

Ünal, B., Köksal, F. ve Eyyubov, C. (2003). Polipropilen ve çelik liflerin betonun donma-çözülme ve aşınma dirençlerine ortak etkisi. 5. *Ulusal Beton Kongresi (Betonun Dayanıklılığı)*. 01-03 Ekim 2003, İstanbul, 345-354.

Wang, N., Mindess, S. ve Ko, K. (1996). Fibre reinforced concrete beams under impact loading. *Cement and Concrete Research*, 26 (3), 363-376.

Wang, M. L. ve Maji A. K. (1999). Shear properties of slurry infiltrated fiber reinforced concrete (SIFCON). *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, 203-212.

- Wu, Z., Shi, C., He, W. ve Wu, L. (2015). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 103 (2016), 8–14.
- Yardımcı, M. Y. (2007). *Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Yazıcı, H. (2000). *Özel betonlar ders notları*. 19 Mart 2017, <http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/OZEL%20BETON/ozelbeton-ders4-LIFLI.pdf>
- Yazıcı, Ş., Arel, H. S. ve Tabak, V. (2013). The effects of impact loading on the mechanical properties of the SFRCs. *Construction and Building Materials*, 41 (2013), 68–72.
- Yazıcı, Ş., İnan, G. ve Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21 (6), 1250–1253.
- Yerlikaya, M. (1998). Çelik teller ile donatılmış beton elemanların düşey yük altında davranışları. *Hazır Beton Dergisi*, Eylül-Ekim, 72-73.
- Yiğiter, H. (2002). *Yüksek performanslı betonların süneklik özelliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Zeynal, E. (2008). *Çelik lif ve s/ç oranlarının çelik lifli betonların darbe mukavemetine ve mekanik özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Zhan, Z. F., Foure, B. ve Trinh, L. J. (1992). Characterizing tests in tension for fibre reinforced concrete. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, 259-270.

Zhang, J., Maalej, M. ve Quek, S. T. (2007). Performance of hybrid-fiber ECC blast/shelter panels subjected to drop weight impact. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, 19 (10), 855-863.

Zhang, X. X., Ruiz G., Yu R. C. ve Tarifa, M. (2009). Fracture behaviour of high-strength concrete at a wide range of loading rates. *International Journal of Impact Engineering*, 36 (10-11), 1204-1209.

Zhang, X. X., Abd-Elazim, A. M., Ruiz, G. ve Yu, R. C. (2014). Fracture behaviour of steel fibre-reinforced concrete at a wide range of loading rates. *International Journal of Impact Engineering*, 71 (2014), 89-96.