

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARMA LİF İÇEREN ÇİMENTO ESASLI  
KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞI  
BİR OPTİMUM TASARIM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Murat ARAL**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**Programı: Yapı Mühendisliği**

**KASIM 2006**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARMA LİF İÇEREN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN  
MEKANİK DAVRANIŞI - BİR OPTİMUM TASARIM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Murat ARAL  
(50101066)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21 Kasım 2006  
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Kasım 2006**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR  
Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Hait Yaşa ERSOY (M.S.Ü.)  
Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA**

*C. Taşdemir*  
*H. Yaşa*  
*Y. Akkaya*

**KASIM 2006**

## ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR'e,

Çalışmalarında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. M. Ali TAŞDEMİR'e, Arş.Gör. Cengiz ŞENGÜL'e, Arş.Gör. Özgür EKİNCİOĞLU, olmak üzere tüm Yapı Malzemesi Anabilim Dalı araştırma görevlilerine, Dr. Fikret BAYRAMOV'a, Beksa Çelik Kord. Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den İnş. Müh. Sayın Mehmet YERLİKAYA'ya,

Tezim sırasında yaptığı yardımları ve sabrı dolayısıyla çok sevgili arkadaşım Endüstri Mühendisi Ufuk Can BALIKÇI'ya, kardeşim Hakan ARAL'a, çok sevgili meslektaşım ve arkadaşım Kadir Vecihi ALDIKAÇTI'ya, proje mühendisi olarak çalıştığım Ularte Sınai Yapı ve Tic.A.Ş.'ye ve beni devamlı destekleyen anneme ve babama

teşekkür ederim.

Kasım 2006

Murat Aral

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖNSÖZ</b>	<b>ii</b>
<b>KISALTMALAR</b>	<b>vi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. LİFLİ KOMPOZİTLERİN GENEL ÖZELİKLERİ</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Lifler Hakkında Genel Bilgi</b>	<b>6</b>
2.1.1. Lif Çeşitleri	6
<b>2.2. Liflerle Güçlendirilmiş Kompozitler</b>	<b>17</b>
2.2.1. Matris Özellikleri	19
2.2.2. Lifli Kompozit Özellikleri	20
2.2.2.1. Homojen Çatlamamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim	22
2.2.2.2. Çatlamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim	23
<b>2.3. Lif Takviyesinin Çimento Esaslı Kompozitlere Etkileri</b>	<b>24</b>
2.3.1. Taze Beton Özelliklerine Lif Etkisi	25
2.3.1.1. İşlenebilirlik Üzerine Etkileri	25
2.3.2. Sertleşmiş Beton Özelliklerine Lif Etkisi	28
2.3.2.1. Enerji Emme Kapasitesi (Tokluk-Toughness)	28
2.3.2.2. Basınç Etkisinde Davranış	30
2.3.2.3. Eğilme Etkisinde Davranış	32
2.3.2.4. Çekme Etkisinde Davranış	35
2.4.2. Polimer Lif Takviyeli Betonlar ve Kullanım Alanları	37
2.4.2.2. Polimer Lif Takviyeli Betonların Mekanik Özellikleri	38
<b>3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>40</b>
<b>3.1. Çalışmanın Amacı</b>	<b>40</b>
<b>3.2. Üretilen Betonların Ortak Özellikleri</b>	<b>40</b>

<b>3.3. Kullanılan Malzeme Özellikleri</b>	40
3.3.1. Çimento	40
3.3.2. Agregası	41
3.3.3. Çelik Tel	43
3.3.4. Polipropilen Lif	44
3.3.5. Silis Dumanı	45
3.3.5.1. Silis Dumanın Genel Özellikleri	45
3.3.6. Kimyasal Katkı	45
<b>3.4. Beton Üretimi</b>	46
3.4.1. Üretimde İzlenen Sıra	46
3.4.2. Numune Kodlarının Belirlenmesi	47
3.4.3. Numune Boyutları ve Şekilleri	47
<b>3.5. Taze Beton Deneyleri</b>	48
<b>3.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri</b>	
3.6.1. Silindir Basınç Deneyi	49
3.6.2. Silindir Yarmada Çekme Deneyi	50
3.6.3. RILEM Kırılma Enerjisi Deneyi	50
3.6.3.1. Deney Düzenineğinin Hazırlanması	50
3.6.3.2. Kırılma Enerjilerinin Hesaplanması	51
3.6.3.3. Net Eğilme Dayanımlarının Hesaplanması	53
3.6.4. Karakteristik Boyların Hesaplanması	53
<b>4. DENEY SONUÇLARI</b>	
<b>4.1. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi</b>	55
4.1.1. Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi	55
4.1.2. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi	57
<b>4.2. Silindir Yarmada Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi</b>	59
<b>4.3. Rilem Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi</b>	61
4.3.1. Kırılma Enerjilerinin Değerlendirilmesi	61
4.3.2. Net Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi	65
<b>4.4. Elde Edilen Karakteristik Boyların Değerlendirilmesi</b>	67
<b>4.5. Lif Maliyetlerinin Değerlendirilmesi</b>	69
<b>4.6. Deney Sonuçlarına Göre Yapılan Optimasyon</b>	72

<b>5. GENEL SONUÇLAR</b>	74
<b>KAYNAKLAR</b>	76
<b>EKLER</b>	79
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	118

## KISALTMALAR

<b>RPB</b>	: Reaktif Pudra Betonu
<b>YPHB</b>	: Yüksek Performanslı Hafif Beton
<b>YPB</b>	: Yüksek Performanslı Beton
<b>DSP</b>	: Densified Small Particles-Yoğunlaştırılmış küçük parçacıklar
<b>MDF</b>	: Macro Defect Free-Büyük boşluklardan arındırılmış
<b>UYDÇK</b>	: Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozitler
<b>ÇLTB</b>	: Çelik Lif Takviyeli Beton
<b>ÇLTK</b>	: Çelik Lif Takviyeli Kompozit
<b>MLTB</b>	: Metal Lif Takviyeli Kompozit
<b>SFRC</b>	: Steel Fibre Reinforced Concrete- Çelik lif takviyeli beton
<b>GFRC</b>	: Glass Fibre Reinforced Concrete- Cam lif takviyeli beton
<b>PP</b>	: Polipropilen
<b>PÇ</b>	: Portland Çimentosu
<b>TS</b>	: Türk Standartları
<b>RILEM</b>	: Reunion Internationale des laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions
<b>NDB</b>	: Normal Dayanımlı Beton
<b>YDB</b>	: Yüksek Dayanımlı Beton
<b>MPa</b>	: Mega Paskal

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 1.1.</b> : Çelik liflerin özellikleri.....	5
<b>Tablo 2.1.</b> : Bazı metalik Liflerin tipik özellikleri.....	11
<b>Tablo 2.2.</b> : Bazı cam liflerin tipik özellikleri.....	14
<b>Tablo 2.3.</b> : Polimer liflerin fiziksel özellikleri.....	16
<b>Tablo 2.4.</b> : Değişik cam liflerin tipik özellikleri.....	17
<b>Tablo 2.5.</b> : Lif takviyeli kompozitlere katılan lifler ve uygulama alanları....	19
<b>Tablo 2.6.</b> : Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri.....	25
<b>Tablo 2.7.</b> : Bazı lif takviyeli çimento esaslı malzemenin tokluk değerlerinin lifsiz malzemelerle karşılaştırılması.....	30
<b>Tablo 2.8.</b> : Bazı lif takviyeli çimento esaslı malzemelerin eğilme dayanımı değerlerinin lifsiz malzemelerle karşılaştırılması.....	34
<b>Tablo 3.1.</b> : Kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	41
<b>Tablo 3.2.</b> : Agreganın hacim oranları.....	42
<b>Tablo 3.3.</b> : Agreganın elek analizi sonuçları .....	42
<b>Tablo 3.4.</b> : Lif Özellikleri.....	44
<b>Tablo 3.5.</b> : Üretilen betonların kodları ve karışımlardaki lif yüzdeleri .....	47
<b>Tablo 3.6.</b> : Beton bileşimleri ve taze beton özellikleri.....	49
<b>Tablo 3.7.</b> : Sertleşmiş beton özellikleri.....	54
<b>Tablo 4.1.</b> : Regresyon Modeline göre beton beton özellikleri .....	71
<b>Tablo 4.2.</b> : Toplam % 2 oranında 3 farklı tip çelik lif içeren betonlarda optimum lif kullanım oranı ve bu betonun mekanik özellikleri.....	72
<b>Tablo C.1.</b> : Prizma Numunelerden elde edilen kırılma enerjileri.....	112
<b>Tablo D.1.</b> : Prizma numunelerden elde edilen net eğilme dayanımları.....	113
<b>Tablo E.1.</b> : Prizma Numunelerden elde edilen karakteristik boylar.....	114
<b>Tablo F.1.</b> : Disk numunelerden elde edilen maksimum dayanımlar.....	115



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1.	: Çeşitli çelik lif tipleri..... 13
Şekil 2.2.	: Kırılğan matris-sünek lifli sistemlerde lif hacmi oranı ( $V_f$ )'na bağlı olarak mukavemetin değişimi..... 21
Şekil 2.3.	: Çatlamamış matriste lif-matris ilişkisi..... 22
Şekil 2.4.	: Çatlamış matriste lif-matis ilişkisi. .... 23
Şekil 2.5.	: Lif/matris mekanizmasının enerji yutması ..... 24
Şekil 2.6.	: Çelik liflerin narinliğinin ( $l/d$ ) ve hacimce yüzdesinin ( $V_f$ ) taze betonun işlenebilirliğine etkisinin çökme (A) ve $VeBe$ (B) deney sonuçlarına göre incelenmesi..... 27
Şekil 2.7.	: Süperakışkanlaştırıcı kullanılmış çelik lif takviyeli karışımlarda çelik lif ve ince agrega miktarının çökmeye ekisi... 28
Şekil 2.8.	: Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi..... 31
Şekil 2.9.	: Basınç gerilmesi altında lif hacmi ile değişen deformasyon davranışı..... 31
Şekil 2.10.	: Lif takviyeli kompozitler için tipik yük-sehim eğrileri..... 32
Şekil 2.11.	: $Su/Çimento=0,45$ için çelik tel içeriği narinliğine bağlı yarma da çekme dayanımı..... 35
Şekil 2.12.	: $Su/Çimento=0,70$ için çelik tel içeriği narinliğine bağlı yarma da çekme dayanımı..... 36
Şekil 2.13.	: Eğilmede/Yarmada Çekme dayanımı oranı ile lif hacmi oranı arasındaki ilişki..... 37
Şekil 2.14.	: Manş Tünelinde 1996 yılındaki yangın sırasında beton yüzeyinde görülen dökülmeler. .... 38
Şekil 2.15.	: Polimer lif takviyeli kompozitler için lif tipik yük-sehim eğrileri..... 39
Şekil 3.1.	: Beton üretiminde kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi..... 43
Şekil 3.2.	: Dramix RC 65/60 ve Dramix ZP 305 tipi kancalı çelik lifler... 43
Şekil 3.3.	: Numune boyut ve şekilleri..... 48
Şekil 3.4.	: 3 Noktadan yüklemeli eğilme deneyi düzeneği..... 51
Şekil 3.5.	: Eğilme deneyi veri toplama sistemi..... 51
Şekil 3.6.	: Örnek bir yük-sehim eğrisi..... 52
Şekil 4.1.	: Silindir basınç dayanımları..... 56
Şekil 4.2.	: Silindir basınç dayanımlarının lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi..... 56
Şekil 4.3.	: Beton karışımlarının belirtildiği üçgen..... 57
Şekil 4.4.	: Elastisite modülleri..... 58
Şekil 4.5.	: Elastisite modüllerinin lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi..... 59
Şekil 4.6.	: Yarmada çekme dayanımları..... 60

<b>Şekil 4.7.</b>	: Yarmada çekme dayanımlarının lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi.....	60
<b>Şekil 4.8.</b>	: 3 Noktadan Yükleme eğilme deneylerinden elde edilen yük- sehim grafikleri.....	61
<b>Şekil 4.9.</b>	: Kırılma enerjisi ortalama değerleri .....	62
<b>Şekil 4.10.</b>	: OL 6/16 liflerini içeren numunelerin diğer lif tipleriyle kullanımı.....	63
<b>Şekil 4.11.</b>	: ZP 305 liflerini içeren numunelerin diğer lif tipleriyle kullanımı.....	63
<b>Şekil 4.12.</b>	: RC 65/60 liflerini içeren numunelerin diğer lif tipleriyle kullanımı.....	64
<b>Şekil 4.13.</b>	: Kırılma enerjisinin lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi.....	65
<b>Şekil 4.14.</b>	: Net eğilme dayanımları ortalama değerleri.....	66
<b>Şekil 4.15.</b>	: Net eğilme dayanımlarının lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi.....	67
<b>Şekil 4.16.</b>	: Karakteristik boy değerleri.....	68
<b>Şekil 4.17.</b>	: Karakteristik boyların lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi.....	69
<b>Şekil 4.18.</b>	: Lifli üretimlerin birim maliyetlerinin karşılaştırılması.....	70
<b>Şekil 4.19.</b>	: Maliyetin (F) lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi.....	70
<b>Şekil 4.20.</b>	: F' i minimum, $f_c$ , $f_{st}$ , $l_{ch}$ , $G_F$ ve $f_{net}$ ' in maksimum, halinde kompozit arzu edilirlilik (D)' nin lif tiplerine göre değişimini gösteren yüzey.....	73
<b>Şekil Ek.1.</b>	: Taze betonda çökme deneyi.....	79
<b>Şekil Ek.2.</b>	: Silindir basınç deneyi düzeneği.....	79
<b>Şekil Ek.3.</b>	: Yarmada çekme deneyi düzeneği.....	80
<b>Şekil Ek.4.</b>	: Yarmada çekme deneyi sonucunda disk numunedeki lif Dağılımı.....	80
<b>Şekil Ek.5.</b>	: 3 noktadan yüklemeli eğilme deneyi düzeneği.....	81
<b>Şekil A. 1.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen NB numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	82
<b>Şekil A. 2.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen PP numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	82
<b>Şekil A. 3.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen O numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	83
<b>Şekil A. 4.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen Z numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	83
<b>Şekil A. 5.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen R numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	84
<b>Şekil A. 6.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen OZ numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	84
<b>Şekil A. 7.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen OR numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	85
<b>Şekil A. 8.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen ZR numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	85
<b>Şekil A. 9.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen OZR numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	86
<b>Şekil A.10.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen R100.5Z0.5 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.....	86

<b>Şekil A.11.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen Z1O0.5R0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	87
<b>Şekil A.12.</b>	: Silindir basınç deneylerinden elde edilen O1Z0.5R0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	87
<b>Şekil B. 1.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı NB numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	88
<b>Şekil B. 2.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı NB numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	88
<b>Şekil B. 3.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı NB numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	89
<b>Şekil B. 4.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı PP numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	90
<b>Şekil B. 5.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı PP numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	90
<b>Şekil B. 6.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı PP numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	91
<b>Şekil B. 7.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı O numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	92
<b>Şekil B. 8.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı O numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	92
<b>Şekil B. 9.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı O numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	93
<b>Şekil B. 10.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı Z numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	94
<b>Şekil B. 11.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı Z numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	94
<b>Şekil B. 12.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı Z numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	95
<b>Şekil B.13.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı R numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	96
<b>Şekil B.14.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı R numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	96
<b>Şekil B.15.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı R numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	97
<b>Şekil B.16.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı OZ numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	98
<b>Şekil B.17.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı OZ numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	98
<b>Şekil B.18.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı OZ numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	99
<b>Şekil B.19.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı OR numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	100
<b>Şekil B.20.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı OR numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	100
<b>Şekil B.21.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı OR numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	101
<b>Şekil B.22.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı ZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	102
<b>Şekil B.23.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı ZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	102

<b>Şekil B.24.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı ZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	103
<b>Şekil B.25.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı OZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	104
<b>Şekil B.26.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı OZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	104
<b>Şekil B.27.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı OZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	105
<b>Şekil B.28.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı R1O0.5Z0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	106
<b>Şekil B.29.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı R1O0.5Z0.5 numunelerine ait yük-sehim.....	106
<b>Şekil B.30.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı R1O0.5Z0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri.....	107
<b>Şekil B.31.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı Z1O0.5R.5 numunelerine ait yük-sehim.....	108
<b>Şekil B.32.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı Z1O0.5R.5 numunelerine ait yük-sehim.....	108
<b>Şekil B.33.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı Z1O0.5R.5 numunelerine ait yük-sehim.....	109
<b>Şekil B.34.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı O1Z0.5R.5 numunelerine ait yük-sehim.....	110
<b>Şekil B.35.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı O1Z0.5R.5 numunelerine ait yük-sehim.....	110
<b>Şekil B.36.</b>	: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı O1Z0.5R.5 numunelerine ait yük-sehim.....	111

## SEMBOL LİSTESİ

$V_f$	: Çelik lif hacmi.
$l_f$	: Lif uzunluğu
$d_f$	: Lif çapı
$\Phi$	: Silindir çapı (mm)
$f_c$	: Silindir basınç dayanımı ( $N/mm^2$ )
$f_t$	: Yarmada çekme dayanımı ( $N/mm^2$ )
$P_{max}$	: Maksimum yük (N)
$D$	: Silindirin çapı (mm)
$L$	: Silindirin yüksekliği (mm)
$G_f$	: Kırılma enerjisi (N/m)
$W_0$	: Yük-sehim eğrisi altında kalan alan (Nm)
$m$	: Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)
$g$	: Yerçekimi ivmesi ( $9,81 m/sn^2$ )
$\delta_0$	: Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)
$A_{lig}$	: Etkin kesit alanı ( $m^2$ )
$f_{fnet}$	: Net eğilme dayanımı ( $N/mm^2$ )
$l$	: Mesnetler arası uzaklık (mm)
$B$	: Numune kesitinin genişliği (mm)
$D$	: Numune kesitinin yüksekliği (mm)
$a_0$	: Çatlak derinliği (mm)
$l_{ch}$	: Karakteristik boy (mm)

# KARMA LİF İÇEREN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞI – BİR OPTİMUM TASARIM

## ÖZET

Beton inşaat mühendisliğinde çok yaygın biçimde kullanılan bir malzemedir. Betonda ve arayüzey bölgesindeki poroziteyi, heterojenliği ve mikroçatlakları azaltarak yüksek dayanım elde edilebilir. Bu da süperakışkanlaştırıcılarla birlikte uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu, doğal puzolan gibi puzolanik özellikleri de olan ince taneli malzemelerin betona eklenmesi ile sağlanabilir. Çelik tel takviyeli beton, beton ve çelik tellerden oluşan kompozit bir malzemedir. Çelik bir malzemedir. Çelik lifin betona eklenmesi, harç ve betonun mekanik özelliklerinin, özellikle darbe dayanımı ve tokluğunun önemli ölçüde artmasını sağlamıştır. Lifli betonda lifsiz betona göre oluşan en önemli performans artışı kırılma sırasında enerji yutma kapasitesinin artmasından ileri gelmektedir. Bu malzemeler, mükemmel darbe dayanımı özelliklerine sahip olmaları nedeniyle endüstriyel zeminlerde, trafik yoğunluğunun çok olduğu beton yollarda, askeri yapılarda, depreme karşı stratejik yapılarda, betonarme yapıların güçlendirilmesinde, küçük veya orta ölçekteki prefabrik elemanların üretiminde kullanılabilirler.

Bu çalışmanın amacı, mezo, makro ve mikro polipropilen lif içeren çimento esaslı kompozit malzemeleri üreterek yüksek dayanım, tokluk ve süneklik sağlayan optimum çözümü elde etmektir.

Bu çalışmada, çelik liflerin mekanik özellikleri ve kompozitlerin özelliklerini incelemek için kancalı ve/veya kancasız 3 farklı çelik tel kullanıldı. Her çelik lifin hacim oranı değişkendi, fakat toplam hacim % 2’de sabit tutuldu. Kısa ve kancasız düz çelik lifler, yüksek dayanımlı pirinç kaplı olup, 6 mm boyunda ve 0,16 mm çapında idi. Normal dayanımlı çelik liflerin narinlikleri 55 ve 65 olup dayanımları özdeşti (1150 MPa). Düz kesilmiş çelik liflerin çekme dayanımları 2250 MPa idi. Farklı lif içeren toplam lifli ve lifsiz 12 beton karışımı üretildi. Bunlarda 2 karışım çelik lifsiz diğer 10 karışım ise çelik lif içermektedir. Tüm karışımlarda polipropilen lif hacim oranı % 0,5 de sabit tutuldu. Agreganın çelik lifle kısmi yerdeğiştirmesi birebir hacim esasına göre yapıldı. Süperakışkanlaştırıcı yaklaşık olarak aynı işlenebilirliğin sağlanabilmesi için karışımlarda değişik miktarlarda kullanıldı. Bütün numuneler 48 saat sonra kalıptan çıkarıldı sonra su kürü rejimi uygulandı. Bu kür rejimi numunelerin 20<sup>o</sup> C de kirece doygun kür havuzunda deney tarihine kadar tutulmasını öngördü.

Karma lifli ve/veya lifsiz elik tel içeren betonların basınç dayanımları, elastisite modülleri, net eğilme dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve kırılma enerjileri yalın betonunkilerle karşılaştırıldı. Kısa liflerin, mikro çatlakların önlenmesinde köprü görevi gördüğü ve bunun sonucunda kompozitin çekme dayanımının arttığı ve mikro çatlakların oluşmasından sonra sıyrıldıkları sonucuna varıldı. Kısa liflerin, kiriş ortasında yük-sehim eğrisinin tepe noktası sonrası inen kısmında, etkileri azdır. Uzun liflerin, mikro çatlakların önlenmesinde önemli etkileri yoktur, fakat kirişlerden elde edilen yük-sehim eğrilerinin maksimum yük sonrası kısmında süneklik bakımından önemli etkileri vardır.

Yalın betonla ve polipropilen lifli betonla karşılaştırıldığında, elik tel donatılı kompozitlerin net eğilme dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve özellikle kırılma enerjisi ve süneklikleri önemli derecede geliştirildi. Yalın betonun kırılma enerjisi narinliği 65 olan uzun elik teller kullanarak yaklaşık 100 kat kadar artırıldı.

## **MECHANICAL BEHAVIOR OF CEMENT BASED COMPOSITES WITH HYBRID FIBRES-AN OPTIMUM DESIGN**

### **SUMMARY**

Concrete is a most widely used structural material in civil engineering applications. High strength can be obtained by reducing porosity, heterogeneity and microcracks in concrete and the transition zone. This can be achieved by using superplasticizers and fine-grained pozzolanic materials such as fly ash, silica fume, granulated blast furnace slag, and natural pozzolan. Steel Fiber Reinforced Concrete (SRFC) is a composite material consisting of concrete with steel fibres. The addition of steel fibres significantly improves many of the mechanical properties of mortar and concrete, notably impact strength and toughness. The enhanced performance of fiber-reinforced concrete compared to its unreinforced counterpart comes from its improved capacity to absorb energy during fracture. Since these materials have excellent impact resistance properties they can be employed for industrial floors, concrete roads in heavily trafficked situations, military structures, strategic structures against earthquake, retrofitting of reinforced concrete structures, small or medium size prefabricated elements.

The main objective is this work to provide optimum solution for obtaining high values of strength, toughness and ductility by producing cement based composite materials including meso steel fibres, macro steel fibres and micro polypropylene fibres.

In this study, three different steel fibres with and/or without hooked ends were added to the mixtures to investigate the effect of steel fibres on the mechanical behavior and fracture properties of the composites. The volume fraction of each steel fibre was variable, but their total volume fractions were kept constant at 2 %. The short ones without hook ends were straight high strength steel fibres coated with brass, 6 mm in length and 0.16 mm in diameter. The aspect ratios of conventional normal strength steel fibres were 55 and 65, and their strengths were identical (1150 MPa). The tensile strength of straight strength steel fibres was 2250 MPa. Totally twelve concrete mixtures with or without different fibres were produced. Two mixtures had no steel fibres, but the other 10 mixtures contained steel fibres. In all mixtures, the volume fraction of polypropylene fibre was kept constant at 0.5 %. Partial replacement of aggregate by steel fiber was based on to one volume basis. A superplasticizer was used for all mixtures, the amount being varied to maintain approximately the same workability. All specimens were demolded after 48 hours, then the normal water regime was used. This curing regime involved standard water curing in a water tank saturated with lime at 20°C prior to testing.



The compressive strengths, elastic moduli, net bending strengths, splitting tensile strengths and fracture energies of concretes with and/or without hybrid steel fibres were compared to those of plain concrete. Short fibres function as a bridge to eliminate the micro-cracks, as a result the tensile strength of composite increases, and they pulled out after the micro cracks are formed. The short fibres have a little effect on the post-peak response of load versus displacements at the midspan of the beam. The long fibres have no significant effect on preventing microcracking, however, from the ductility point of view there is a substantial effect of longest fibres on the post peak response part of load versus displacement curve of the beams.

The net bending strength, splitting tensile strength, and especially fracture energy and ductility of steel fibre reinforced concrete mixtures were significantly enhanced compared to those of plain concrete and also concrete with polypropylene fibres. Fracture energy of plain concrete increased up to 100 times owing in concretes with long steel fibres having the aspect ratio of 65.

## 1.GİRİŞ

Günümüzde betonun değişik alanlarda kullanılması nedeniyle, beton teknolojisinde bazı gelişmeler olmuştur. Özellikle 1800'lü yılların ikinci yarısından itibaren çeliğin beton içerisinde kullanılması ile oluşan betonarme, bir yapı malzemesi olarak betonun kullanım alanlarını oldukça genişletmiştir. Beton ekonomik, kolay işlenebilirliği ve teknik özelliklere sahip oluşu nedeniyle tercih edilen bir yapı malzemesi olmuştur.

Geleneksel anlamda beton; agregası, çimento ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla üretilir. Betona değişik özellikler kazandırmak için katkı maddeleri de eklenir. Kullanılacak agregası oranlarının belirlenmesinde boşluğun azaltılması önemlidir. Çimentonun su ile birleşerek meydana getirdiği hamur agregayı birbirine bağlayarak dayanımı yüksek bir malzeme elde edilmesini sağlar.

Kompozit bir malzeme olan beton genel olarak yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı, çatlak oluşuktan sonraki yük taşıma dayanımı ve enerji emme kapasitesi açısından zayıf özellikler gösterir. Çekme dayanımı düşük olan betonlarda, özellikle dinamik yükler, çatlak oluşumuna ve pek çok çatlağın yayılmasına neden olurlar. Bunun yanı sıra son yıllarda beton teknolojisindeki ilerlemelere bağlı olarak üretilen yüksek dayanımlı betonların normal betonlara oranla daha gevrek bir yapıya sahip olduğu ve daha az şekil değiştirme yaptıkları bilinmektedir. Metal yapı malzemesine kıyasla daha ekonomik olan betonun yukarıda belirtilen zayıf özelliklerin iyileştirilmesi için çalışmalar yapılması zorunlu hale gelmiştir. Bu konuda ilk çalışmalar 1963 yıllarında betonda cam lifi kullanarak üretilen betonlar üzerinde yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalar ise farklı lif tiplerinin kullanılması ve üretilen betonların özelliklerinin araştırılmasıyla devam etmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda beton içerisinde süresiz bir şekilde dağılı

olarak bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımını arttırdığını ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde etmeyi mümkün kıldığı ortaya çıkmıştır. [1].

1970'li yılların başında ortaya çıkan yüksek dayanımlı beton daha sonraları da yüksek performanslı beton (YPB) adı verilmiştir [2].

Yüksek performanslı betonların en olumsuz yanı oldukça gevrek bir yapıya sahip olmasıdır. Gevreklik nedeniyle betonun enerji absorpsiyon yeteneği azalmakta, yangına karşı dayanıksızlığı artmaktadır. Yüksek performanslı betonların bu olumsuz özelliklerini yok etmek için beton teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak 1960'lı yıllarda beton karışımına çeşitli miktar ve tiplerde lif katılması yoluna gidilmiştir. 1964 yılında Danimarka ve SSCB'de cam liflerle üretim yapılmış, keza 1960'lı yılların başlarında polimer lifler devreye girmiş ve bunlarla üretilen betonların patlayıcı etkilere karşı davranışları incelenmiştir [1]. Fakat, bu yıllarda çok sınırlı sayıda araştırmalar yapılmıştır. Asıl çalışmalar, 1980'li yıllarda süperakışkanlaştırıcıların kullanılmaya başlamasıyla yapılmıştır. Beton dayanımında başlıca etken olan su/çimento oranı süperakışkanlaştırıcılar sayesinde çok azaltılabilmiş, böylelikle yüksek performanslı betonların üretimi kolaylaşmıştır. Bu tarihten sonra da lifli betonlar üzerine yapılan çalışmalar artmaya başlamıştır.

Son zamanlarda betonun mekanik performansını artırmaya yönelik olarak bilinen iki yaklaşım vardır:

- Birincisi sık dizilmiş küçük parçacıklı (DSP- Densified Small Particle) beton olarak bilinen yoğun taneciklerden oluşan bir matris içeren betondur. Bu betonlarda yüksek oranda süperakışkanlaştırıcı ile silis dumanı ve sertliği yüksek agrega (kireçli boksit ve granit gibi) kullanılır. Bu malzemelerin basınç dayanımları 150 ve 400 MPa arasında değişir.

- İkinci yaklaşım ise Macro Defect Free (MDF) olarak bilinen polimer takviyeli harçları içeren betonlardır. Polimerizasyon işlemi betondaki boşlukları doldurarak aşırı yüksek dayanımlı ve yoğun matrisler oluşturur. Bununla birlikte, bu malzemelerin çok özenli koşullarda üretilmeleri gerekir: Dönme kapasitesi yüksek mikser gerekir ve buradan elde edilen karışım daha sonra bir çok kez merdanelerden geçirilerek tabakalar halinde elde edilir. Bu problemlere ek olarak yerleştirilirken

basınç uygulanması gerekir, MDF'ler sudan kolay etkilenir ve büyük oranda sünme sorunu vardır.

Malzeme çok sıkı ve aynı zamanda kırılğan bir yapıya sahip olur, liflerin eklenmesi de bu yüzden sünekliği artırmak için gereklidir.

MDF çimentonun yüksek oranda viskoziteye olduğundan liflerin matrise eklenmesinde çok büyük yerleştirme problemlerine neden olduğundan araştırmacılar ve üreticiler DSP matrise lif eklenmesine yönelmişlerdir. Fakat, hangi lifin ne oranlarda kullanılması gerektiği ve buna bağlı olarak betonun hangi özelliklerinin ne miktarda değiştiğinin tespiti bir sorundur ve optimum çözümlerin bulunması için araştırmalar yoğun biçimde sürmektedir.

Uygulamada kullanılan lif çeşitleri saman, yonca, plastik, seramik-cam ve çelik liflerdir. Çeşitli teknikler uygulanarak ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitler (UYDÇK) üretilmektedir.

- 6 mm uzunluğunda ve 0.15 mm. çapında olup karışıma yüzde 5 ila 10 arasında bir miktarda katılan çelik liflerle üretilen UYDÇK'lar

- 13 mm. uzunluğunda ve 0.16 mm. çapında olup karışıma yüzde 2.5 oranında katılan çelik liflerle üretilen UYDÇK'lar:

- Kısa ve uzun liflerin karıştırılması ile elde edilen UYDÇK'lar.

- Reaktif Pudra Betonu (Reactive powder concrete-RPC) her ne kadar DSP gibi düşünülse de birçok farklı yönleri vardır ve ayrı bir yaklaşım olarak ele alınması gerektiği öne sürülmektedir [3]. Bu tip betonlarda tane boyutu dağılımı daha sıkı bir yapı elde etmek için optimize edilmiştir ve toplam boşluk oranı DSP betonlara göre daha düşüktür. Ayrıca daha az lif kullanılarak daha sünek bir yapı elde edilebilir.

Liflerin beton karışımlarına katılması çatlakları önleyici bir etki yapar, bu lifler tek çeşit olarak kullanılabilecekleri gibi malzemenin değişik özelliklerini iyileştirebilmek açısından birkaç lif karıştırılarak da kullanılabilir, böyle üretilen betonlar Karma Lif Takviyeli Betonlar (Hybrid Fiber Reinforced Concretes) olarak isimlendirilir. Büyük ve çekme dayanımı yüksek lifler büyük çatlakları, kısa ve çekme dayanımı düşük lifler ise çatlak başlaması ve ilerlemesini kontrol amacıyla kullanılırlar.

Lifler; betonun çekme, basınç ve eğilme dayanımı ile rötre, sünme, yorulma gibi mekanik özelliklerini ve yangına dayanıklılığını, miktarına, şekline, beton içindeki dağılımına, uzunluğuna, hangi malzemedan yapıldığına ve narinlik adı verilen boy/çap oranına göre etkilemektedirler.

Çelik tel takviyeli betonların normal betonlara oranla sağladıkları üstünlüklerden dolayı kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. En yaygın olarak beton yol üst yapılar, endüstriyel döşemeler, su yapıları, püskürtme beton uygulamaları, şev stabilitesi, tünel kaplamaları, havaalanı kaplama betonları, liman kaplamaları, depreme dayanıklı yapılar, ateşe dayanıklı beton yapılar, prekast elemanlar, beton borular ve askeri güvenlik yapılarında kullanılmaktadır [4]. Normal betonlara oranla sahip oldukları çeşitli avantajlarından dolayı çelik tel takviyeli betonların özellikleri üzerinde yeni araştırmalar yapılması ve bu özelliklerin geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada da farklı boy ve narinliğe sahip çelik lifler kullanıldı, ayrıca tüm karışımlara % 0,05 oranında polipropilen lif de katıldı. Betonların basınç ve çekme dayanımlarındaki artışlar yanında özellikle enerji absorplama niteliğinin ölçütü olarak kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları saptanmıştır.

Mikro polipropilen lif ile çeşitli miktarlarda mezo çelik lif ve makro çelik lifi tek tek veya karma biçimde içeren çimento esaslı kompozit malzemeler üretilerek yüksek dayanım, tokluk ve süneklik sağlayan optimum çözüm arandı.

Bu çalışmada PÇ 42,5 cinsi çimento, çok ince taneli silis dumanı, ve agregası olarak da silis unu, kırmakum, deniz kumu ve I nolu kırmataş kullanıldı.

Deneylerde 2'si ucu kancalı biri düz olmak üzere 3 çeşit çelik lif ve bir çeşit polipropilen lif kullanıldı. Polipropilen lif 20 mm. boyunda 16 mikron çapında 0,91 kg/dm<sup>3</sup> özgül ağırlığında ve liflendirilmiş tipte liftir. Çelik liflerin özellikleri ise Tablo 1.1.'de görülmektedir.

**Tablo 1.1.:** Çelik liflerin özellikleri

Lif Adı	Lif tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)
<b>RC 65/60</b>	Makro	60	0.9	65	1000
<b>ZP 305</b>	Makro	30	0.55	55	1100
<b>OL 6/16</b>	Mezo	6	0.16	37.5	2250

Çelik lif içermeyen bir seri ile hacimce % 2 oranında çelik lif içeren 11 seri olmak üzere toplam 12 farklı bileşime sahip beton üretildi, hepsinde de polipropilen lif oranı hacimce % 0,05’de sabit olarak tutuldu. Bütün bileşimlerde çimento dozajı 600 kg/m<sup>3</sup>’dür. Silis dumanı çimento ağırlığının % 10’u oranında kullanıldı. Su/çimento oranı % 30’da ve su/bağlayıcı oranı da % 27’de sabit tutuldu. Polikarboksilik eter esaslı yeni kuşak süperakışkanlaştırıcı bütün bileşimlerde % 1.5-% 2 kullanıldı.

Üretilen karışımların her birinden 100x100x500 mm boyutlarında 3er adet prizma, 150x300 mm. boyutlarında 3er adet silindir ve 150x60 mm. boyutlarında 6şar adet disk numuneleri üretildi. Prizma numunelerin ortalarında 40 mm.’lik çentikler elmas testere ile açıldı. Silindir numuneler üzerinde yapılan basınç deneyleri ile basınç dayanımları ve elastisite modülleri, disk numuneler üzerinde yapılan deneylerle de yarmada çekme dayanımları elde edildi. Ayrıca ortadan çentikli prizma numunelerde 3 noktadan yüklemeli eğilme deneyleri yapılarak kırılma enerjileri ve net eğilme dayanımları bulundu ve daha sonra bulunan bu değerler yardımıyla malzemelerin gevrekliklerinin bir ölçütü olan karakteristik boy değerleri hesaplandı.

Deney sonucunda elde edilen değerlerin Design Expert programında Değişkenlerin Analizi yöntemi kullanılarak optimizasyonu yapıldı.

## **2. LİFLİ KOMPOZİTLERİN GENEL ÖZELİKLERİ**

### **2.1. Lifler Hakkında Genel Bilgi**

Lif, doğal kaynaklardan elde edilen, ya da insan eliyle üretilen, uzunluğu, bükülebilirliği, esnekliği ve dayanıklılığı olan hammaddedir. Genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki tip lif vardır. Hayvan ve bitki lifleri ile mineral doğal liflerdir. Yapay lifler ise, aranan belirli özellikleri taşıyacak biçimde özel olarak geliştirilen ve bu amaçla üretilen maddelerdir [5].

#### **2.1.1. Lif Çeşitleri**

Farklı özellikleri ve kullanım alanları bakımından birçok lif türü vardır. Bu lifleri değişik biçimlerde sınıflandırmak mümkündür. Lifler, genel olarak şöyle sınıflandırılabilirler [6]:

#### **A-Doğal Lifler**

##### **A.1.Bitkisel Lifler**

- A.1.1.Akwara
- A.1.2.Bambu
- A.1.3.Hindistan cevizi kabuğu
- A.1.4.Keten,Kenevir
- A.1.5.Jüt
- A.1.6.Sisal
- A.1.7.Şeker kamışı posası
- A.1.8.Ahşap (Selüloz)

##### **A.2.Hayvansal Lifler**

- A.2.1.Yün
- A.2.2.İpek
- A.2.3.Kıl

### A.3.Madensel lifler

A.3.1.Asbest

A.3.2.Metal Lifler

A.3.3.Karbon

### **B-Yapay Lifler**

B.1.Cam Lifleri

B.2.Polimer Lifler

B.2.1.Akrilik

B.2.2.Aramid

B.2.3.Naylon

B.2.4.Polyester

B.2.5.Polietilen

B.2.6.Polipropilen

B.2.7.Poliüretan

### **A. Doğal Lifler**

Kompozitlere katılan en yaygın doğal lifler saman ve at kılıdır. Modern teknoloji lifleri, çeşitli bitkilerden daha ekonomik biçimde üretilmektedir. Örneğin ; çimentolu kompozitlerde kullanılan jüt ve bambu liflerinin üretimi çok az enerji gerektirir [5].

Ancak bu liflerin kullanımında karşılaşılan ana sorun, bunların alkali ortamdan etkilenme eğiliminde olmalarıdır. Bu liflerin durabilitesini artırmak için betonun alkalitesini azaltacak katkıları kullanılmalıdır. Portland çimentosu ile kullanılan diğer doğal lifler ise; akwara (Nijerya’da yetişen aynı adlı bir bitkinin gövdesinden elde edilmektedir.), bambu, hindistan cevizi, flax, jüt, sisal, şeker kamışı posası ve ahşaptır [7, s.:110].

#### Doğal Liflerin Özellikleri:

\*Sıcaklık ve su buharını kolay emerler

\*Sıcaklık karşısında yumuşamazlar

\*Yüksek sıcaklıkta boyları değişmez.

\*Donma noktasının altında kırılma ve kopma olmaz.

\*Güneş ışığına duyarlıdırlar. [5]



### **A.1.1 Bitkisel Lifler**

#### **A.1.1. Akwara**

Bitki sapından elde edilen doğal liftir.Nijerya'da bol miktarda bulunur.Bu lifler alkali ortamlarda nemli ve kuru ortamlarda sürekliliklerini kaybetmezler. Sakıncaları ise çok düşük elastisite modüllerine sahip olmalarıdır [8].

#### **A.1.2. Bambu Lifleri**

Tropikal ve astropikal bölgelerde yetişirler. 15 m. Yüksekliğe kadar büyüyebilirler. Saplarının içi boş ve çapları 0.4 – 4 inch ( 1-10 cm) kadar çeşitlilik gösterir. Bambu lifleri çekmeye karşı dayanıklıdır.Fakat düşük elastisite modülüne sahiptirler [8].

#### **A.1.3. Hindistan Cevizi Lifleri**

Olgunlaşmamış Hindistan cevizinin dışında sert lifli bir kabuk bulunur,bu kabuğun lifleri suya batırılarak yada mekanik işlemlerle çıkartılır. Hindistan cevizi lifleri düşük elastiklik modülüne sahiptir ve sıcaklık nem değişikliklerine duyarlıdır [8].

#### **A.1.4. Keten ve Bitki Lifleri**

Keten liflerinin çekme dayanımları ve elastisite modülleri yüksektir. Fil çimi, su sazı gibi bitkilerden oluşan lifler de betonda güçlendirici olarak kullanılırlar. Bu liflerin çoğu bitkilerin saplarından el ile çıkarılırlar [8].

### **A.1.5. Jüt Lifleri**

Jüt yalnızca kendir lifinden elde edilir. Bangladeş, Çin, Hindistan ve Tayland'ta yetişir. Bu bitkilerin uzunlukları 2.4 m. ve sap çapları ise 25mm.den az olur. Kabukları liflidir. Bu kabuk suya batırıldığında, içine su alır ve lifleri gevşer, bu lifler el ile ayrılır ve kurutulur. Son zamanlarda bu işlem için mekanik aletler de geliştirilmiştir. Jüt bitkileri çekme gerilmesinde dayanıklıdır. Geleneksel olarak bu lifler el ile ayrılır ve kurutulur. Son zamanlarda bu işlem için mekanik aletler de geliştirilmiştir. Jüt bitkileri çekme gerilmesinde dayanıklıdır. Geleneksel olarak bu lifler halat yapımında ve çuval çanta,giysi yapımında kullanılır [8].

### **A.1.6. Sisal Lifleri**

Bazı Avusturalya ve İsveç'teki araştırmacılar çalışmalarında sisal lifleri ile yapılan çimento kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Bu lifler Agave Sisalana bitkisinin yapraklarından elde edilir. Hemiselüloz , lignin ve pektinden meydana gelirler. Güçlüdürler ama alkali ortamda sürekli dayanıma sahip değildirler [8].

### **A.1.7. Şekerkamışı Posası**

Şekerkamışının suyu sıkıldıktan sonra kalan posası lifli malzemedir, %50 lif içerir.Fiziksel özellikleri ise şekerkamışının çeşidine, olgunluğuna ve bitkinin değirmende çekilme verimliliğine bağlıdır [8].

### **A.1.8. Ahşap Lifleri (Selüloz)**

Dünya çapında beton endüstrisinde en çok kullanılan doğal liflerin başında yer alırlar. Portland çimento kompozitlerinde ahşap kullanımı çok yaygındır. Özellikle asbest liflerinin yerlerini alırlar. Kolay bulunması, yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülü, elde edilme kolaylığı yaygınlaşma nedenlerindedir. En büyük sakıncası ise alkali ortamda parçalanabilir olmasıdır. Son zamanlardaki gelişmelerle, liflerin parçalanabilir olması kontrol edebilmektedir. Ahşap lifleri kağıt hamuru şeklinde elde edilir. İşlemler mekanik, kimyasal, yarı kimyasal olabilir. Liflerin özellikleri bu hamura bağlıdır. Ahşap liflerin temel bileşenleri selüloz, yarı selüloz ve lignindir. Lignin tek başına iken liflerin dayanımı üzerine ters etkilidir. Hamur işleminde daha yoğun lignin çıkarılmasıyla en iyi lifler elde edilir. Lignin olmayan selüloz liflerinin çekme dayanımı 200 MPa'dır. Ligninin çıkarılmadığı selüloz lifinde ise çekme dayanımı 500 MPa olur [8].

### **A.3. Madensel Lifler**

#### **A.3.1. Asbest**

İnorganik doğal lif olan asbestin nitelikleri:

- \*Çekme dayanımı 4000-5000 kg/cm<sup>2</sup>
- \*Basınç dayanımı-liflere paralel doğrultuda 950 kg/cm<sup>2</sup>
- \*Çekme Dayanımı =1/3 basınç dayanımı
- \*Geçirimsizlik (su ve gazları geçirmez)
- \*Kolay Delinebilirler [8].

#### **A.3.2. Metal Lifleri**

Metaller başta mühendislik uygulamaları olmak üzere birçok alanda sıkça kullanılırlar. Metaller, mekanik ve fiziksel özelliklerin mükemmel bir kombinasyonunu oldukça uygun fiyatlara sağlayabilirler. Metallerin önemli özelliklerinden bir tanesi plastik şekil değiştirebilme yeteneğidir. Böylece, çok basit şekillerden başlayarak çok karmaşık şekil ve formlarda üretim yapılabilmesine olanak sağlar. Uçak gövdesinden büyük petrol ve gaz borularına ve hatta günlük hayatta kullandığımız pek çok basit alete kadar metallerin kullanımına rastlanır. Lif formundaki metaller uzun zamandır kullanılmaktadır. Örneğin tunç lifler lambalarda, bakır ve alüminyum lifler elektrik uygulamalarında, çelik lifler öngerilmeli yapılarda, kablo olarak asma köprülerde, süperiletkenlerde ve piyano, violon gibi çeşitli müzik aletlerinin tellerinde kullanılmaktadır. Bazı önemli metalik liflerin özellikleri Tablo 2.1’de görülmektedir [9, s.:108].

**Tablo 2.1.:** Bazı metalik liflerin tipik özellikleri [9].

Metal	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Ergime sıcaklığı (°C)	Elastisite modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Al	2,7	660	70	300
Be	1,8	1350	310	1100
Cu	8,9	1083	125	450
Mo	10,2	2625	330	2200
W	19,3	3410	350	2890(<250 μm) 3150(<125 μm) 3850(<25 μm)
0.9 % Karbon çeliği (0.1 mm. çapında)	7,9	1300	210	4000
Paslanmaz çelik (0.05 mm. çapında)	7,8	1535	198	2400

Çelik lifler, betona katılan metalik liflerin en yaygın olanıdır. Ortaya çıkan ürün de kısaca ÇLTB (çelik lif takviyeli beton) veya MLTB (metal lif takviyeli beton) diye adlandırılır. Takviye elemanları olarak üretilen çelik lifler, aynı uzunluktaki cam ve polimer liflere göre daha kalın ve daha serttir. Dairesel kesitli çelik liflerin çapları 0.2 ile 1.0 mm arasında değişmektedir. Uzunlukları ise genelde 20 ile 50 mm arasında değişmektedir. Eritip çekme yöntemi ile veya amorf yapıda şerit biçiminde üretilen çelik liflerin, üretim yöntemine göre belirlenen boyut ve şekilleri vardır. Bu lifler genellikle yaklaşık 1.8 mm genişlikte ve 0.025 mm ile 0.100 mm kalınlıkta ve düz kesitlidir, uzunlukları da 10 mm ile 60 mm arasındadır.

Çelik liflerin sertlikleri ve karıştırma sırasında bükülmeye karşı gösterdikleri yüksek dirençleri, çelik liflerin narinliğiyle ifade edilir. Narinlik oranı lifin boyunun çapına bölünmesiyle ( $l/d$ ) bulunur. Çelik liflerin narinlik oranı 20 ile 250 arasında değişmektedir [10, s.:243].

Beton takviyesinde kullanılacak çelik lifleri sınıflandıran ve özelliklerini belirten Amerikan standardı ASTM A 820-96'da çelik lifler 4 değişik şekilde sınıflandırılmıştır. [11]

Bunlar;

- Tip 1:soğuk çekilmiş lifler
- Tip 2:plakadan kesilmiş çelik lifler.
- Tip 3:eritilip çekilmiş lifler.
- Tip 4:diğer lifler.

Bu lifler düz veya değişik şekillerde olabilir. Bunların beton içindeki performansları; narinlik oranları, yapıları ve beton içerisindeki konsantrasyonları ile de yakından ilgili olduğundan piyasada çeşitli tipleri bulunmaktadır [12].

Türk standardı TS 10513/92 [13] ise çelik lifleri şekillerine göre şu şekilde sınıflandırmaktadır:

- A:Düz, pürüzsüz yüzeyle lifler
- B:Bütün uzunluğunca deforme olmuş lifler
- C:Sonu kancalı lifler

B sınıfı lifler, uzunluğu boyunca deforme olma şekline göre;

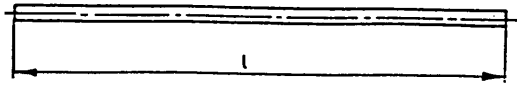
- Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış lifler
- Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) lifler
- Ay biçimi dalgalı lifler olmak üzere üçe,

C sınıfı lifler sonlarındaki kancalara göre;

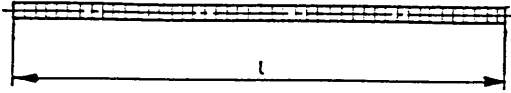
- İki ucu kıvrılmış lifler
- Bir ucu kıvrılmış lifler olmak üzere ikiye ayrılır.

Bu çelik lif tipleri ve kesitleri Şekil 2.1'de görülmektedir.

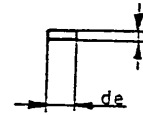
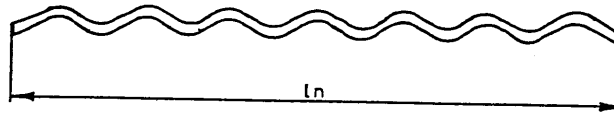
SINIF A-Düz, Pürüzsüz yüzeyli lifler



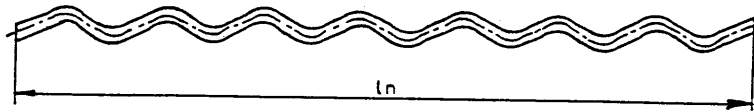
SINIF B-Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş lifler



a)Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış lifler

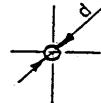
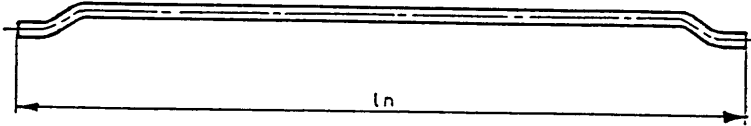


b)Ay biçimi dalgalı lifler

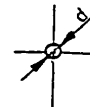
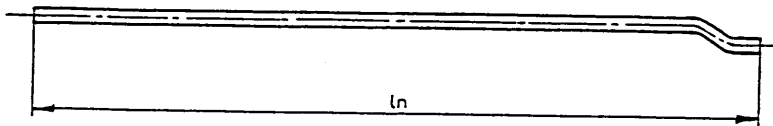


SINIF C-Sonu Kancalı lifler

a)İki ucu kıvrılmış lifler



b)Bir ucu kıvrılmış lifler



Şekil 2. 1. Çeşitli çelik lif tipleri [13].

TS 10513/92'de çelik liflerin özellikleri ile ilgili iki önemli parametre vardır:

i) Liflerin çekme-kopma gerilmesi ortalaması en az  $345 \text{ N/mm}^2$  olmalıdır, her bir lif için çekme-kopma gerilmesi  $310 \text{ N/mm}^2$ 'den az olmamalıdır.

ii)  $16 \pm 1$  °C'lik ortamda, 3.18 mm'lik bir iç çap çevresinde yapılan lif eğilme deneyinde, teste tabi tutulan liflerin % 90'ının kırılmaksızın  $90^0$  eğilme yapabilmesi

şarttır. Bu özellikler, betonda kullanılan liflerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden de daha yüksek bir dayanıma sahip olmasına olanak sağlar. Çelik liflerin sünek davranış göstermesi betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi için de gerekli bir parametredir [14].

### A.3.3 Karbon Lifler

1980'lerin ortasına kadar yüksek fiyatlı olan karbon liflerinin kullanımı yalnızca Portland çimentolu kompozitlerle kullanılmak üzere sınıflandırmaktadır. Sonraları petrol ürünlerinde ve kömür ziftinden daha düşük maliyetli karbon lifleri üretildi. Yine de polimer liflerinden daha pahalı olduğundan kullanımı yaygınlaşmadı. Karbon Lifleri özel uygulamalar için (yüksek şekil değiştirme ve gerilme dayanımı gibi )büyük potansiyele sahiptir: Elastisite modülü çelik kadar yüksek hatta 2 yada 3 katı kadar daha güçlü olabilmektedir. Çok hafiftirler ve çoğu kimyasallara karşı yavaş hareket ederler.İplik formunda üretilirler.Tek karbon lifi 12000 tekil lif içerir.Bunlar çimento içine katılmadan önce dağılırlar[8].

### B.Yapay Lifler

Lif üretiminde kullanılacak hammadde sıvı yada yarı sıvı hale getirilir.Yaş çekme, kuru çekme gibi farklı işlemler ile lifler oluşturulur.

#### B.1.Cam Lifleri

Cam lifleri beton uygulamalarına katılmaz. Çünkü betonun alkalitesi bu lifleri zamanla çözer. Bu alkaliteye karşı zikron camı gibi dayanıklı camlarının üretilmesine başlanmıştır [5].

**Tablo 2.2.:** Bazı cam liflerin tipik özellikleri [9].

Cam lif tipi	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E	2.54	1.7-3.5	69-72
S	2.48	2.0-4.5	85
C	2.48	1.7-2.8	70
Cem-fil	2.70	-	80

## **B.2.Polimer Lifler**

Petrokimya ve tekstil endüstrisinde yapılan araştırmalar ve gelişmeler sonucu sentetik polimer lifleri üretilmiştir.Akrilik, aramid, naylon, polyester, polietilen ve polipropilen başlıca polimer lifleridir. Hepsinin de çok yüksek çekme dayanımları vardır. Fakat bu liflerin çoğu (aramid hariç ) düşük elastisite modülüne sahiptirler. Polimer liflerin kalitesi, çap ve uzunluk oranlarına bağlıdır. Çapları mikron düzeyindedir. Bu lifler tekil ya da lif hamuru halinde bulunurlar. FRC (Fiber Reinforced Concrete=Lif Katkılı Beton ) de kullanılanların uzunlukları 0,5-2 inch (12-50 mm ) arasında değişir. Bazı lif tipleri çok kısa (1-2 mm ) olabilir, çok uzun olanları da vardır. Uygulanacak yerin ihtiyacına göre tipler arttırılır [8].

### **B.2.1.Akrilik**

Lifler, %85 oranında akronilit özellik gösterirse bunlara akrilik lifler denir. Bu lifler sudan daha yoğundur ve diğer polimer liflere göre daha yüksek elastisite modülüne sahiptirler. ( Aramid hariç ) [8].

### **B.2.2.Aramid**

Sahip olduğu yüksek elastisite modülü sayesinde FRC (Fiber Reinforced Concrete=Lif Katkılı Beton ) mekanik özelliğini arttırırlar. Çekme ve eğilme dayanımını sağırlarlar. Tek kısıtlayıcı unsur; bu lifin yüksek maliyetidir. Diğer liflere nazaran pahalıdır. Bu lifler halat formuna sahiptir [8].

### **B.2.3.Naylon**

Naylon 6'dan üretilirler. Uygulamada sıkça rastlanır. Çeşitli uzunluklarda ve tekil lif formunda bulunurlar. 19 mm boyunda ve çok incedirler [8].

### **B.2.4.Polyester**

Bu lifler etil asetat monomerlerinden oluşur. Fiziksel ve kimyasal özellikleri üretim tekniklerinin değişimiyle değiştirilebilirler. Yüksek elastisite modülüne sahiptirler ve betonla ilişkileri çok iyidir. Bu özellik beton uygulamaları için çok önemlidir [8]



### B.2.5.Polipropilen

Hem tekil hem de hamur biçiminde bulunurlar. Uzunları 3-50 mm arası değişir. Kısa lifler hamur uzun lifler tekil halde bulunur. Polipropilen hamuru, polietilen hamurundan daha düşük dayanıma sahiptir [8].

**Tablo 2.3.:** Polimer liflerin fiziksel özellikleri [7].

Lif Tipleri	Etkili Çap (10 <sup>-3</sup> mm)	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Nihai Uzama (%)
Akrilik	13-104	1.17	207-1000	14.6-196	7.5-50.0
Aramid I	12	1.44	3620	62	4.4
Aramid II	10	1.44	3620	117	2.5
Naylon		1.16	965	5.17	20.0
Polyester		1.34-1.39	896-1100	17.5	
Polietilen	25-1020	0.96	200-300	5.0	3.0
Polipropilen		0.90-0.91	310-760	3.5-4.9	15.0

Tablo 2.4, çeşitli lif cinslerinin özelliklerini göstermektedir. Bu tabloya göre çelik ve cam lifler, çekme dayanımı yönünden en iyi performansı gösteren lif cinsleridir. Çelik lifler özgül ağırlığı en fazla olan lif cinsi olarak ayrıca bir özellik taşırlar [8].

**Tablo 2.4.:** Değişik cins liflere ait fiziksel özellikler [7].

LİF CİNSİ	ÇEKME DAYANIMI (MPa)	ELASTİSİTE MODÜLÜ ( $10^3$ , MPa)	MAKSİMUM UZAMA (%)	ÖZGÜL AĞIRLIK ( $\text{gr/cm}^3$ )
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0.6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-3.5	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
Polietilen	690	0.14-0.4	10	0.95
Polipropilen	552-759	3.5	25	0.90
Pamuk-Yün	414-621	6.9	10-25	1.5
Mineral yünü	483-759	69-117	0.6	2.7
Çelik	276-2760	200	0.5-35	7.8

## 2. 2.Liflerle Güçlendirilmiş Kompozitler

ASTM C 1116-97'ye [15] göre lif takviyeli betonlar 3'e ayrılmaktadır:

**Tip 1: Çelik Lif Takviyeli Betonlar(SFRC):** Paslanmaz çelik, çelik alaşımı veya karbon çeliğini içerir.

**Tip 2: Cam Lif Takviyeli Betonlar(GFRC):**Alkaliye karşı dirençli camları içerir.

**Tip 3: Sentetik Lif Takviyeli Betonlar (Synthetic FRC):** Saf polipropilen lifler ve diğer sentetik lifleri içerir.

Çimento esaslı malzemelerin çekme dayanımları ve toklukları düşüktür. Bu özellikleri iyileştirmek için çimento matrisini liflerle güçlendirmek günümüzde çok kullanılan yaygın bir yöntemdir. Liflerin görevi, gerilme uygulanan çimento matrisindeki çatlak gelişimini engellemek veya geciktirmek, çatlakların hızlı ve kontrolsüz ilerleyişini yavaş ve kontrollü bir hale getirmektir. Çatlak ilerleyişinin yavaş ve kontrollü bir hale gelmesi ile çelik lif takviyeli betonlarda gevrek kırılma davranışı gösteren normal betonlardaki ani göçme riski azalır. Ayrıca liflerin katılmasıyla malzemenin servis ömrü uzar, termik şok dayanımı artar ve daha küçük kesitlerle daha fazla üretim yapılabilir [12].

Genellikle yapı uygulamalarında çelik lifin betona eklenmesi, sadece kırılmayı önlemek için değil, aynı zamanda dinamik yükleme veya çarpma mukavemetini artırmak, malzemenin dökülme, parçalanma ve dağılmasını önlemek içinde uygulanmaktadır.

Bu kompozitler, en yaygın olarak beton yol üst yapılar, endüstriyel döşemeler, su yapıları, püskürtme beton uygulamaları, şev stabilitesi ve tünel kaplamaları, havaalanı kaplama betonları, liman kaplamaları, depreme dayanıklı yapılar, yangına dayanıklı beton yapılar, prekast elemanlar, beton borular, ve askeri güvenlik yapılarında kullanılmaktadır [14]. Aşağıda çelik lifli betonun yapısal ve yapısal olmayan kullanımlarından bazı örnekler verilmiştir.

**-Endüstri yapılarında:** Çarpma rijitliği ve termal etkilere karşı dayanım için

**-Hidrolik yapılarında:** Barajlar, kanallar, dinlendirme havuzları ve dolu savaklarda plak yerine veya kavitasyon hasarlarına karşı koymak için kaplama olarak

**-Havaalanı ve karayollarının yol kaplamasında:** Özellikle, normal plaklardan daha ince plak yapılması istendiği durumlarda

**-Püskürtme betonu ile yapılan kaplamalarda:** Tünellerde ve maden ocaklarında zeminin desteklenmesi için genellikle kaya ankraj bulonları ile birlikte kullanılmaktadır. Bu şekilde kullanımın klasik kullanıma göre avantajı kullanılan toplam beton miktarından tasarruf sağlanmasıdır. Ayrıca hasır çelik ve üst kaplama yapılmamaktadır. İlave olarak da işlem miktarı azaldığından yapım süresi daha da kısalmaktadır.

**-Şev stabilitesinin sağlanmasında:** Karayollarını ve demiryollarını kesen, yer üstündeki kaya veya topraktan oluşan dik şevlerin veya toprak setlerin stabilitesinin sağlanmasında

**-İnce kabuk yapılarında:** Lifli betonun üstün nitelikleri kesit kalınlıklarının azaltılmasına olanak sağladığından, ince kabuk yapılarda, kubbelerde, katlanmış plaklarda ve çeşitli mimari nedenlerle ince olması gereken yapı elemanlarında

**-Patlamaya (infilak etkisine) karşı dayanıklı olması gereken yapılarda:** Genellikle normal donatı çubukları ile birlikte kullanıldığında, güç santralleri ve askeri tesislerin yapımında çok uygun bir kullanım arz etmektedir. Özellikle çok önemli askeri tesislerin yapımında bu özeliği nedeniyle kullanımı tercih edilmektedir. Uzun yıllardan beri Amerikan askeri tesis yapım şartnamelerinde yer almakta ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

**-Depreme dayanıklı yapılarda:** Deprem bölgelerinde, depreme dayanıklı yapı üretiminde [16].

Lif tiplerine göre uygulama alanları Tablo 2.5 de verilmiştir.

**Tablo 2.5.:** Lif takviyeli kompozitlere katılan lifler ve uygulama alanları [17].

Lif Tipi	Uygulamalar
Cam	Prekast paneller, giydirme cephe kaplamaları, kanalizasyon boruları, ince beton çatılar ve beton blokların sıvasında.
Çelik	Çatı uygulamalarında kullanılan gözenekli betonlar, kaldırımlar, köprü döşemeleri, ateşe dayanıklı elemanlar, beton borular, havalimanları, rüzgara dayanıklı yapılar, tünel kaplamaları, gemi omurgaları.
Polipropilen,naylon	Temel kazığı, öngerilmeli kazıklar, kaplama panelleri, yürüyüş yolları, marinaların iskele elemanları, yol yamaları, büyük çaplı sualtı borularının kaplamaları.
Asbest	Saç, boru, levhalar, yangına dayanıklı malzemeler ve yalıtım malzemeleri, kanalizasyon boruları, oluklu ve düz çatı levhaları, duvar kaplamaları.
Karbon	Dalgalı şekilli çatı kaplama elemanları, tek veya çift kat ince membran yapılar, tekne omurgaları, yapı iskelesi tahtaları.
Mika	Çimento esaslı levhalarda kısmen asbestin yerine, beton borular, tamirat malzemeleri.

### 2.2.1. Matris Özellikleri

Lifli beton literatüründe matris (matrix ) olarak tanımlanan yapı lifin etrafını saran malzemedir. Kısacası ,çimento hamuru matris diye tanımlanır. Lifli beton kompozitlerinde matrisin fonksiyonu lifleri bir arada tutmak, liflerden gerilme transferini sağlamaktır [7]. Lifli beton kompozitlerinin kalitesi kullanılan lifin olduğu kadar matrisin özellikleri ile de yakından ilgilidir. Matris ve lif arasındaki etkileşimi etkileyen temel özellikler şu şekildedir:

- Matrisin durumu: çatlamış veya çatlamamış olması,
- Matrisin niteliği,
- Lif geometrisi,
- Lif tipi: örneğin, çelik, polimer, mineral veya doğal yollarla oluşan lif olması,
- Lif yüzeyinin özellikleri,
- Matrisin elastisite modülüne göre lif elastisite modülünün karşılaştırılması,
- Liflerin yönlendirilmesi,
- Lifin hacimsel yüzdesi,
- Yükleme hızı,
- Kompozitteki liflerin durabilitesi ve uzun dönem etkisi

Bu parametreler arasında var olan etkileşimleri karşılayan, kullanılabilir teorik modeller çok azdır [7, s.:17].

### 2.2.2.Lifli Kompozit Modelleri

Liflerle donatılmış kompozitler, matrisin ve lif fazının davranışına bağlı olarak iki ana başlık altında toplanabilir;

-Kırılgan lif-sünek matrisli sistemler

-Kırılgan matris-sünek lifli sistemler

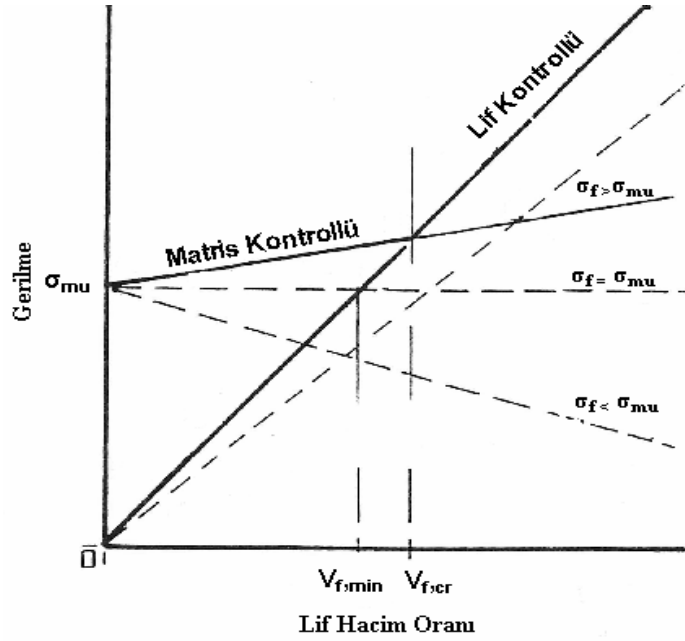
Kırılgan lif-sünek matrisli sistemler; matris fazını epoksi, poliestere, melamin reçinesi gibi organik polimer esaslı malzemelerin oluşturduğu ve lif olarak da cam, asbest, seramik, metal tel gibi liflerin kullanıldığı kompozitleri örnek verebiliriz.

Bu tür kırılgan lif ve sünek matrisli malzemenin gerilme- deformasyon davranışı şu şekilde oluşur; Şekil-2.3 'de görüleceği üzere, kompozit, liflerinin etkisi ile ilk yüklemde lif miktarına bağlı olarak matris mukavemetinin üzerinde yük taşımaktadır. Ancak gerilmenin belirli bir sınırı aşması ile lifler göçmekte ve kompozit, matris davranışına benzer bir davranış göstermektedir [9].

Kırılgan matris-sünek lifli sistemlerdeki gerilme deformasyon davranışı, lif ile matris arasındaki aderansın tam olduğu kabulü ile, şekil-2.4'deki gibi karakterize edilebilir [9].

Kompozit çatlamasından hemen sonra matris mukavemetinin sıfıra düştüğü kabul edilerek, kompozitin lifler tarafından taşındığı düşüncesinden hareketle  $\sigma_f < \sigma_{mu}$  hali için çatlama sonrasında matris göçmeden önceki seviyede gerilmeyi taşıyabilmek için gerekli lif/hacim oranı, "kritik lif / hacim oranı" ( $V_{1,cr}$ ) olarak ifade

edilmektedir.  $\sigma_f = \sigma_{mu}$  olması halinde ise bu oran minimum lif / hacim oranı olarak adlandırılır , [18]



**Şekil 2.2.** Kırılman matris-sünek lifli sistemlerde lif hacmi oranı ( $V_f$ )'na bağı olarak mukavemetin değişimi , [18]

$\sigma_f$  :Kompozit deformasyon oranının matris kırılma deformasyon oranına ulaştığı anda lifte oluşan gerilme

$\sigma_{mu}$  :Matrisin kırılma deformasyon oranına ulaştığı andaki gerilme

$V_{f,cr}$  :Toplam hacimdeki kritik lif oranı

$V_{f,min}$  : Toplam hacimdeki minimum lif oranı

Kırılman matris-sünek lifli kompozitlerde üç farklı kırılma şekli görülmektedir.

1. Lif hacim oranı, kritik lif oranının üzerinde ise ( $V_1 > V_{1,cr}$ ) matris kırıldıktan sonra kompozit daha yüksek bir seviyede mukavemet gösterir. Mevcut uygulamalarda  $m^3$ 'deki lif oranı bu tip kırılma arzu edilecek şekilde seçilmektedir.

2.Lif hacim oranı kritik lif hacim oranının altında ise ( $V_1 < V_{1,cr}$ ) matris kırıldıktan sonra kompozit daha düşük seviyede yük taşır.

3. Süreksiz liflerle donatılmış kompozitlerde görülen üçüncü halde ise matris kırıldıktan sonra kompozitin davranışı liflerin matristen sıyrılması ile belirlenmektedir .

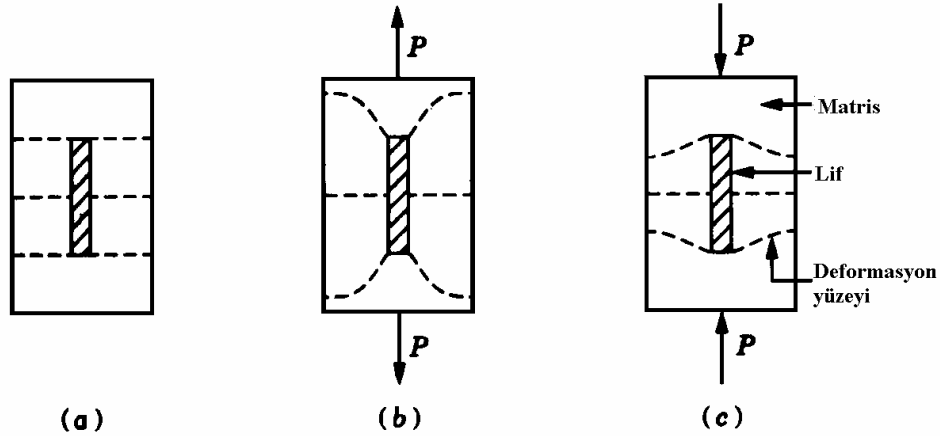
Birinci kırılma şeklinde, yani lif hacim oranının kritik lif hacim oranının üzerinde olduğu durumda; matris kırılmadan önce gerilme matris ve lifler tarafından birlikte taşınmakta matrisin göçmesi ile birlikte bir anda, kompozit bünyesindeki

gerilme, lif içeriğine bağlı olarak bir miktar düşmektedir. Daha sonra lifler tarafından ,lif miktarına bağlı olarak kompozit daha yüksek bir gerilmeyi taşır.

Liflerle güçlendirilmiş kompozitlerde betonun performansı üzerinde matrisin boşluk yapısı, çimento dozajı, su/çimento oranı, lif/matris aderansı gibi özellikler de oldukça etkilidir. [18]

### 2.2.2.1. Homojen Çatlamamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim

Tek lif içeren basit bir lif-matris sistemi Şekil 2.3'de görülmektedir. Yüklenmemiş durumda, matris ve lifin her ikisinde de gerilmeler sıfır kabul edilir. (Şekil 2.2a). Kompozite çekme veya basınç gerilmelerinin uygulanması veya kompoziti sıcaklık değişimlerine maruz bırakmak birbiriyle uyumlu gelişen gerilme ve şekildeğişimler oluşturur. Çimento matrisinde, çimentonun hidratasyonu gerilmeleri hem matris hem de lifte düşürür. Matrise yük uygulandığı zaman, yükün bir kısmı liflere yüzeyi boyunca etkir. Lif ve matris arasındaki elastisite modülü farklarından dolayı lif yüzeyi boyunca kayma gerilmeleri gelişir. Bu kayma gerilmesi uygulanan yükün bir kısmının liflere iletilmesine yardımcı olur. Eğer lif matristen daha sağlam bir yapıdaysa lifteki ve etrafındaki deformasyon Şekil 2.3b ve 2.3c'de görüldüğü gibi daha küçük olur. Bu tip durum çelik ve mineral liflerle ortaya çıkar. Eğer lifin elastisite modülü matrisinkinden daha küçük ise lif çevresindeki deformasyon daha fazla olur. Bu durum polimer veya bazı doğal lifler içeren kompozitlerde meydana gelir.



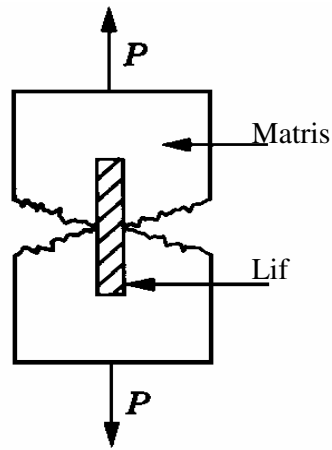
Şekil 2.3. Çatlamamış matriste lif-matris ilişkisi a) yüklenmemiş b) çekme etkisinde c) basınç etkisinde [7].

Pratikte lifler en azından iki doğrultuda rasgele dağılır. Lif takviyeli kompozitlerde lifler üç doğrultuda da rasgele dağılır. Ayrıca çelik liflerin çoğu ve polimer liflerin bazıları yüzeylerinden veya uçlarından deforme edilmişlerdir. Hemen hemen tüm durumlarda lifler arasında olan etkileşim problemi daha da karmaşık bir hale sokar. Bu yüzden, pratik uygulamalarda kullanılan matematiksel modeller hala gelişim aşamasındadır.

Kompozit davranışına bağlı olarak lifler kompozitin hem dayanımına hem de elastisite modülüne etkir. İçerik ve katkısı; lif tipi, lif yüzdesi ve matrisin özelliklerine bağlıdır. Örneğin % 10 çelik lif içeren bir kompozitten beş kat daha fazla bir dayanım elde edilir, eğer lif yüzdesi % 2'nin altında ise ihmal edilebilecek kadar az bir artış elde edilir [7, s.:18-20].

#### 2.2.2.2 Çatlamış Matris ile Lif Arasındaki Etkileşim

Çekme gerilmelerine maruz bırakılan lif takviyeli kompozitlerde (Şekil 2.3b) gerilmeler belli bir değere ulaştınca matris çatlaklar (Şekil 2.4). Matris çatlayınca lifler çatlak boyunca matrisin bir tarafından diğer tarafa yükü taşır. Pratikte çeşitli lifler çatlaklar arasında köprü kurarak yükü çatlak boyunca iletir. Eğer lifler yeterli yükü çatlak boyunca iletirse birçok çatlak numune boyunca bu şekilde tutulur. Yüklemenin bu aşaması çoklu çatlama safhası olarak tanımlanır. Çoğu uygulamada bu çoklu çatlama safhası servis yükleri altında meydana gelir.



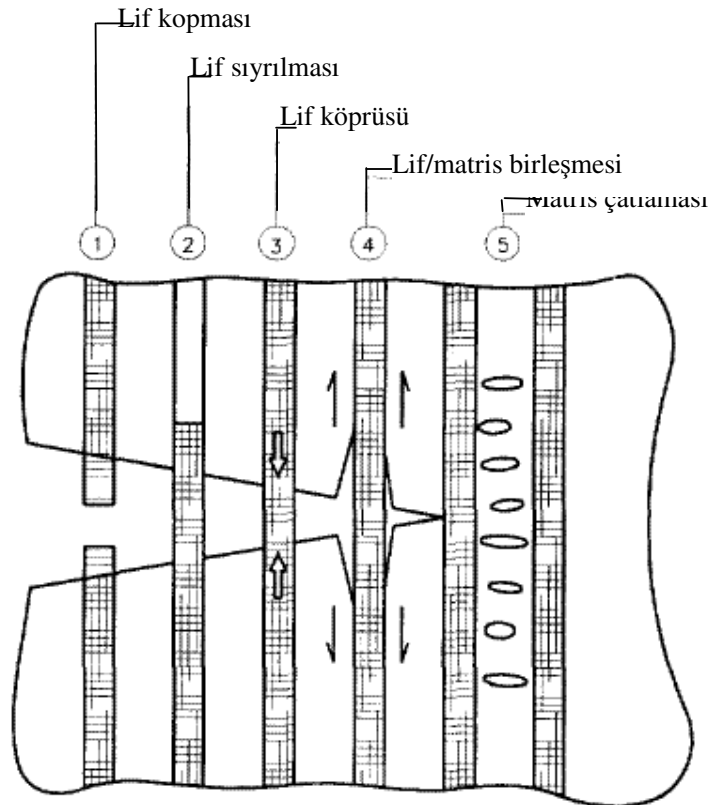
Şekil 2.4. Çatlamış matriste lif-matris ilişkisi [7].

Yük-kayma değişimi, liflerin tipinin ve dağılımının etkisi, tek liflerin sıyrılmaya dayanımının nasıl hesaplanacağı ve rasgele dağılmış liflerin etkileşimi ile ilgili pek çok araştırmalar yapılmıştır, böylece çok sayıda lifin davranışı tahmin edilmeye



çalışılmıştır. Tek ve çok sayıda lifin sıyrılmasını belirtmek için çeşitli deneysel teknikler kullanılmıştır [7, s.:20-24].

Şekil 2.5, liflerin enerji yutma ve çatlak genişlemesini kontrol etme yollarını göstermektedir. Şekilde görülen lifler soldan sağa doğru lifin kopmasını, sıyrılmasını, köprü kurmasını ve lif matris ara yüzeyini yeniden bağlamasını göstermektedir bu mekanizma lifler arasındaki mesafeye bağlı değildir ve etkilidir, her ne kadar küçük miktarlarda olsa da tek bir lif için bile dikkate değer miktarlarda olabilmektedir [19].



Şekil 2.5.: Lif/matris mekanizmasının enerji yutması [19].

### 2.3.Lif Takviyesinin Çimento Esaslı Kompozitlere Etkileri

Çelik lif takviyeli betonun mekanik özellikleri; lifin boyu, şekli ve beton içerisindeki miktarı, liflerin narinlik oranı, çimento cinsi ve miktarı, numunelerin boyutu, şekli, hazırlanma metodları, su/bağlayıcı oranı, kullanılan agregaların cinsi ve tane dağılımı ile yakından ilgilidir. Ayrıca, ısıtma işlem uygulamasının da lifli betonun mekanik özelliklerine etkisi büyüktür. Bu tip etkenler deney sonuçlarını

büyük ölçüde etkiler ve normal betonun zayıf olan bir çok özeliğini iyileştirerek performansını artırır. Bu iyileşmeler genel olarak Tablo 2.6’da görülmektedir.

**Tablo 2.6.:** Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri [21].

<b>Betonun Özeliği</b>	<b>Artış (%)</b>
Tokluk	100-1200
Darbe dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Çekme Dayanımı	25-150
Basınç Dayanımı	± 25
Yorulma Dayanımı	50-100
Şekil değiştirme oranı	50-300
Eğilme Çekme Dayanımı	25-200
Kavitasyon-Erezyon Direnci	200-300
Elastisite Modülü	± 25

### **2.3.1. Taze Beton Özelliklerine Lif Etkisi**

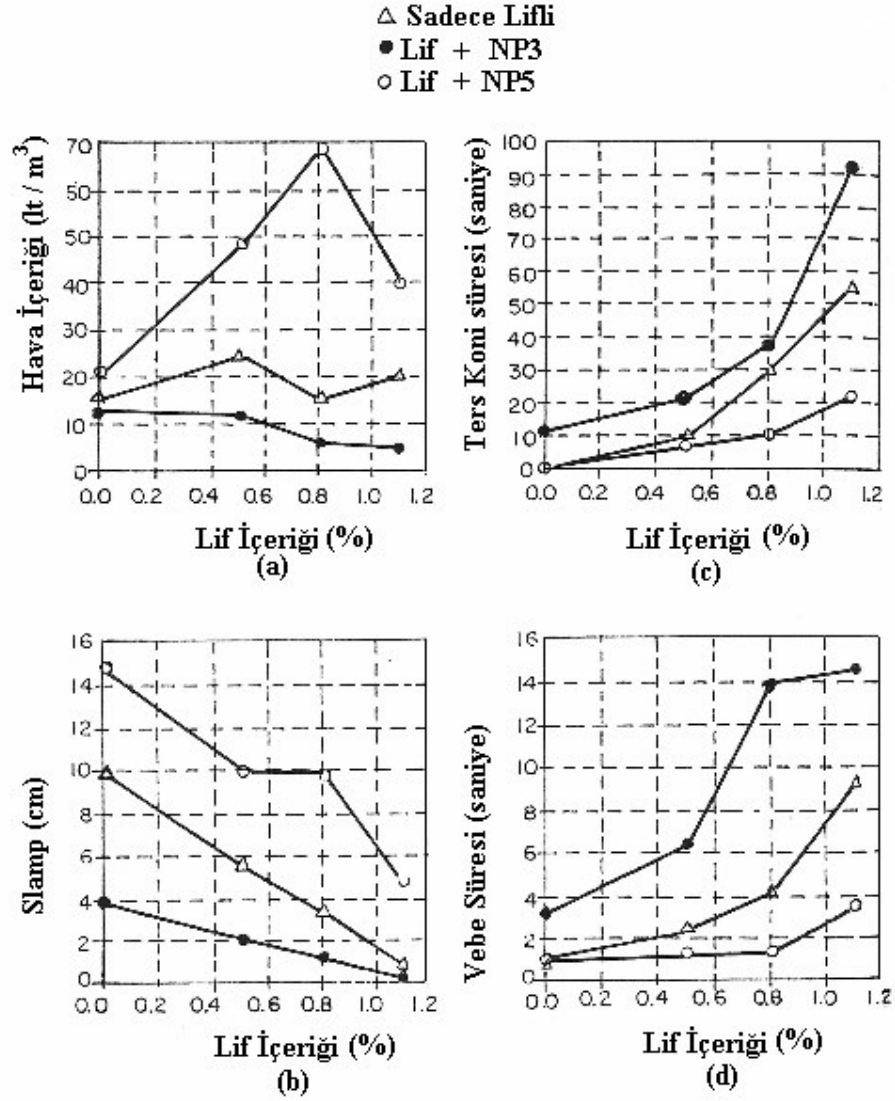
#### **2.3.1.1 İşlenebilirlik Üzerine Etkileri**

Betonda işlenebilirlik olarak ifade edilen kavram betonun taşınması, yerleştirilmesi Sıkıştırılması ve homojenliği ile ilgilidir.Betona lif katılmasıyla işlenebilirlikte önemli ölçüde azalmalar oluşturur.Bu azalma üzerindeki en önemli iki parametre karışımdaki lif hacmi ve lif görünüm oranı diye tanımlanan lifin uzunluk/çapı oranıdır.Bu önemli parametrelerin dışında liflerin dışında liflerin betona katılması, karıştırılma teknikleri ve lifli betonun karıştırma tasarımları da lifli taze betonun özelliklerini önemli ölçüde değiştirir [18].

Çelik lifler agrega ile çok zor karışırlar, özellikle yüksek oranda lif içeren düşük işlenebilirliğe sahip betonlarda, lifler birbirlerine kenetlenerek üniform olmayan bir karışıma sebep olurlar. Liflerin demet olmasına topaklaşma denir. Eğer beton yüksek işlenebilirliğe sahip ise topaklaşma riski daha düşük olur. Yüksek işlenebilirlik genellikle karışıma süperakışkanlaştırıcılar eklenmesiyle elde edilir.

Karışımında ince daneli malzeme yüzdesi fazla ise lif dağılımı daha kolay olur. Çimentonun yerine konabilecek uçucu kül ve diğer puzolanlar veya silis dumanı ile ince daneli malzeme oranı artırılabilir. Lifler genellikle karışıma beton veya harç karıştırıldıktan sonra eklenmektedir, fakat genel kabul görmüş, etkili bir çelik lifli beton karıştırma şekli yoktur. Fakat, çelik lifli betonların üretiminde çok aşamalı yöntemler kullanıldığı da bilinmektedir. Bu yöntemlerden biri ilk önce betonun “temel” veya “matris” kısmını karıştırmaya dayanır. Burada amaç 50-100 mm çökme değerine sahip orta kıvamda bir karışım hazırlamaktır Süperakışkanlaştırıcı eklenir ve beton tekrar karıştırılır. Karıştırma, çökme değerinin 175 mm’ye çıkmasına veya tamamiyle betonun yayılmasına sebep olur. Lifler bu aşamada katılır ve VeBe veya ters koni deneyleriyle ölçülen kıvamın düşmesine neden olurlar. Lifler çökme değerini 130-160 mm. civarına düşürürler 130 mm’den 160 mm’ye kadar olan çökme değerleri genellikle, tamamiyle sıkıştırılabilir ve kolaylıkla yerleştirilebilir iyi kıvamda bir lifli karışımı gösterir.

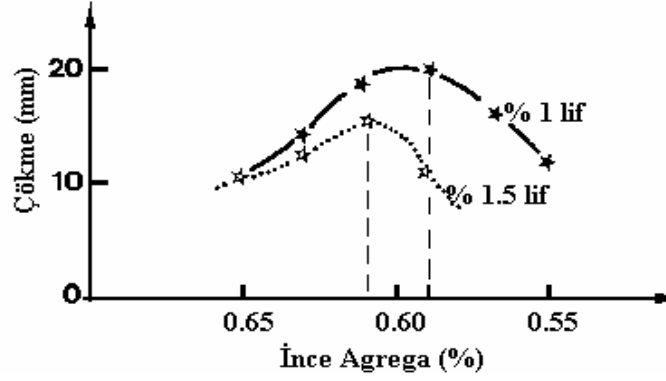
Literatürdeki çalışmalarda lif içeriği ve görünüş (uzunluk/çap) oranının artması ile beton işlenebilirliğinde azalmalar tesbit edilmiştir, bu azalma lif içeriği ve geometrisi ile doğru orantılıdır. Şekil 2.6 da verilen grafikde Lifli bir betonda çimento ağırlığına oranla (NP3) % 0,3 akışkanlaştırıcı içeren, diğerinde ise (NP5) % 0,5 akışkanlaştırıcı içeren katkıları kullanılmıştır [18].



**Şekil 2.6.** Çelik liflerin narınlığının ( $l/d$ ) ve hacimce yüzdesinin ( $V_f$ ) taze betonun işlenebilirliğine etkisinin çökme ve VeBe deney sonuçlarına göre incelenmesi [18].

Burada  $V_f$  ( $l/d$ ) reinforcement index (güçlendirme indeksi) olarak tanımlanmıştır.

Agreganın içindeki ince dane yüzdesi taze karışımın işlenebilirliğini etkiler. Bu etki Şekil 2.7'de görülmektedir [18].



**Şekil 2.7.** Süperakışkanlaştırıcı kullanılmış çelik lif takviyeli karışımlarda çelik lif ve kum miktarının çökmeye etkisi [10].

### 2.3.2 Sertleşmiş Beton Özelliklerine Lif Etkisi

#### 2.3.2.1 Enerji Emme Kapasitesi (Tokluk-Toughness)

Tokluk, beton değerlendirilmesinde kullanılan bir kavram olup betonun yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile bulunur.

Çelik Tel Donalı Püskürtme Beton (ÇTDPB)' ların eğilme veya çekme halinde yük-sehim eğrisi özellikleri yalın betonunkilere göre önemli farklılık gösterir, kırılmadan önce çelik tellerin sağladığı büyük şekil değiştirme söz konusudur. ÇTDPB' lar sünek davranışla, yani daha iyi çatlama-sonrası dayanım ve enerji yutma kapasitesi veya tokluk ile tanımlanır. ÇTDPB'un oldukça iyi çekme dayanımına, sünekliğe ve eğilme performanslarına sahiptir. ÇTDPB' ların mekanik davranış özelliklerini daha iyi anlamak için malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini incelemek ve yapıdaki davranışı ile ilişki kurmak gerekir. Çelik tellerin betona katılması gevrek olan betonun çekme şekil değiştirme kapasitesinin artırarak yarı-süneklik verir.

Böylece, çatlama dayanımında ve tokluk özelliklerinde iyileşme beklenebilir. ÇTDPB' ların analizinde en önemli parametreler çekme ve eğilme dayanımları ve kırılma enerjisidir, çünkü bu parametreler malzeme davranışını temsil eder .

Yeni tasarım yöntemlerine göre, tokluk ÇTDB' larda önemli bir özelliktir. Tokluk artışı çelik telin betona sağladığı en önemli özelliklerden biridir. Tokluk veya enerji yutma kapasitesi yük-sehim eğrisinin altında kalan alan olup, yapı elemanlarının enerji yutma özelliklerinin ölçüsünü ve tepe noktası sonrası davranışını göstermekte

kullanılır. Tokluk, genelde çentiksiz numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyinden elde edilmektedir. Değişik yaklaşımlar tokluğu farklı yöntemlerle belirlemektedirler:

- i) Amerikan Standardı ASTM C 1018’da tokluk, belirli sehime kadar yük-sehim eğrisinin altında kalan alana eşit olan enerji ile tanımlanır,
- ii) Japon Beton Enstitüsü (Japon Standardı JCI) ise tokluğu, ÇTDB kirişin ortasındaki sehimin kiriş açıklığının 1/150’ine kadar olan enerji ile tanımlamaktadır.

Çelik tel narinliği ve içeriğinin ÇTDB’ların tepe noktası sonrası davranışını son derece etkilemekte ve toklukta da önemli rol oynamaktadır. Deneysel sonuçlar, çelik telin narinliği ve içeriğinin artmasıyla ÇTDB’nun tokluğunun da arttığını göstermektedir. Bölümdeki söz konusu çalışmalarda kullanılan çelik teller kısa kesilmiş ve kancalı uçlu olup, ÇTDB’nun matrisi ise normal dayanımlı bir betondur. [22]

Çelik lif takviyeli betonların özellikle enerji yutma kapasiteleri, darbe ve yorulma dirençleri yüksektir. Bu lifler betondaki çatlakların genişlemesini durdurarak, çatlakta köprü oluştururlar ve yükün bir kısmını çatlığa dik doğrultuda iletirler.

Lifler, betonun tokluğunu, eğilme dayanımını veya her ikisini birden artırabilirler. Örneğin polipropilen lifler betonun tokluğunu dikkate değer bir şekilde artırırken çekme dayanımına çok az etki ederler, bununla birlikte polipropilen ve cam lifleri birlikte kullanarak yüksek tokluk ve çekme dayanımına sahip betonlar üretmek mümkündür. Tablo 2.7 ve Tablo 2.6 lif takviyeli betonlarda bu değerlerdeki artışı göstermektedir.

**Tablo 2.7.:** Bazı lif takviyeli çimento esaslı malzemelerin tokluk değerlerinin lifsiz malzemelerle karşılaştırılması [17].

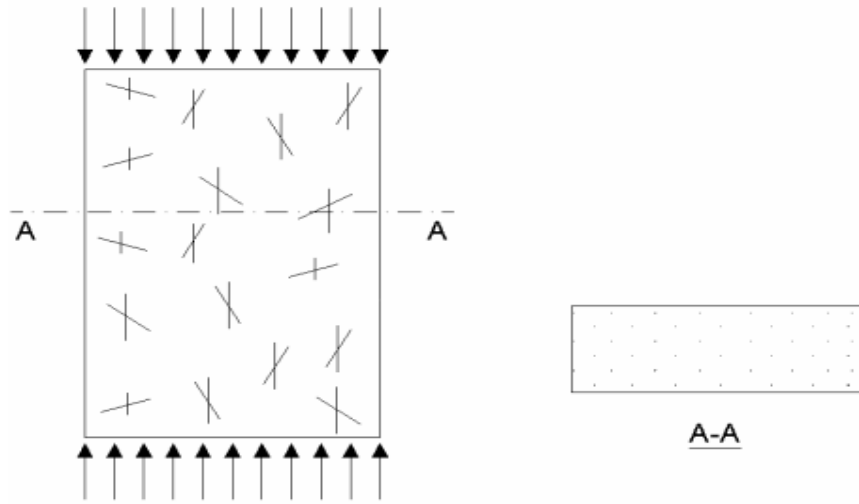
Kompozit	Hacimsel lif yüzdesi	Görelî tokluk*
<b>BETON</b>		
Çelik	0.5	2.5-4.0
Çelik	1.0	4.0-5.5
Çelik	1.5	10-25
Cam	1.0	1.7-2.0
Polipropilen	0.5	1.5-2.0
Polipropilen	1.0	2.0-3.5
Polipropilen	1.5	3.5-15.0
<b>HARÇ</b>		
Çelik	1.3	15.0
Asbest	3-10	1.0-1.5
<b>ÇİMENTO HAMURU</b>		
Cam	4.5	2.0-3.0
Mika	2.0-3.0	3.0-3.5

\* Bu değerler sadece örnek değerlerdir ve test metodları, özel üretimler ve karışımlardaki farklılıklara bağlı olarak değişebilirler.

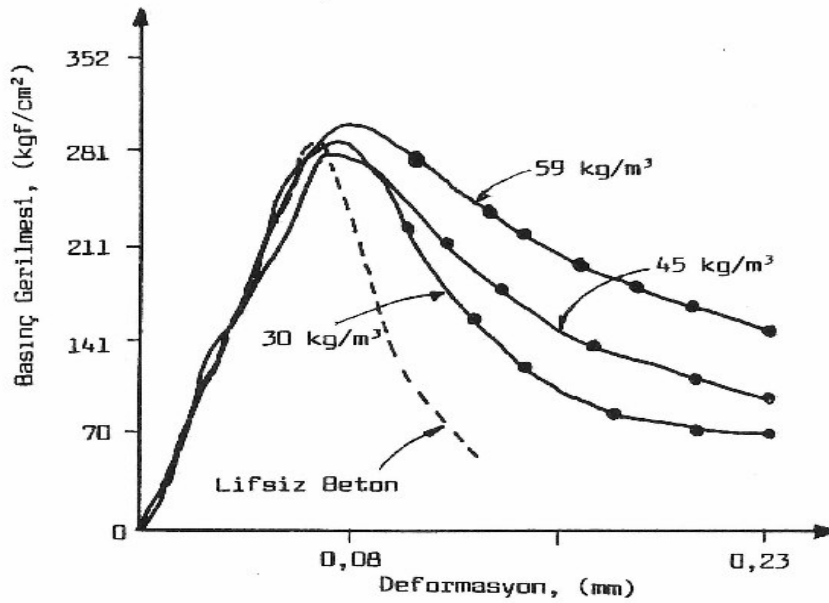
### 2.3.2.2. Basınç Etkisinde Davranış

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar üzerinde yapılmış değişik araştırma sonuçlarına göre, lifler betonun basınç dayanımına her zaman olumlu etkilememekte , %25 seviyesinde basınç dayanımda bir artış gösterebileceği gibi bazen de bu düzeyde bir dayanım kaybı ortaya çıkmaktadır.

Şekil 2.8 dan görülebileceği üzere bu durum beton içerisine gelişigüzel dağılan çelik liflerin yönelimi ile doğrudan ilişkilidir. Şekilde görüldüğü üzere yükleme düzlemine dik olan lifler betonun basınç gerilmesinde herhangi bir işlev yüklenmezler. Kesikli çizgiler ile gösterilmiş olan lifler ise yükleme düzlemine paralellikleri ölçüsünde basınç gerilmesi artmasına duyarlıdır [18].



Şekil 2.8. Basınç dayanımını etkileyen lif yönelmesi [18].



Şekil 2.9. Basınç gerilmesi altında lif hacmi ile değişen deformasyon davranışı [18].



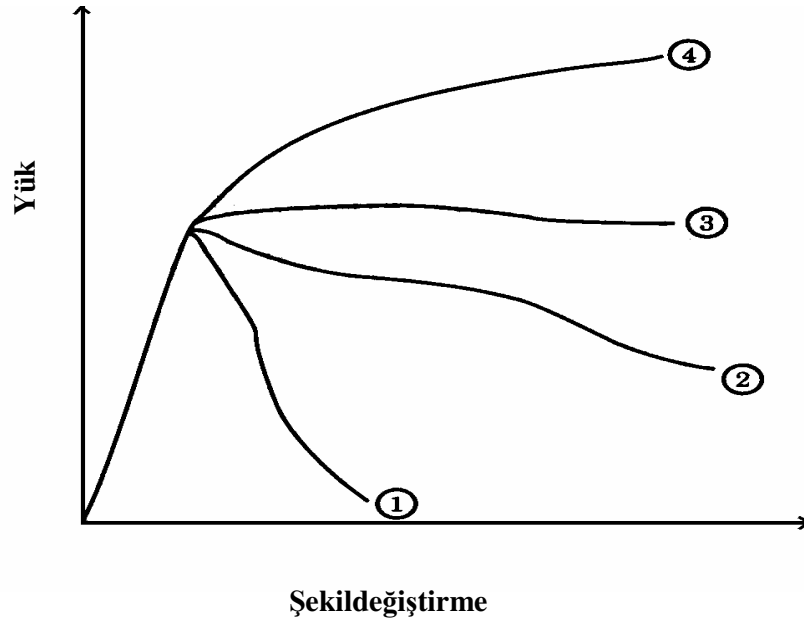
### 2.3.2.3.Eğilme Etkisinde Davranış

Çelik lifli betonların nihai eğilme dayanımları normal betonlara göre % 50- %100 arasında artış göstermektedir.Bu artış çelik liflerin yüksek çekme dayanımlarından ileri gelmektedir.Çimeto hamuru matrisinin çatlamasından (ilk çatlaktan ) sonra liflerin çatlak sonlarından gerilme transferi ve dağılımı yapması nedeniyle yük, ilk çatlaktan sonra bir miktar daha artar.Bu durumda maksimum eğilme yükü lifsiz betonlara göre daha fazla olmaktadır [18].

Eğilme dayanımı da liflerle güçlendirilmiş betonların diğer özellikleri gibi lif/hacim oranından, lif geometrisi ve uzunluğundan, deney numunesi (kiriş) yüksekliğinden ve liflerin beton içerisindeki yöneliminden etkilenmektedir.

Uzun lifler numune boyunca daha iyi yönlenecek daha fazla dayanım artışına neden olurlar. Belli lif tipinde daha yüksek narinlik oranına sahip olan lif, dayanımı daha çok artırır. Eğilme sertliğini etkileyen başlıca faktörler; lif tipi, lif geometrisi, lif miktarı, matrisin yapısı ve numunenin boyutudur [7, s.:155-156].

Lif katkısının eğilme dayanımına ve süneklığe etkisini anlayabilmek için en basit olarak kompozitin gerilme-şekildeğiştirme davranışı gözlenir. Şekil 2.10 değişik tip ve miktarlarda lif içeren lif takviyeli kompozitler (LTK) için tipik bir gerilme-şekil değıştirme grafiğidir. Bu eğrilerin yük artış kısmı hepsinde de benzerdir fakat çatlak sonrası davranışları farklıdır. Çatlak sonrası kısımda oluşan bu farklılık lif katkısına bağlıdır.



Şekil 2.10. Lif takviyeli kompozitler için tipik yük-şekildeğiştirme eğrileri [7].

Eğer lif miktarı azsa çatlaklar arasında köprü kurulması yeterli miktarda karşılanamayacağından çatlak oluşmadan önce matris tarafından karşılanan yükün küçük bir kısmı karşılanabilir. Böyle kirişlerin davranışı klasik eğilme teorisi ile açıklanabilir. Şekil 2.12'deki 1. eğri böyle bir davranışı göstermektedir. Eğer çekme gerilmelerinin önemli bir kısmını taşıyacak miktarda lif kompozit içinde mevcut ise 2. eğriyle gösterilen davranış oluşur. 1. ve 2. eğriyle gösterilen durumlarda liflerin gösterdiği direnç çatlama matrisin gösterdiği dirençlerden daha düşüktür. Böyle eğriler tarafından gösterilen davranış yük yumuşaması davranışı olarak adlandırılır. Eğer lifler çatlak öncesi çekme bölgesinde matrise eşit veya daha fazla kuvvet gösterebilirlerse 3 ve 4 ile gösterilen eğriler oluşur. Lifler tarafından gösterilen bu direnç matris ve lifler arasındaki bağı da bağlıdır [7, s.:85-87].

Literatürde ÇLT'li kompozitlerin eğilme etkisindeki davranışlarını araştıran çok sayıda araştırma vardır. Bunlardan bazıları;

Padmarajaiah ve Ramaswamy [23] % 0, 0.5, 1 ve 1.5 oranlarında kullandıkları kancalı çelik liflerin kirişin tüm derinliği boyunca veya çekme bölgesine kısmen eklenmesinin önerilmeli kirişlerin eğilme davranışına etkisini 3 boyutlu lineer olmayan sonlu eleman yöntemi olan ANSYS 5.5 ile incelemişler ve elde ettikleri sonuçları şu şekilde belirtmişlerdir:

- Yüksek dayanımlı betonlara çelik lif eklenmesi hem ilk çatlak dayanımında hem de maksimum dayanımda artışa neden olmuştur. Yük-sehim eğrisinin maksimum yükten sonraki kısmı lif ilavesiyle değişmiştir. Bu eğrinin artış gösteren kısmı çok az değişikliğe uğramış, azalan kısmı ise daha az dik iniş göstermiştir. Bu da bize malzemenin tokluğunun arttığını ve daha sünek bir davranış gösterdiğini belirtir. Lif ilavesi eğilme kapasitesini artırmıştır. Lifler yüklemenin her safhasında; ilk çatlaktan kırılmaya kadar sehime karşı gösterilen dirençte etkili olmuştur. Liflere bağlı olarak eğilme dayanımında oluşan artışlar; % 0.5, 1 ve 1.5 oranında tüm derinlik boyunca lif içeren kirişler için sırasıyla % 8, 16 ve 21 olmuştur.

- Öngerilmeli kirişlerin sadece çekme bölgesine kısmi olarak lif ilavesi istenen performans artışlarının ekonomik bir şekilde karşılanmasını sağlayabilir. Tüm kesit boyunca lif ilavesi büyük şekilde değiştirme oranlarına sahip veya yorulmaya maruz yapılarda kullanılabilir. Bununla birlikte kesitin yarıdan fazlasına lif ilavesi kayma

açıklığında maksimum yükte ve deformasyon özelliklerinde yalın betona göre çok fazla bir artış sağlamaz.

Chunxiang ve Patnaikuni [24], yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı öngerilmeli kirişler ve % 1 oranında paletli 3 farklı tipte çelik lif ilave edilmiş yüksek dayanımlı öngerilmeli kirişler üreterek çelik liflerin bu kirişlerin eğilme dayanımına etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar şu şekildedir:

- Çelik lif ilavesi öngerilmeli yüksek dayanımlı betonların eğilme rijitliğini akmadan önce artırmıştır. Yük-merkezi şekil değiştirme oranı çelik lif tipine göre % 21.6, 30 ve 5.8 oranlarında artmıştır.
- Çelik lifler kirişlerin kırılma anındaki şekildeğiştirmesini artırır. Gerilme şekildeğiştirme eğrisinin azalan kısmında maksimum yükün % 80'ine karşılık gelen şekildeğiştirme değeri yaklaşık olarak % 12.2, 35.1 ve 12.2 oranlarında artmıştır. % 80'den sonra ise çelik lif kullanılmayan beton kirişlerin yük-sehim eğrilerinde şekildeğiştirmenin artmasıyla hızlı bir düşüş görülmektedir. Bu da çelik liflerin katılmasının malzemeyi daha sünek hale getirdiğini göstermektedir.
- Çelik lifler çatlakların sayısını ve boyutunu azaltmaktadır
- Kısa lifler eğilme rijitliğini artırmada daha etkilidir.

**Tablo 2.8.:** Bazı lif takviyeli çimento esaslı malzemelerin eğilme dayanımı değerlerinin lifsiz malzemelerle karşılaştırılması [17].

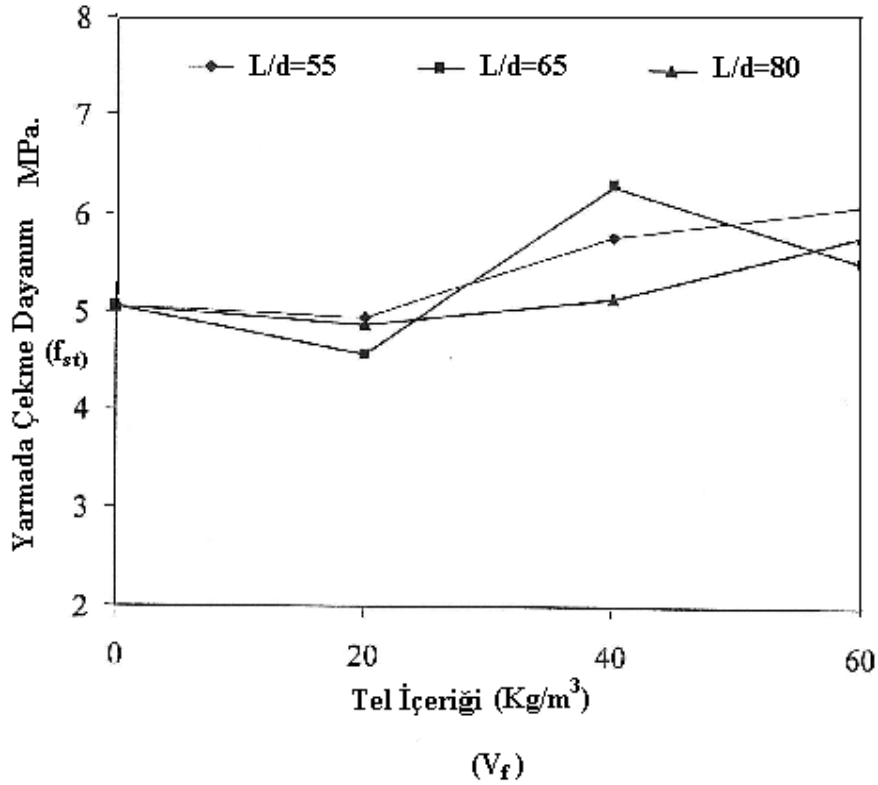
Kompozit	Hacimsel lif yüzdesi	Görelî eğilme dayanımı*
<b>BETON</b>		
Çelik	1-2	2.0
Cam	1-2	2.5-3.5
<b>HARC</b>		
Çelik	1.3	1.5-1.7
Cam	2	1.4-2.3
Asbest	3-10	2.0-4.0
<b>CİMENTO HAMURU</b>		
Cam	4.5	1.7-2.0
Mika	2-4	2-2.5
Polipropilen	1-2	1.0

\* Bu değerler sadece örnek değerlerdir ve test metodları, özel üretimler ve karışımlardaki farklılıklara bağlı olarak değışebilirler.

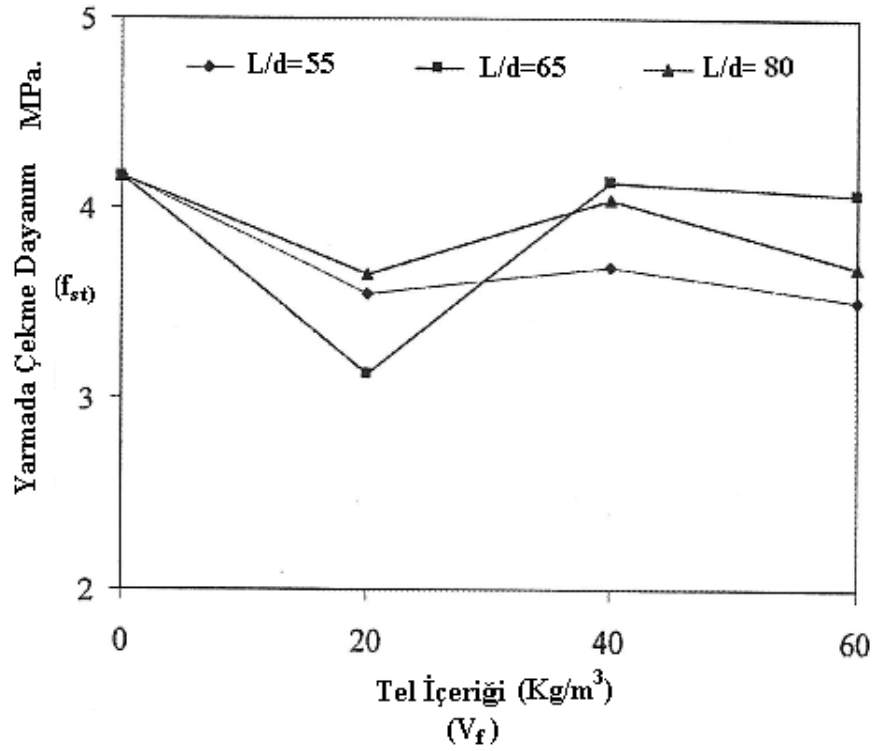
#### 2.3.2.4.Çekme Etkisinde Davranış

Betonların çekme dayanımını belirlemek için direkt çekme ve yarmada çekme olmak üzere iki farklı çekme deneyi kullanılmaktadır. Direkt çekme malzemelere eksenleri doğrultusunda çekme uygulanarak yapılır, bu test kaba agrega içeren betonlar için pratikte pek uygulanmaz. Beton için, yarmada çekme deneyi disk numuneler bazen de küp numuneler üzerinde uygulanır. [7]

Çelik tellerin betonların yarmada çekme dayanımlarını genel olarak iyileştirdiği bilinmektedir.Ancak bu iyileşme betonun direkt çekme ve eğilme dayanımlarındaki iyileştirmeye oranla daha az olmaktadır. ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımlarını etkileyen en önemli etkenler, çelik tel miktarı, narinlik, ve çelik-tel matris özellikleridir. Betonların yarmada çekme dayanımlarının farklı su/çimento oranlarında çelik tel narinliğine ve çelik tel içeriğine bağlı değişimler ile ilgili çalışma F.Köksal tarafından yapılmış olup bulunan sonuçlar şekil Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 dedir. [20]



**Şekil 2.11.** Su/Çimento=0,45 için çelik tel içeriği ve narinliğine bağlı yarma dayanımı [20]

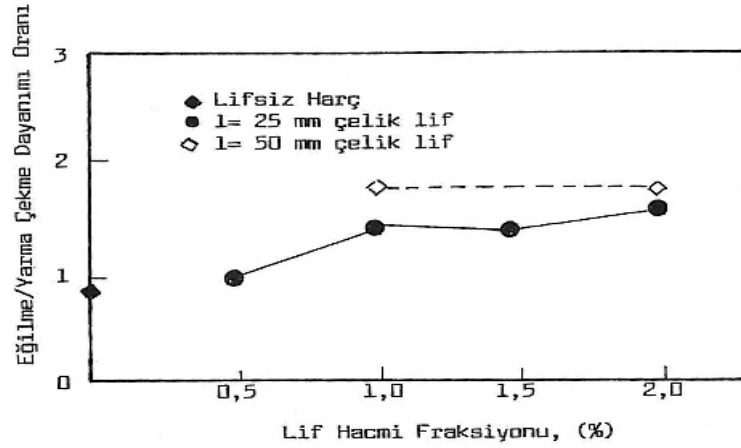


**Şekil 2.12.** Su/Çimento=0,70 için tel içeriği ve narinliğine bağlı yarma dayanımı [20]

Lif miktarı % 2'den az ise yarmada çekme dayanımı çoğunlukla pek değişmez. Fakat beton karışımında silis dumanı da kullanılmış ise liflerin matris ile bağı daha kuvvetli olacağından liflerin kopması lif sıyrılmasına göre daha fazla gerçekleşir ve daha yüksek yarmada çekme dayanımları elde edilir [7, s.:154].

Li ve arkadaşları [25] yaptıkları çalışmada gelişigüzel dağılmış kısa kesilmiş liflerle takviyeli kompozitleri tek eksenli çekme gerilmesi altında 3 farklı lif tipi ve % 2 ila % 6 arasında değişen lif yüzdeleri için incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre yüksek lif yüzdesinin, çekme dayanımını özellikle çelik lif kullanılan lif takviyeli kompozitlerde artırdığını gözlemlemişlerdir.

Eğilme/Yarma Çekme Dayanımı Oranı ile lif hacmi yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 2.13'de gösterilmiştir. Buradan da görüleceği üzere lif hacmi yüzdesi artması ile çekme dayanımları oranında bir artış vardır.



**Şekil 2.13.** Eğilmede/Yarmada Çekme dayanımı oranı ile lif hacmi arasındaki ilişki [18]

Pierre ve arkadaşları [26] ise çelik mikroliflerle % 0 % 2.5 ve % 5 oranlarında takviye edilmiş yüksek performanslı harç ve hamurların mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışmada, % 2.5 mikrolif katılarak üretilen çimento hamurunun çekme dayanımının lif içermeyen hamura göre yaklaşık % 50 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte lif oranının % 5 'e çıkması ile gene artış olmakla birlikte bu artış % 2.5 mikrolif katılan numunelerde gözlenen artışın çok az üstünde olarak yaklaşık % 60 seviyesine gelebilmiştir.

#### 2.4.2. Polimer Lif Katkılı Betonlar ve Kullanım Alanları

Lif hacim oranları % 0.1 - % 0.05 olarak kullanılırlar. Polimer lifli betonların işlenebilmesi, liflerin tipine, uzunluklarına, içeriklerine ve betonun mukavemetine bağlıdır.

Polimer liflerden betona katılan ve en iyi sonuç veren lifler polipropilen liflerdir. Tıpkı çelik lifler gibi polipropilen lifler de betonun bazı özelliklerini artırabilirler. Polipropilen lifler hem lif hamuru hem de tekil halde bulunurlar. Lif tipleri arasında çok az fark vardır [27].

Yüksek performanslı betonların önemli bir özeliği süperakışkanlaştırıcı kullanarak su/bağlayıcı oranının çok aşağılara düşürülmesidir. Su içeriğinin azalması nedeniyle bu betonlarda terleme çok az olur. İlave bağlayıcı olarak silis dumanı da kullanılmış ise silis dumanı tanelerinin büyük yüzey alanından dolayı serbest suyun önemli bir bölümü bağlanır ve terleme neredeyse hiç görülmez. Beton plastik rötire çatlaklarına karşı çok hassas bir hale gelir. İşte bu nedenle, yüksek performanslı

betonlara çok az miktarda polimer esaslı lifler katılarak plastik rötre önlenirken mekanik özelliklere fazla bir etki yapılmamış olur. [28]

Yüksek performanslı betonların yangına karşı dayanıksız olması, özellikle İngiltere ve Fransa arasında bulunan Manş tüneline 1996 yılında çıkan yangından sonra önem kazanmıştır. Silis dumanı içermeyen klasik karışım yöntemleriyle 80 ila 100 MPa arasında basınç dayanımına sahip beton kullanılarak yapılan bu tünelde yangın sırasında Şekil 2.15’de görüldüğü gibi beton yüzeyinde dökülmeler oluşmuştur [29].



**Şekil 2.14.** Manş Tünelinde 1996 yılındaki yangın sırasında beton yüzeyinde görülen dökülmeler [29].

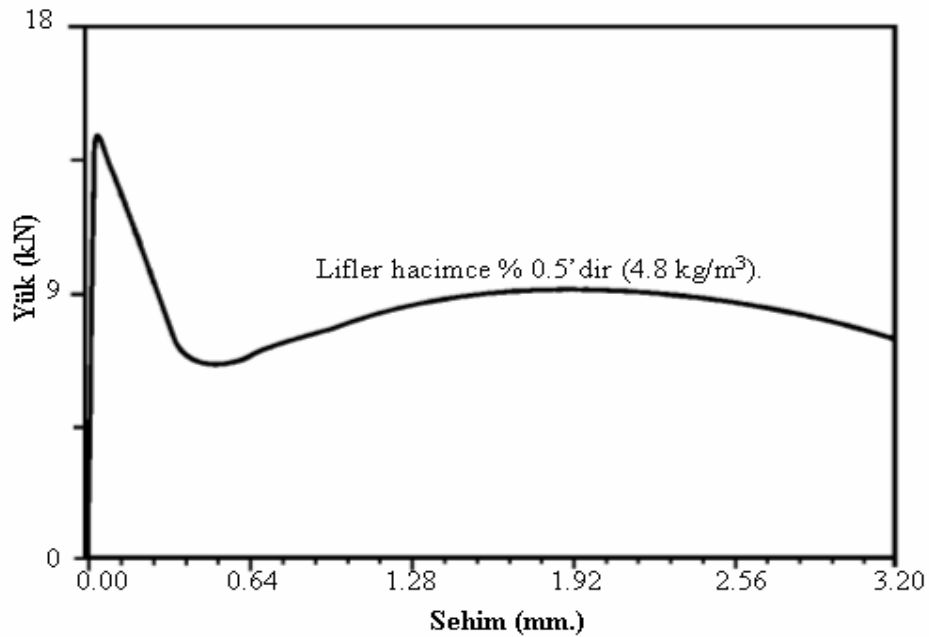
#### **2.4.2.2. Polimer Lif Takviyeli Betonların Mekanik Özellikleri**

Polimer lifler, çelik liflere göre betonun mekanik özelliklerini artırmada çok fazla etkili olamazlar, hatta belli bir değerden fazla kullanılan uygulamalarda olumsuz etki yapmaktadırlar. Bununla birlikte, az da olsa betona enerji yutma özeliği kazandırır ve özellikle de plastik rötrede çok etkili olurlar. PP lifler sertleşmiş betonda mukavemet artırıcı bir donatı etkisi yaratmazlar. Etkileri betonun plastik safhasında geçerlidir ve bir tür katkı malzemesi görevi görürler [30].

Betona polimerik esaslı liflerin katılmasının bir diğer faydası da; yüksek sıcaklıklarda beton içinde genişleyen su buharının dışarı kaçması sonucu betonun yangında daha az hasar görmesinin sağlanmasıdır. Yüksek performanslı betonlarda boşlukların çok küçük, az ve ilişkisiz olması su buharının kaçışını önler, sonuçta betonun dış kabuğu patlar, dökülür. Önlem olarak betona polipropilen lif katılması

önerilir. Sıcaklıkta eriyen bu lifler gerekli boşlukları ve kanalcıkları oluşturarak su buharının dışı kaçmasını sağlarlar [31]. Beton veya sıvada polipropilen (PP) lifin en önemli etkisi, dökümden sonraki ilk birkaç saat içinde plastik büzülme nedeniyle oluşacak çatlakları kontrol altına almasıdır. Sertleşme prizlenmenin ilk safhasında beton mukavemetinin oluşma hızı, büzülme nedeniyle oluşan iç çekme gerilmelerinin oluşum hızından daha yavaştır. Bu plastik büzülme esas itibariyle su ve çimento arasında başlayan kimyasal reaksiyon ve suyun buharlaşmasının doğal bir sonucudur. PP lifler, büzülme gerilmelerine karşı bir direnç meydana getirir ve büzülme nedeniyle oluşacak çatlak tehlikesini en az düzeye indirir [30].

% 0.5 oranında tekil polipropilen lif içeren bir kirişin tipik yük-sehim eğrisi Şekil 2.15’de görülmektedir. Bu şekilden, ilk çatlaktan sonra yük kapasitesinin dikkate değer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Hem katılan hacimce lif miktarının düşük olması hem de liflerin elastisite modülünün düşük olması bu davranışta etkindir. Böyle bir düşüş hacimsel lif yüzdesinin % 0.1 olduğu durumlarda bile gözlemlenebilir[7,s.:152 162].



Şekil 2.15. Polimer lif takviyeli kompozitler için tipik yük-sehim eğrisi [7].



### **3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

#### **3.1 Çalışmanın Amacı**

Bu çalışmada çelik liflerle üretilmiş betonlarda basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve eğilme dayanımları saptanıp irdelenecektir.

#### **3.2. Üretilen Betonların Ortak Özellikleri**

Tez çalışması kapsamında 12 seri üretim yapılmıştır. Üretimler İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Üretimde PÇ 42,5 cinsi kullanılmıştır. Bütün üretimlerde çimento dozajı 600 kg/m<sup>3</sup> alınmıştır. Üretimlerde bağlayıcı madde olarak çimentonun yanında silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanı miktarı çimento dozajının %10 u olarak belirlenmiştir. Üretimlerde akışkanlığı sağlamak için yeni kuşak süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

#### **3.3. Kullanılan Malzeme Özellikleri**

##### **3.3.1 Çimento**

Kullanılan çimento PÇ 42,5 Portland Çimentosu olup özgül ağırlığı 3,16 g/cm<sup>3</sup> ve üretilen betonlarda çimento dozajı 600 kg/m<sup>3</sup>'tür. Kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri ise Tablo 3.1'de verilmektedir.

**Tablo 3.1.** Kullanılan çimentonun özellikleri

<b>Fiziksel Özellikler</b>		
Özgül ağırlık, g/cm <sup>3</sup>		3,16
Blaine özgül yüzeyi (cm <sup>2</sup> /g)		3000
Su/çimento, %		27,4
Priz başlangıcı, dak.		177
Priz sonu, dak.		223
Le Chatelier, mm		1
<b>Mekanik Özellikler</b>		
Basınç Dayanımı, N/mm <sup>2</sup>	1 gün	17,9
	2 gün	27,5
	7 gün	41,9
	28 gün	58,7

### 3.3.2 Agrega

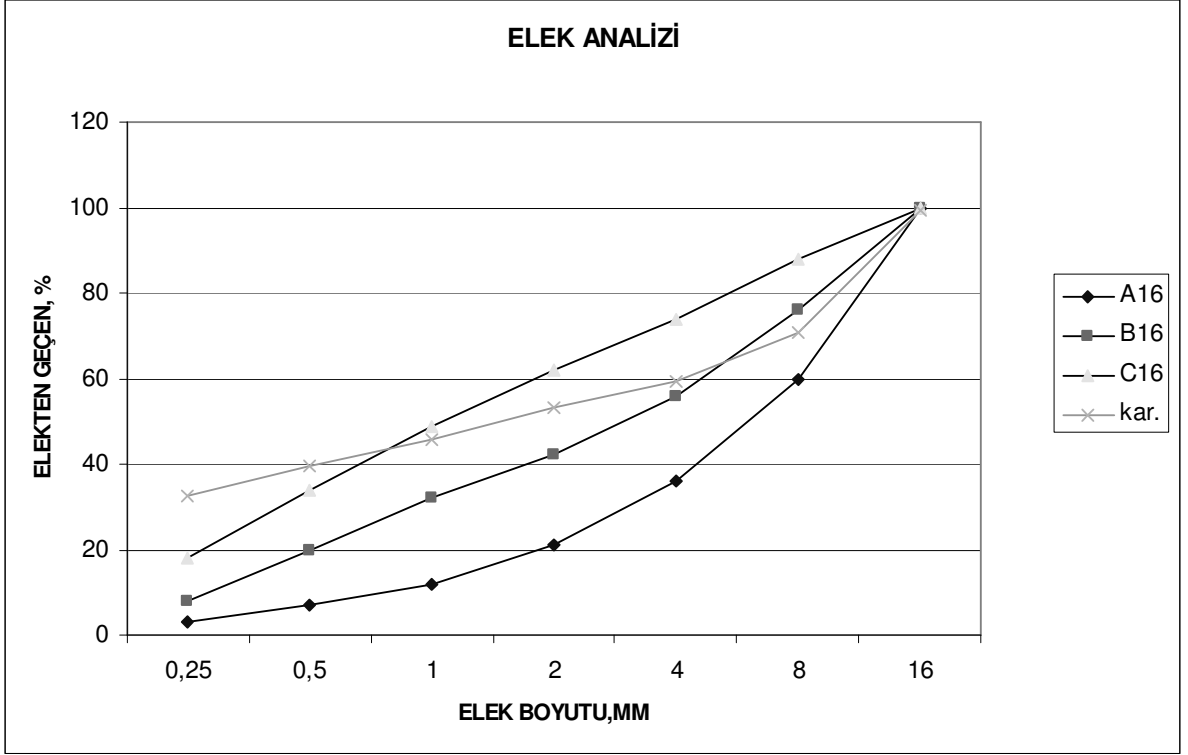
İri agregalar olarak en büyük agregalar boyutu 16 mm'lik kırmataş I, ince agregalar olarak 0-4 mm boyutunda kırmakum ve Şişecam fabrikalarından sağlanan 0-0,25 mm boyutunda öğütülmüş silis unu kullanıldı. Kırmataş I, kırmakum ve silis ununun özgül ağırlıkları ise sırasıyla 2,65; 2,65 ve 2,63 g/cm<sup>3</sup>'tür. Üretilen betonlarda kullanılan agregaların hacim oranları Tablo 3.2'de verilmektedir. Agregalar elek analizi sonuçları Tablo 3.3'de verilmekte ve granülometri eğrisi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

**Tablo 3.2.:**Agrega hacim oranları.

Agrega tipi	Karışımındaki hacim oranı (%)
Silis unu	30
Dere Kumu	20
Kırmataş I	40
Kırmakum	10

**Tablo 3.3.:**Agrega elek analizi sonuçları

Elek Boyutu, mm.	Elekten geçen, %				
	Silis Unu	Dere kumu	Kırmakum	Kırmataş I	Karışım, %
0,25	93,5	14,3	15,6	0,0	32,5
0,5	99,9	35,7	23,5	0,0	39,5
1	99,9	59,8	35,8	0,1	45,6
2	100,0	82,6	64,1	0,2	53,0
4	100,0	96,7	98,4	0,3	59,3
8	100,0	99,9	99,8	26,9	70,7
16	100,0	100,0	100,0	98,5	99,4
32	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0



**Şekil 3.1.** Beton üretiminde kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi.

### 3.3.3 Çelik Tel

Bu çalışmada, 2 si kancalı olmak üzere 3 tip çelik lif kullanıldı. Kancalı uçlu çelik teller Şekil 3.2 de görülmektedir. Kullanılan çelik tellerin özellikleri Tablo 3.4’de verilmektedir.



**Şekil 3.2.** Dramix RC 65/60 ve Dramix ZP 305 tipi kancalı çelik lifler

**Tablo 3.4.:**Lif Özellikleri

Çelik Telin Tipi	Tel Uzunluğu (L), mm	Tel Çapı (d), mm	Tel Narinliği (L/d)	Özgül Ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	Çekme Dayanımı, N/mm <sup>2</sup>
OL 6/16	6	0,16	37.5	7170	2250
Dramix RC 65/60 BN	60	0,90	65	7850	1000
Dramix ZP 305	30	0,55	55	7850	1100

### 3.3.4. Polipropilen Lif

Beton üretiminde Duomix M 20 tipi lif topluluğu şeklinde lifler kullanıldı. Duomix M 20 tipi liflerin teknik özellikleri Tablo 3.5’de verilmektedir.

**Tablo 3.5.:** Duomix M 20’nin teknik özellikleri

<b>Teknik Özellikler:</b>	<b>DUOMIX M 20</b>
Tipi	:Liflendirilmiş
Çapı	:16 mikron
Uzunluğu	:20 mm.
Spesifik Yüzeyi	:275 m <sup>2</sup> /kg
Malzeme	:Polipropilen
Yoğunluk	:0,91 kg/dm <sup>3</sup>
E-Modülü	:3500-3900 N/mm <sup>2</sup>
Çekme Mukavemeti	:320-400 N/mm <sup>2</sup>
Sıvı Tutma Kapasitesi	:% 0,0
Azami Çalışma Sıcaklığı	:145 °C
Kimyasal Direnci	:Asal
Rengi	:Beyaz Şeffaf

Duomix M 20 ince olduğundan kalın polipropilen liflerin 40 katı kadar lif sayısına ulaşır ve aderans yüzeyi artar, ancak karışım sırasında problem yaratmaz, alkali direnci iyidir ve yüksek bağlayıcılık özeliği vardır.

Betona polipropilen lif eklenirse;

- Priz sırasında oluşan kılcal rötre çatlakları azalır.
- Su geçirimsizliği artar.
- Betonun donma-çözölmeye karşı direnci artar.
- Betonun köşe ve kenarlarındaki kırılmalara karşı direnci artar.
- Betonun kohezyonu artar.

### **3.3.5 Silis Dumanı**

Deneylerde bağlayıcı olarak çimentoya ek olarak filler ve puzolanik etkisi bulunan silis dumanı da kullanılmıştır. Silis dumanının miktarı çimento dozajının %10 olarak belirlenmiştir. Helyum piknometresi ile yapılan deneyde silis dumanının özgül ağırlığı  $2,22 \text{ gr/cm}^3$  bulunmuştur.

#### **3.3.5.1 Silis Dumanının Genel Özellikleri**

Silis dumanının çok ince olması, amorf bir yapıya sahip olması ve bileşiminde % 90 civarında  $\text{SiO}_2$  bulunması silis dumanının diğer puzolanlara göre çok üstün niteliklere sahip olmasını sağlamaktadır.

### **3.3.6 Kimyasal Katkı**

Üretimlerde kullanılan Glenium51'in geleneksel süperakışkanlık verici maddelerinden (Naftalin Sülfonat Formaldehit veya Melamin Sülfonat Formaldehit esaslı) farkı, çimento dağılımının etkinliğini büyük ölçüde arttırmasıdır. Geleneksel, melamin ve naftalin sülfonatlar gibi süperakışkanlaştırıcılar, çimento granülleri tarafından emilen polimer esaslı katkılardır. Bu katkılardaki polimerler beton karıştırma işleminin en erken aşamasında granüllerin yüzey alanlarının çevresini kuşatırlar. Polimer zincirlerinin sülfonik grupları, çimento partikül yüzeylerinin negatif yükünü arttırır ve bu partikülleri elektriksel itme ile dağıtırlar. Bu elektrostatik mekanizma, çimento hamurunun dağılmasına neden olur ve bunun olumlu bir sonucu da, belirli beton işlenebilirliğinin daha az su ile elde edilmesini sağlamasıdır. Glenium51'in geleneksel süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerine göre değişik bir kimyasal yapıya sahiptir. Glenium 51, uzun kenar zincirli karboksilik eter polimerlerinden oluşur. Karıştırma işleminin başlangıcında, geleneksel süper akışkanlaştırıcılarda olduğu gibi, elektrostatik dağılma mekanizmasını harekete geçirir. Bu işlemle su içeriği büyük ölçüde azalan bir beton elde edilir. Ancak

polimer omurgasına bağlıyan zincirler, imento tanelerinin dağılma ve yayılma yeteneğini büyük ölçüde kararlı hale getirir.

ASTM C494 tip A ve F, EN 934 -2 'ye uygundur. Polikarboksilik eter esaslı olan bu yeni kuşak süperakışkanlaştırıcı (20°C'de) 1,07-1,012 g/cm<sup>3</sup> zgl ağırlığında olup kahverengi ve homojen haldedir.

### 3.4. Beton retimi

Bu çalışmada üretilen 12 farklı bileşime sahip betonlarda polipropilen lif oranı hacimce % 0,05'de sabit tutuldu. 3 farklı elik lif toplam lif yüzdesi % 2 olacak şekilde farklı miktarlarda katıldı. Böylece toplam lif yüzdesi kontrol betonu dışındaki betonlarda % 2,05'de sabit tutuldu. Bütün bileşimlerde nominal imento dozajı 600 kg/m<sup>3</sup>'te sabit tutuldu. Silis dumanı imento ağırlığının % 10'u oranında kullanıldı, su/imento oranı % 30'da ve su/bağlayıcı oranı da % 27'de sabit tutuldu. Bütün bileşimlerde hava boşluğu oranı % 1,5 olarak ngrld. Katkı miktarı bütün bileşimlerde aynı işlenebilmeyi sağlayabilmek için az miktarda değiştirilerek % 1,5-2 oranında kullanıldı.

#### 3.4.1. Üretimde İzlenen Sıra

- Silis dumanı üretimden 2 saat önce karma suyunun % 60'ı ile karıştırıldı.
- Kırmataş I ve kırmakum betoniyerde kuru olarak 30 sn karıştırıldı.
- Deniz kumu eklenip 30 sn. daha karıştırıldı.
- Çimento eklenip 30 sn karıştırıldı.
- Silis unu eklenip 30 sn. karıştırıldı.
- Lifler önce küçük boyutlu liflerden başlanarak çalışan betoniyere yavaş yavaş eklendi.
- Ayrı kapta hazırlanan silis dumanı bulamacına polipropilen lifler ve imento ağırlığının % 0,8'i oranında süperakışkanlaştırıcı eklenip karıştırıldı ve bu karışım çalışmakta olan betoniyere yavaş yavaş katıldı.
- Karma suyunun geri kalan % 40 oranındaki kısmı çalışan betoniyere yavaş yavaş eklendi.
- Karışımın kıvamına göre bir miktar daha süperakışkanlaştırıcı eklenerek 15 dakika kadar karıştırıldı.

### 3.4.2. Numune Kodlarının Belirlenmesi

Numune kodları belirlenirken kullanılan liflerin cinsi ve oranları esas alındı. Lifin cinsini belirten harfi lif yüzdesini belirten rakam izlemektedir. Numune kodları ve lif yüzdeleri Tablo 3.5.'de görülmektedir.

**Tablo 3.5.** :Üretilen betonların kodları ve karışımlardaki lif yüzdeleri

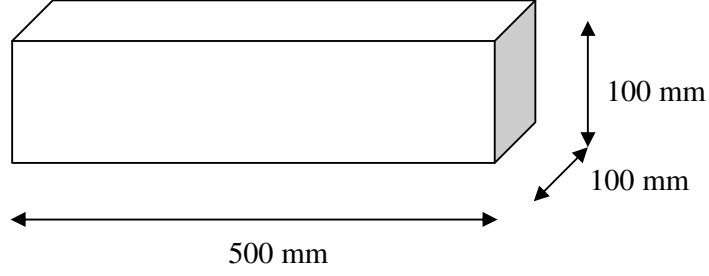
Numune kodu	polip. lif	OL6/16	ZP305	RC 65/60	Toplam
NB	-	-	-	-	-
PP	0,05	-	-	-	0,05
O	0,05	2,0	-	-	2,05
Z	0,05	-	2,0	-	2,05
R	0,05	-	-	2,0	2,05
OZ	0,05	1,0	1,0	-	2,05
OR	0,05	1,0	-	1,0	2,05
ZR	0,05	-	1,0	1,0	2,05
OZR	0,05	0,667	0,667	0,667	2,05
R1O0,5Z0,5	0,05	0,5	0,5	1,0	2,05
Z1O0,5R0,5	0,05	0,5	1,0	0,5	2,05
O1Z0,5R0,5	0,05	1,0	0,5	0,5	2,05

### 3.4.3 Numune Boyutları ve Şekilleri

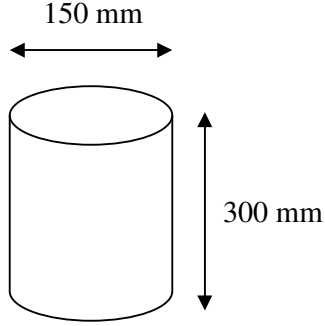
Her bir karışımdan 3 adet prizma 3 adet silindir ve 6 adet disk numuneleri üretildi. Numuneler üretimden 24 saat sonra kalıplarından alınarak  $20 \pm 2$  °C'deki kür havuzuna kondu. Numune boyutları ve şekilleri Şekil 3.3'de görülmektedir.



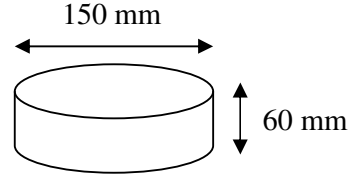
**Prizma:** 100 x 100 x 500 mm



**Silindir :**  $\Phi = 150$  mm,  $h = 300$  mm



**Disk :**  $\Phi = 150$  mm,  $h = 60$  mm



**Şekil 3.3.** Numune boyut ve şekilleri

### 3.5. Taze Beton Deneyleri

Taze beton; betonun karıştırma işlemi bittikten sonra sahip olduğu işlenebilirliğini belirli bir değişme olmadan koruyabileceği süre içindeki halidir. İşlenebilme bir taze beton özeliğidir. Taze beton kolay karıştırılmalı, kolay yerleştirilmeli, karıştırırken, taşınırken ve yerleştirilirken ayrışmamalı ve homojenliğini yitirmemelidir. İşlenebilme kavramı içinde minimum enerji, homojenliğin korunması, boşluksuz yerleşme ve kıvam kavramları yatmaktadır. Taze betonla ilgili olan bu unsurların betonun mekanik özellikleri ve performansı üzerinde önemli etkileri vardır. İşlenebilme deneyi Şekil Ek 1'de, beton bileşimleri ve taze beton özellikleri Tablo 3.6.'de verilmiştir.

**Tablo 3.6. :Beton bileşimleri ve taze beton özellikleri**

<b>Kullanılan malzeme</b>	<b>NB</b>	<b>PP</b>	<b>O</b>	<b>Z</b>	<b>R</b>	<b>OZ</b>	<b>OR</b>	<b>ZR</b>	<b>OZR</b>	<b>R1Z0,5O0,5</b>	<b>Z1R0,5Z0,5</b>	<b>O1R0,5Z0,5</b>
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	589,9	595,0	589,5	586,3	593,5	585,5	587,9	583,9	588,0	594,3	577,4	568,6
Silis dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	59,0	59,5	59,0	58,6	59,4	58,5	58,8	58,4	58,8	59,4	57,7	56,9
Su (kg/m <sup>3</sup> )	177,0	178,5	176,9	175,9	178,1	175,6	176,4	175,2	176,4	178,3	173,2	170,6
Süperakışkanlaştırıcı(kg/ m <sup>3</sup> )	8,8	8,9	11,8	11,7	11,9	11,7	11,8	11,7	5,9	11,9	11,5	11,4
Kırmataş I (kg/ m <sup>3</sup> )	615,2	619,9	592,7	589,4	596,7	588,6	591,1	587,0	597,1	597,5	580,5	571,6
Kırmakum (kg/ m <sup>3</sup> )	151,5	152,7	146,0	145,2	147,0	145,0	145,6	144,6	147,1	147,2	143,0	140,8
Dere kumu (kg/ m <sup>3</sup> )	294,1	296,4	283,4	281,8	285,3	281,4	282,6	280,7	285,5	285,7	277,6	273,3
Silis unu I(kg/ m <sup>3</sup> )	444,5	447,9	428,3	425,9	431,2	425,4	427,1	424,2	431,5	431,8	419,5	413,1
Polipropilen lif (kg/ m <sup>3</sup> )	0,0	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4
OL 6/16 çelik lif (kg/ m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	140,9	0,0	0,0	70,0	70,3	0,0	46,8	35,5	34,5	67,9
ZP 305 çelik lif (kg/ m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0	153,4	0,0	76,6	0,0	76,4	51,3	38,9	75,5	37,2
RC 65/60 çelik lif (kg/ m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,0	155,3	0,0	76,9	76,4	51,3	77,8	37,8	37,2
Hava boşluğu (dm <sup>3</sup> )	39,6	31,4	37,5	42,8	31,0	44,1	40,2	46,7	40,0	29,6	57,3	71,8
Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2,34	2,36	2,43	2,43	2,46	2,42	2,43	2,42	2,44	2,46	2,39	2,4
Su/çimento	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Süperakş./çimento (%)	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0	2,0	2,0
Çökme (cm.)	18	19	21	24	24	23	24	24	25	24	23	22

### 3.6. Sertleşmiş Beton DeneYleri

#### 3.6.1.Silindir Basınç Deneyi

Basınç deneyleri 26. günde kür havuzundan çıkarılarak başlık yapılan çapı 150 mm. ve yüksekliği 300 mm. olan silindir numuneler üzerinde 28. günde yapıldı. Basınç deneylerinde 500 ton kapasiteli yükleme makinası kullanıldı. Her 2,5 tonluk yüke karşı gelen düşey yerdeğiştirme değerleri komperatör yardımıyla okundu ve elde edilen grafiklerden elastisite modülleri hesaplandı. Ayrıca numunelerin kırılma yükleri kesit alanına bölünerek basınç dayanımları hesaplandı.

Basınç deney düzeneği Şekil Ek 2’de, bütün numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri Ek-A’da verilmektedir.

Elastisite modülü değerleri bu eğrilerden faydalanılarak hesaplandı. Elastisite modülleri hesaplanırken en büyük yükün % 5’i ile % 45’i arasında kalan gerilme-

şekildeğiştirme değerleri kullanıldı. Ayrıca kırılma noktasındaki yük kesit alanına bölündü ve basınç dayanımları hesaplandı. Silindir basınç deneyleri gerilme-şekil değıştirme eğrilerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo 3.8’de verilmektedir.

### 3.6.2.Silindir Yarmada Çekme Deneyi

Yarmada çekme deneyleri 150 mm. çapında ve 60 mm yüksekliğinde disk numuneler üzerinde yapıldı. Numunelere çizgisel yük uygulanarak yarma kuvvetleri bulundu ve bu kuvvetlerden 3.1. denklemleri yardımıyla yarmada çekme dayanımlarına geçildi.

$$f_t = \frac{2P_{\max}}{\pi DL} \quad (3.1)$$

$f_t$  : Yarmada çekme dayanımı (N/mm<sup>2</sup>)

$P_{\max}$  : Maksimum yük (N)

$D$  : Silindirin çapı (mm)

$L$  : Silindirin yüksekliği (mm)

Yarmada çekme deney düzeneğı Şekil Ek 3’ de, yarmada çekme deneylerinden elde edilen yarmada çekme dayanımı değerleri Tablo 3.7’de ve Şekil 4.6’da görülmektedir. Yarmada çekme deneyi sonunda disk numunedeki lif dağılımının fotoğrafı ise Şekil Ek 4 de verilmektedir.

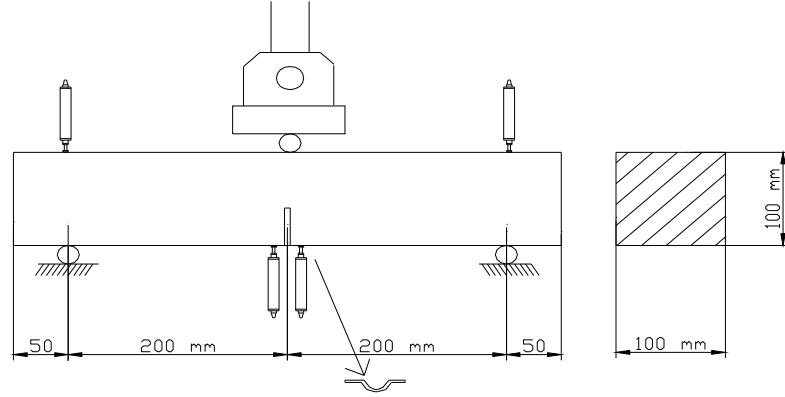
### 3.6.3.RILEM Kırılma Enerjisi Deneyi

Kırılma enerjisi deneyleri İ.T.Ü. Yapı ve Deprem laboratuvarında MTS marka yerdeğıştirme kontrollü yükleme makinası ile yapıldı. Üretimden itibaren 60 ± 6 gün sonra 3 noktadan yüklemeli eğilme deneyine tabi tutulan numunelerin tepe noktası sonrası gerilme-şekildeğıştirme eğrileri elde edildi ve kırılma enerjileri hesaplandı. Böylece farklı tip ve boyuttaki çelik liflerin eklenmesinin malzemenin eğilme dayanımına ve kırılma enerjisine etkileri saptandı.

#### 3.6.3.1.Deney Düzeneğinin Hazırlanması

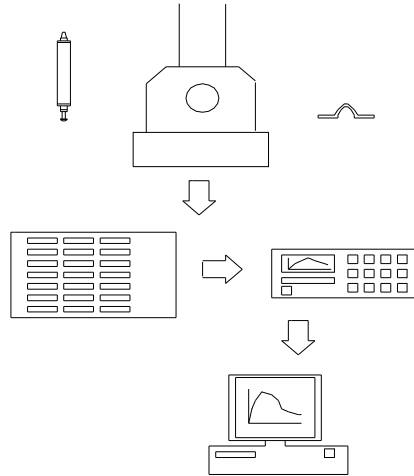
Çentikli numunelerin etkin kesit alanı 60x100 mm. olacak şekilde 100x100x500 mm. boyutundaki prizmatik numunelerin orta noktasından 40 mm.

derinliğindeki çentik elmas testere ile açıldı. Kirişin mesnetlenişi, yükün uygulandığı nokta, çentik yeri ve mesnet bilgileri Şekil 3.4 'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.4.** 3 noktadan yüklemeli eğilme deneyi düzeneği

Eğilme deneyi veri toplama sistemi Şekil 3.5'de verilmektedir. Deney düzeneğinin fotoğrafı ise Şekil Ek 5'de verilmektedir.

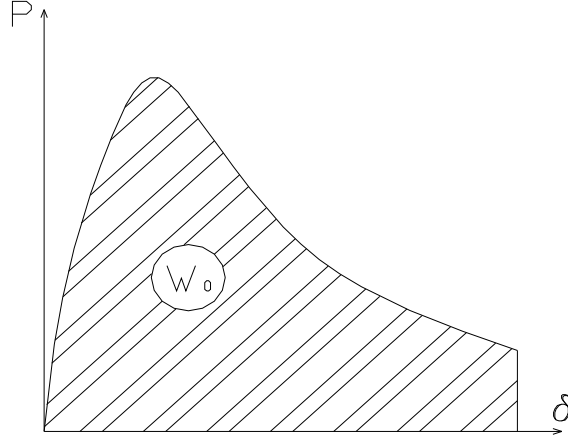


**Şekil 3.5.** Eğilme deneyi veri toplama sistemi

### 3.6.3.2. Kırılma Enerjilerinin Hesaplanması

Bir numunenin yük-sehim eğrisi oluşturulduğunda bu eğrinin altında kalan alan enerji yutma kapasitesi ile orantılıdır. Beton karışımına lif eklenmesinin en önemli faydası, enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırmasıdır. Hillerborg ve

arkadaşlarının belirttiği kırılma enerjisi ( $G_F$ ) hesaplanmıştır. Bu özelliğin hesaplanması için standart test metodu 1985 yılında RILEM tarafından belirtilmiştir [32]. Bu çalışmada kırılma enerjisini hesaplamak için çentikli kirişlerde üç noktadan yüklemeli eğilme deneyi uygulandı. Örnek bir yük-sehim eğrisi Şekil 3.6'da verilmektedir.



**Şekil 3.6.** Örnek bir yük-sehim eğrisi

Kırılma enerjilerinin hesaplanmasında 3.2 bağıntısı kullanıldı.

$$G_F = \frac{(W_0 + mg\delta_0)}{A_{lig}} \quad (3.2)$$

- $G_F$  :Kırılma enerjisi (N/m)  
 $W_0$  :Yük-sehim eğrisi altında kalan alan (Nm)  
 $m$  :Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)  
 $g$  :Yerçekimi ivmesi (9,81 m/sn<sup>2</sup>)  
 $\delta_0$  :Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu (m)  
 $A_{lig}$  :Etkin kesit alanı (m<sup>2</sup>)

Bütün numuneler için elde edilen yük-sehim eğrileri Ek B'de, hesaplanan kırılma enerjisi değerleri Ek C'de ve bunların ortalaması ile çizilen kırılma enerjileri grafiği Şekil 4.9'da verilmektedir.

### 3.6.3.3. Net Eğilme Dayanımlarının Hesaplanması

Net eğilme dayanımları  $f_{net}$  değerleri bütün numuneler için 3.3 bağıntısı kullanılarak hesaplandı.

$$f_{net} = \frac{(3Pl)}{2B(D - a_0)^2} \quad (3.3)$$

$f_{net}$  :Net eğilme dayanımı (N/mm<sup>2</sup>)

P :Maksimum yük (N)

l :Mesnetler arası uzaklık (mm)

B :Numune kesitinin genişliği (mm)

D :Numune kesitinin yüksekliği (mm)

$a_0$  :Çatlak derinliği (mm)

Bütün numuneler için hesaplanan net eğilme dayanımı değerleri EK D’de ve bunların ortalaması ile çizilen net eğilme dayanımları grafiği Şekil 4.14’de görülmektedir.

### 3.6.4. Karakteristik Boyların Hesaplanması

Üretilen numunelerin karakteristik boyları Hillerborg tarafından önerilen şekilde 3.4 bağıntısı kullanılarak hesaplandı.

$$l_{ch} = \frac{EG_F}{f_t^2} \quad (3.4)$$

$l_{ch}$  :Karakteristik boy (mm)

E :Elastisite Modülü (kN/mm<sup>2</sup>)

$G_F$  :Kırılma enerjisi (N/m)

$f_t$  :Yarmada Çekme Dayanımı (N/mm<sup>2</sup>)

Numuneler üzerinde yapılan sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sertleşmiş beton özellikleri Tablo 3.7’de görülmektedir.

**Tablo 3.7.:** Sertleşmiş beton özellikleri

Numune Kodları	NB	PP	O	Z	R	OZ	OR	ZR	OZR	R1O0.5Z0.5	Z1O05R0.5	O1Z05R0.5
Basınç Dayanımı- $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	82,5	91,5	116,2	76,7	101,8	85,4	110,5	107,6	83,9	103,2	82,0	84,8
Elastisite modülü-E (kN/mm <sup>2</sup> )	45,1	41,7	46,0	38,2	42,6	42,0	44,1	43,7	40,2	46,4	41,0	41,3
Yarmada Çekme Dayanımı- $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	6,9	6,6	10,1	9,4	11,3	11,7	9,3	10,7	9,1	10,6	7,4	8,1
Net Eğilme Dayanımı- $f_{fnet}$ (N/mm <sup>2</sup> )	6,0	5,8	8,4	13,1	21,8	8,7	11,1	14,0	14,1	14,6	9,6	10,5
Kırılma Enerjisi- $G_F$ (N/m)	108	109	4119	6555	10113	3818	4134	5730	6591	5763	3173	3906
Karakteristik Boy- $l_{ch}$ (mm)	100	111	1858	2836	3369	1192	2109	2188	3203	2379	2374	2460

## 4. DENEY SONUÇLARI

### 4.1 Silindir Basınç Deneyleri ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

#### 4.1.1 Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi

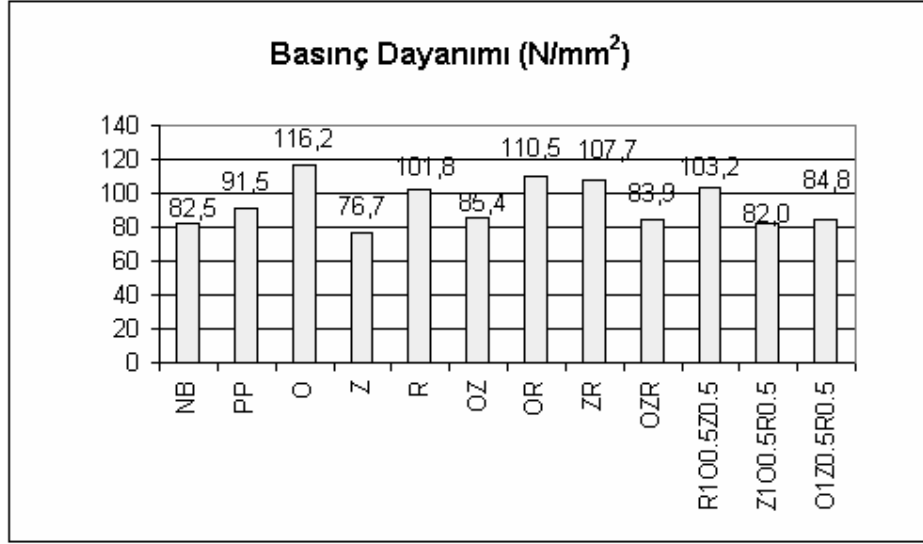
Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 3.7 Sertleşmiş beton özellikleri tablosu ile Şekil 4.1'de görülmektedir. Bu değerlere göre % 2 çelik lif eklenmiş numunelerin basınç dayanımlarında lif tipine bağlı olarak önemli miktarlarda artışlar ve birkaç deney grubunda da düşüşler olmuştur. Yapılan çalışmalarda [3] betona lif eklenmesiyle basınç dayanımında genelde  $\pm$  %25'lik bir değişim olacağı belirtilmektedir. Bu çalışmada % 25'den daha yüksek basınç dayanımı artışları da elde edilmiştir ve % 7'lik düşüş değerleri elde edilmiştir. Karma lif kullanılması ile farklı boyutlardaki lifler farklı çatlama safhalarında devreye girerek çatlakların ilerlemesini durdurmaktadır. Ayrıca iyi karışmayan çelik lifler çatlakların ilerleyişine neden olmaktadır.

Böylece, çelik tel içeriğinin basınç dayanımına etkisi belirgin olmayıp, böyle bir davranış Swamy (1974) tarafından da belirtilmektedir. Basınçta, çelik telin çapı ve muhtemelen beton içindeki yönü önemli rol oynayabilir. Diğer taraftan, çelik telin betona eklenmesinin basınç dayanımından çok basınç göçmesindeki sünekliğin artmasına etki edebileceği söylenebilir.

Çelik lif içermeyen NB karışımında basınç dayanımı  $82,5 \text{ N/mm}^2$  iken en yüksek olarak O karışımında % 40 artış ile  $116,2 \text{ N/mm}^2$ , en düşük olarak da Z karışımında % 7 düşüş ile  $76,7 \text{ N/mm}^2$  değerlerine ulaşmıştır. Elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 4.1'de görülmektedir.

Eren Ö. ve Çelik T. [28]'de yaptıkları araştırmada silis dumanının betonun basınç dayanımını artırdığı ancak lif miktarı ve narinliğinin basınç dayanımına etkisinin çok az olduğu sonucuna varmışlardır.

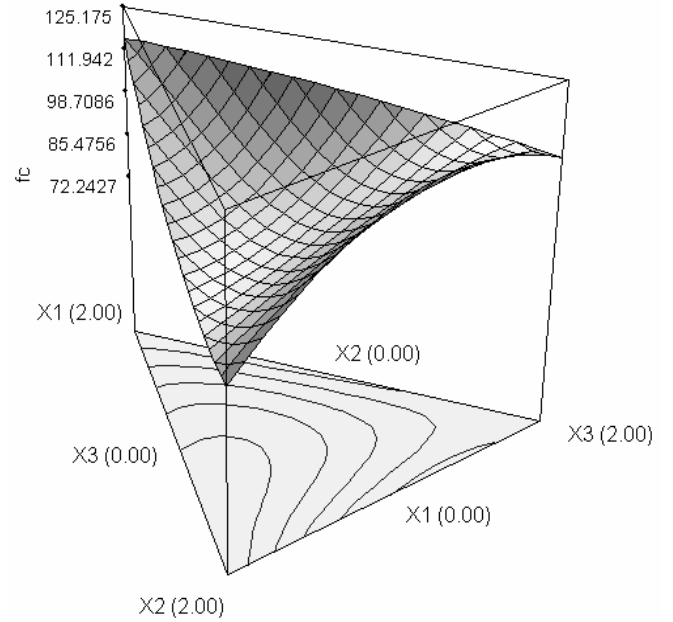




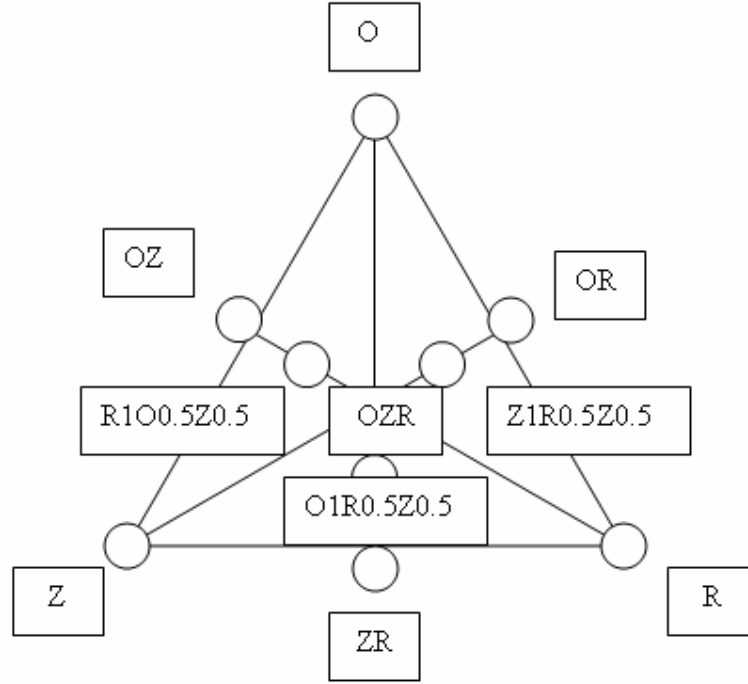
**Şekil 4.1.** Silindir basınç dayanımları

Bu çalışmada üretilen beton karışımına hangi lif tipinden ne miktarda katılmasının basınç dayanımı açısından daha etkili olduğunun saptanması için Design Expert Version 6.0.7 programından yararlanılmıştır. Değişkenlerin analizi (Anova) yöntemi kullanılarak çalışan bu program yardımıyla çizilen Şekil 4.2'den basınç dayanımlarının karma lif yüzdelerine göre değişimi görülmektedir. Bu şekildeki üçgende, her bir beton karışımının hangi noktaya denk geldiği Şekil 4.3'de verilmektedir

X1 = OL 6/16 6/16  
X2 = ZP 305 305  
X3 = RC 65/60



**Şekil 4.2.** Silindir basınç dayanımlarının lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi



**Şekil 4.3.** Beton karışımlarının belirtildiği üçgen.

O=OL 6/16 , Z=ZP 305 , R=RC 65/60 olmak üzere

Bu programa göre toplam % 2 çelik lif kullanıldığında basınç dayanımı açısından kullanılması gereken regresyon modeli şu formülle (4.1) ifade edilmektedir.

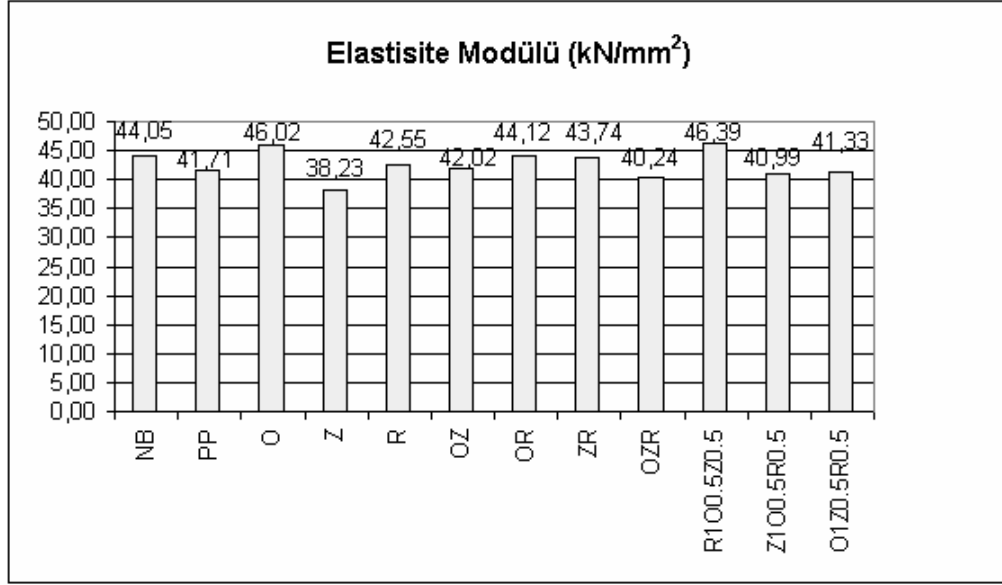
O=OL 6/16 , Z=ZP 305 , R=RC 65/60 olmak üzere;

$$f_c = +57.77891 \times O + 38.19485 \times Z + 51.4281 \times R - 12.47871 \times O \times Z + 2.12129 \times O \times R + 19.4691 \times Z \times R - 52.6912 \times O \times Z \times R \quad (4.1)$$

#### 4.1.2. Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi

Silindir basınç deneyinden elde edilen elastisite modülü değerleri Tablo 3.7 ve Şekil 4.4'de görülmektedir. Bu değerlere göre, NB karışımında elastisite modülü 44.0 kN/mm<sup>2</sup> iken en yüksek olarak R1O0.5Z0.5 karışımında 46.3 kN/mm<sup>2</sup> (% 5.22 artış oranı ile) azalma olarak da Z karışımında 38.23 kN/mm<sup>2</sup> (% 13,11 azalma oranı ile) değerlerine ulaşmıştır.

Makro ve mezo lif kullanılması olumlu sonuçlar vermiştir. En yüksek elastisite modülü R100.5Z0.5 karışımından elde edilmiştir. Elastisite modülündeki en büyük azalma Z karışımında olmuştur.

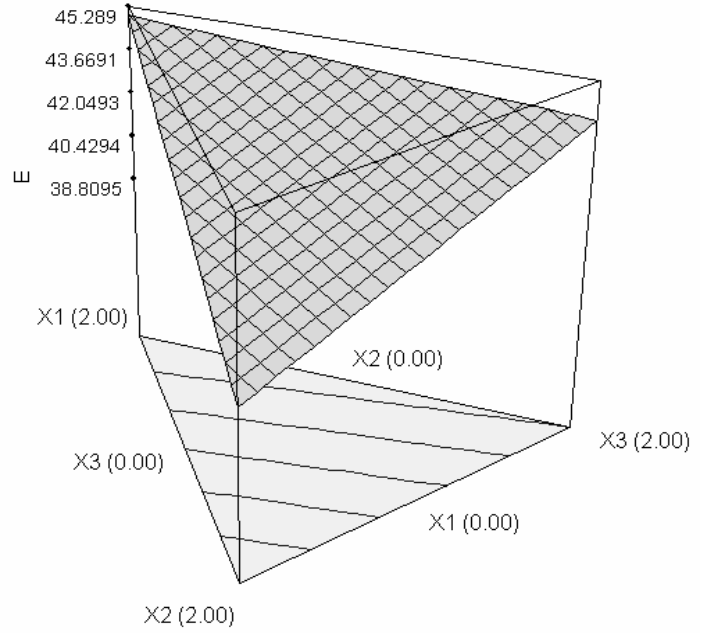


**Şekil 4.4.**Elastisite modülleri

Design Expert Version 6.0.7 programı yardımıyla çizilen Şekil 4.5'den elastisite modüllerinin karma lif yüzdelere göre değişimi görülmektedir. Bu şekildeki üçgende, herbir beton karışımının hangi noktaya denk geldiği daha önce Şekil 4.3'de verilmişti. Bu programa göre toplam % 2 çelik lif kullanıldığında elastisite modülleri açısından kullanılması gereken regresyon modeli şu formülle (4.2) ifade edilmektedir. O=OL 6/16 , Z=ZP 305 , R=RC 65/60 olmak üzere;

$$E = +22.47837 \times O + 19.40475 \times Z + 21.96332 \times R \quad (4.2)$$

X1 = OL 6/16 6/16  
X2 = ZP 305 305  
X3 = RC 65/60

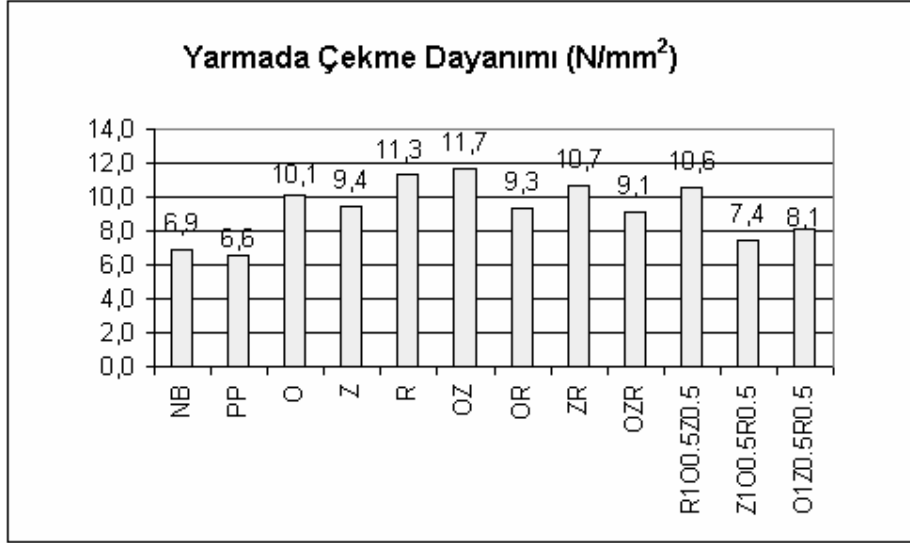


Şekil 4.5. Elastisite modüllerinin lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi

#### 4.2. Silindir Yarmada Çekme DeneYlerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Çelik lif içermeyen NB karışımında yarmada çekme dayanımı  $6,9 \text{ N/mm}^2$  iken en yüksek olarak OZ karışımında % 69 artış ile  $11,7 \text{ N/mm}^2$  en düşük olarak da Z1R0.5O0.5 karışımında % 7 artış ile  $7.4 \text{ N/mm}^2$  değerlerine ulaşmıştır.

Bu sonuçlarda elastisite modüllerine benzer şekilde en yüksek olarak 1 mezo 1 makro lifin birlikte kullanıldığı numunelerden elde edilmiş, 2 makro lifin veya 2 makro 1 mezo lifin birlikte kullanıldığı numuneler en az performans artışı sağlanabilmiştir. Karma lif kullanılması ile tek çeşit lif kullanılmasına göre yarmada çekme dayanımlarında daha yüksek miktarlarda artışlar elde edilmiştir. Her bir karışım için deney yapılan altı numuneden elde edilen değerlerin ortalamasından bulunan yarmada çekme dayanımları ortalama değerleri Şekil 4.6'da görülmektedir.



**Şekil 4.6.** Yarmada çekme dayanımları

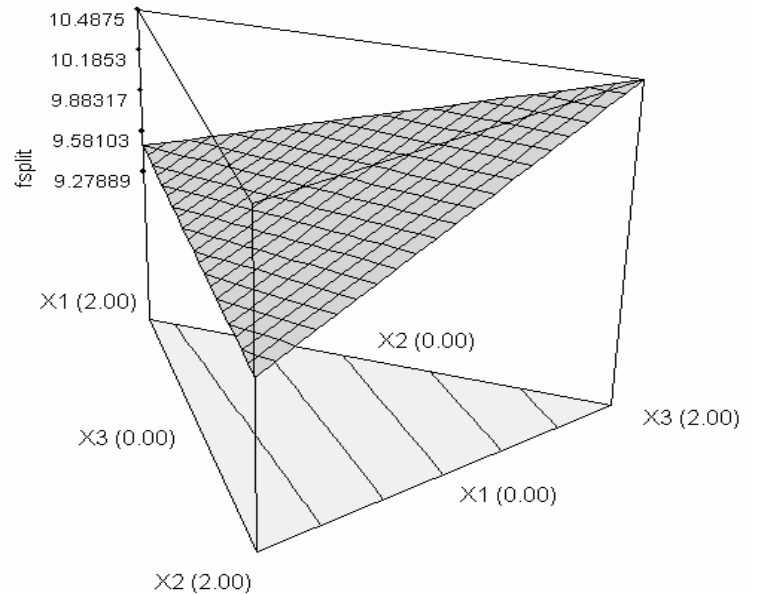
Design Expert Version 6.0.7 programı yardımıyla çizilen Şekil 4.7'den yarmada çekme dayanımlarının karma lif yüzdelere göre değişimi görülmektedir. Bu şekildeki üçgende, her bir beton karışımının hangi noktaya denk geldiği Şekil 4.3'de daha önceden verilmişti.

Bu programa göre toplam % 2 çelik lif kullanıldığında yarmada çekme dayanımları açısından kullanılması gereken regresyon modeli şu formülle (4.3) ifade edilmektedir. O=OL 6/16 , Z=ZP 305 , R=RC 65/60 olmak üzere;

$$f_{split} = +4.73897 \times O + 4.67230 \times Z + 5.24373 \times R \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} X1 &= OL \ 6/16 \ 6/16 \\ X2 &= ZP \ 305 \ 305 \\ X3 &= RC \ 65/60 \end{aligned}$$

**Şekil 4.7.** Yarmada çekme dayanımlarının lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi



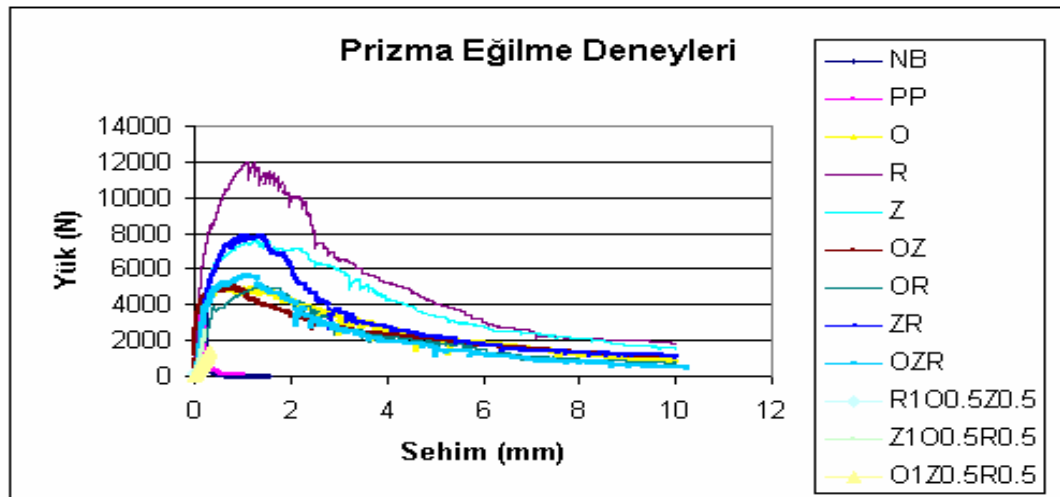
### 4.3. Rilem Kırılma Enerjisi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Betonlara çelik lif eklenmesi genel olarak basınç dayanımı ve elastisite modülünü az miktarda artırmasına karşın yarmada çekme, eğilmede çekme ve tek eksenli çekme değerlerini önemli miktarlarda artırmaktadır. Yarı gevrek bir davranış gösteren betona çelik lif ilave edilmesiyle çekme gerilmeleri karşılanmaktadır. Çelik lif takviyesi ile yüksek dayanımlı kompozitlerde en önemli sorun olan gevrek davranış ortadan kalkmakta, böylece malzeme daha sünek bir davranış göstererek ani göçme ihtimali çok azalmaktadır.

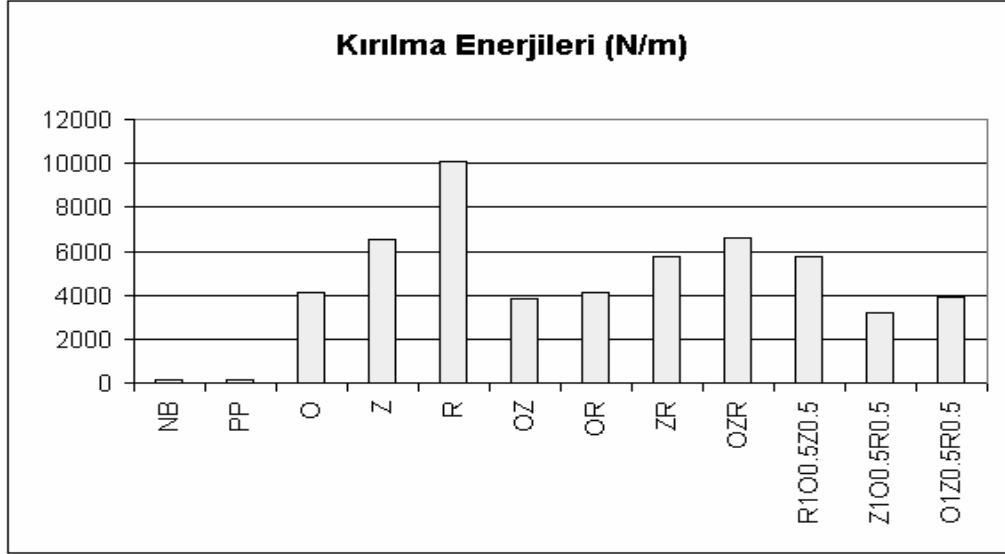
#### 4.3.1. Kırılma Enerjilerinin Değerlendirilmesi

Numunelerin kırılması sırasında harcanan enerji, dolayısıyla sünekliği ifade eden kırılma enerjisi değerleri yük-sehim eğrilerinin altında kalan alana bağlıdır. Çelik lif ilave edilmesi ile bu alan dolayısıyla kırılma enerjileri çok artar. Çelik lif içermeyen NB ve PP numunesi gevrek davranış gösterdiğinden yük-sehim eğrileri tepe noktasına kadar elde edilebildi.

Her bir karışımdan üretilen üç numunenin deney sonuçlarının ortalamasına en yakın olan birer numunenin yük sehim eğrileri Şekil 4.8'de, kırılma enerjilerinin ortalama değerleri Şekil 4.9'da görülmektedir. Çelik lif içermeyen NB karışımında kırılma enerjisi 108 N/m iken en yüksek olarak R karışımında 100 kata varan, artış ile 10113 N/m, en düşük olarak da Z100.5R0.5 karışımında 26 kata varan artış ile 3173 N/m değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 4.8. 3 noktadan yüklemeli eğilme deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrileri

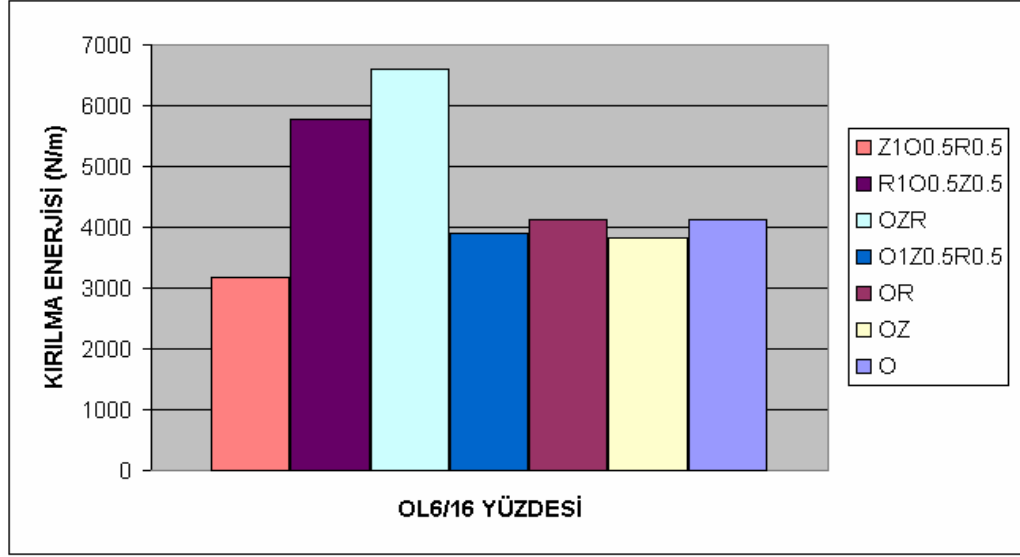


**Şekil 4.9.** Kırılma enerjisi ortalama değerleri

Bu sonuçlara göre kırılma enerjisindeki artışın en fazla 60 mm.'lik makro lifin kullanıldığı numunelerde meydana geldiği, 30 mm.'lik makro lifin ikinci derecede etkili olduğu, 6 mm.'lik mezo lifin eklenmesinin ise kırılma enerjisini diğer liflerin eklenmesine göre en az artırdığı görülmektedir. Uzun lifler kısa çatlakları olduğu kadar uzun çatlakları da önleyebildiklerinden lif boylarının artmasıyla kırılma enerjilerinde artışlar elde edilmektedir. Çatlaklar ilerleyip daha büyük boyutlara ulaştığında dahi uzun lifler çatlaklar arasında köprü vazifesini devam ettirebilir. Buna karşın kısa lifler çatlak boyutları büyüdüğü zaman boyları kısa olduğundan bu görevlerini yerine getiremezler ve sıyrılmaya başlarlar. Bu da kırılma enerjisinin daha düşük elde edilmesine neden olur.

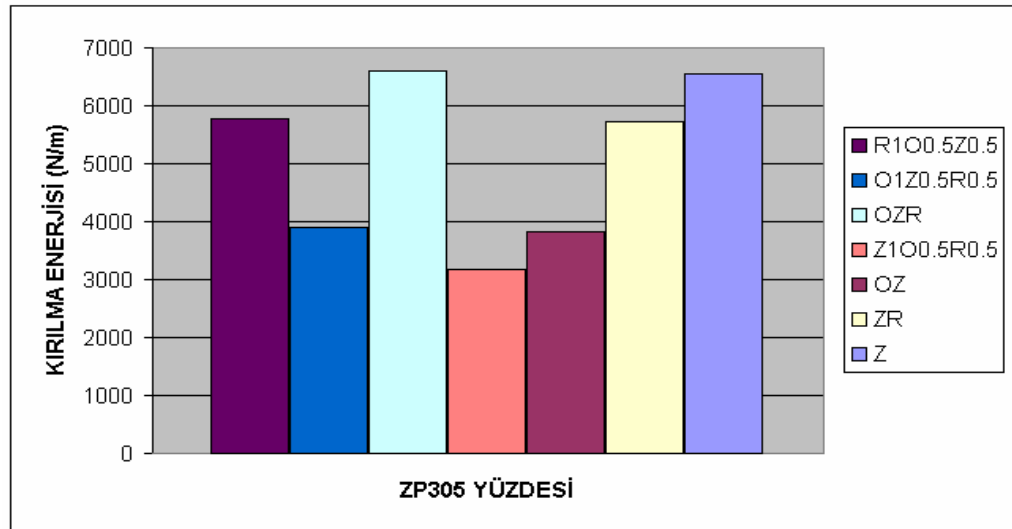
Genellikle uygulamalarda % 1'in altında lif kullanılan numunelerde kısa lifler uzun liflere göre daha yüksek ilk çatlak dayanımına sahiptirler. Aynı hacimsel yüzde kullanılan lifler arasında boyutu küçük olanın daha fazla oranda olması ile kompozitlerin içlerinde nerede oluşacağı bilinmeyen ilk çatlaklara karşı bu liflerin hemen devreye girmesi olasılığı daha yüksek olur. Bu yüzden kısa liflerin kullanıldığı betonların ilk çatlak dayanımları uzun lifli betonlardan genelde daha yüksek çıkarken ilk çatlak dayanımlarından sonraki artış liflerin sıyrılmaya başlamasından dolayı pek yüksek olmamaktadır.

Kullanılan liflerin birbiriyle etkileşimleri kırılma enerjileri ve lif yüzdelere göre çizilen grafikler Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de görülmektedir.



Şekil 4.10. OL 6/16 liflerini içeren numunelerin diğer lif tipleriyle kullanımı.

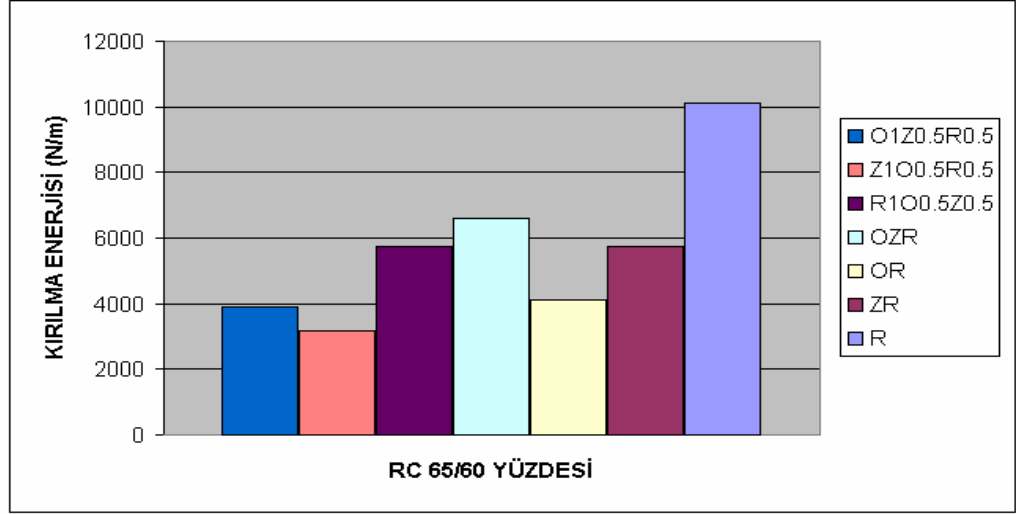
Şekil 4.10'da sol baştan başlayarak Z1O0.5R0.5, R1O0.5Z0.5, OZR, O1Z0.5R0.5, OZ, OR ve O numunelerinin kırılma enerjisi değerleri görülmektedir. Bu değerlerden görüldüğü gibi 6 mm. uzunluğundaki OL 6/16'nın karışım içindeki yüzdesinin artmasıyla kırılma enerjisinde düşüş meydana gelmektedir. OL 6/16 içeren karışımlar arasında en yüksek kırılma enerjisi her 3 tip çelik lifden kullanılan OZR karışımından elde edilmiştir.



Şekil 4.11. ZP305liflerini içeren numunelerin diğer lif tipleriyle kullanımı.



Şekil 4.11’de sol baştan başlayarak R1O0.5Z0.5, O1Z0.5R0.5, OZR, Z1O0.5R0.5, OZ, ZR ve R numunelerinin kırılma enerjisi değerleri görülmektedir. En yüksek kırılma enerjisi RC65/60 çelik tel lifden % 2 oranında kullanılan, R karımından elde edilmiştir. İkinci yüksek kırılma enerjisi ise OZR karışımından elde edilmiştir.



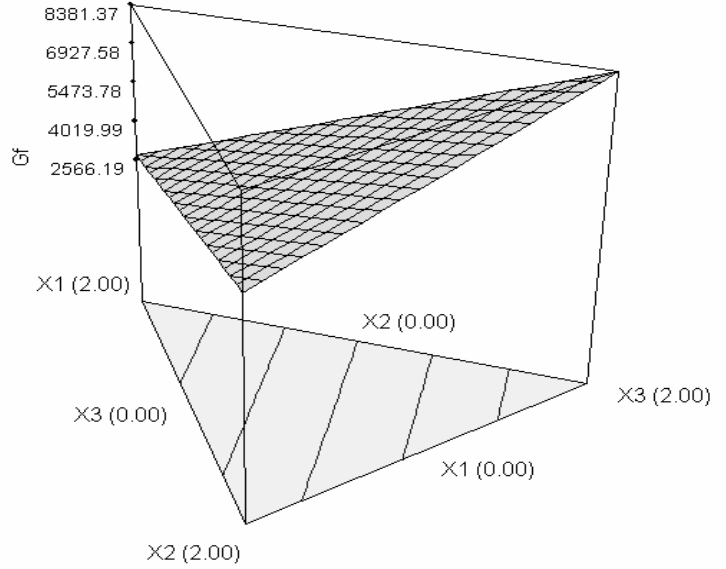
Şekil 4.12.: RC 65/60 liflerini içeren numunelerin diğer lif tipleriyle kullanımı.

Şekil 4.12’de sol baştan başlayarak O1Z0.5R0.5, Z1O0.5R0.5, OZR, OR, OR, ZR ve R numunelerinin kırılma enerjisi değerleri görülmektedir. Bu değerlerden görüldüğü gibi 60 mm. uzunluğundaki RC 65/60’ın karışım içindeki yüzdesinin artmasıyla kırılma enerjisinde artma olmaktadır. En yüksek kırılma enerjisi de 60 mm.’lik lifin tek başına kullanıldığı R’den elde edilmiştir. Uzun lif içeriğinin artması kırılma enerjisinde artışa neden olmaktadır.

Design Expert Version 6.0.7 programı ile değişkenlerin analizi (Anova) yöntemi kullanılarak çizilen Şekil 4.13’den de kırılma enerjisinin karma lif yüzdelerinin değişmesiyle değişimi görülmektedir. Bu şekildeki üçgende, herbir beton karışımının hangi noktaya denk geldiği Şekil 4.3’de verildiği gibidir. Üçgenin 3 köşesi tek tip çelik lif kullanılan karışımları temsil etmektedir. Liflerin uzunlukları arttıkça kırılma enerjileri de artmaktadır. Üçgenin kenarları ise 2 farklı tipte çelik lif kullanılan karışımları göstermektedir. Burada da boyu uzun olan liflerin karışımında kullanılan yüzdelerinin artmasıyla kırılma enerjilerinin de doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Üçgenin açıortaylarının kesim noktası ise 3 farklı tipte çelik lif kullanılan beton karışımına karşı gelmektedir ve hazırlanan tüm karışımlar içinde

sadece 60 mm.'lik çelik liflerin kullanıldığı R karışımından sonraki en yüksek değere sahiptir.

X1 = OL  
X2 = ZP 305  
X3 = RC 65/60



**Şekil 4.13.** Kırılma enerjisinin lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi.

Bu programa göre toplam % 2 çelik lif kullanıldığında kırılma enerjileri açısından kullanılması gereken regresyon modeli şu formülle (4.4) ifade edilmektedir. O=OL6/16, Z=ZP305, R=RC 65/60 olmak üzere;

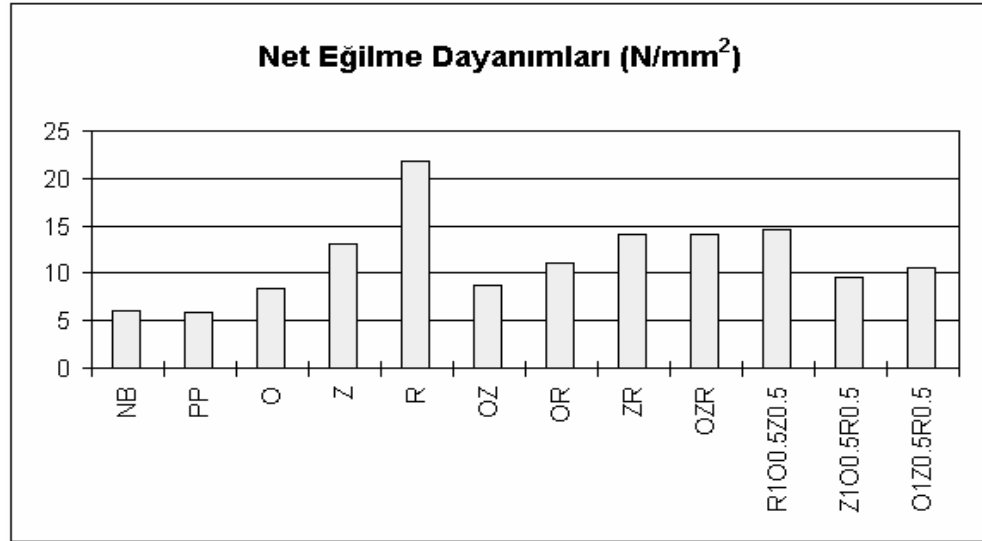
$$Gf = +1366.21111 \times O + 2428.40159 \times Z + 4190.68730 \times R \quad (4.4)$$

#### 4.3.2. Net Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Çelik lif takviyeli betonlar için en önemli özellik eğilme etkisinde gösterdikleri yüksek dayanımdır. Çoğu uygulamalarda beton çeşitli eğilme yüklerine maruz kalır. Lif katılması ile normal betonun eğilme direnci artırılır. Liflerle daha iyi bağ yapan betonlarda eğilme direncinde artış yüksek olur. Her zaman için eğilme dayanımındaki artış, basınç ve yarmada çekme dayanımından daha fazladır. Lif miktarı ve narinliği bu artışta önemli rol oynar. Uzun lifler numune boyunca daha iyi yönlendirilerek daha fazla dayanım artışına neden olurlar. Belli lif tipinde daha yüksek narinlik oranına sahip olan lif, dayanımı daha çok artırır.

Çelik lif içermeyen NB karışımında net eğilme dayanımı  $5,9 \text{ N/mm}^2$  iken en yüksek olarak R karışımında 3,7 kata varan, artış ile  $21,8 \text{ N/mm}^2$  en düşük olarak da O karışımında 1,42 kata varan artış ile  $8,4 \text{ N/mm}^2$  değerlerine ulaşmıştır.

Her bir karışım için deney yapılan üç numunenin ortalamasından bulunan net eğilme dayanımları Ek D’de, ortalamalarında elde edilen grafik Şekil 4.14’de görülmektedir. Bu sonuçlara göre benzer şekilde lif boyunun artması ile eğilme dayanımlarının da arttığı karma lifli numunelerde ise 6 mm.’lik mezo lifin miktarının artırılmasının net eğilme dayanımlarını olumsuz etkilediği görülmektedir. R numunesinin oransal olarak en yüksek olduğu R deney grubunun en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca 2’si makro 1’i mezo olmak üzere 3 tip çelik lifin birlikte kullanıldığı R100.5Z0.5 numunesinin kırılma enerjisinde olduğu gibi en yüksek 2. değeri vermesi dikkat çekicidir.



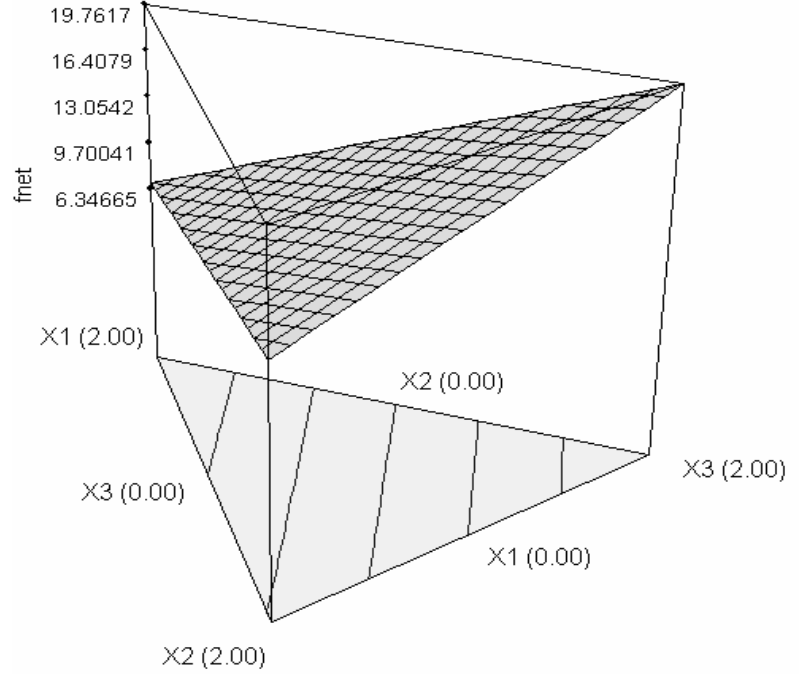
Şekil 4.14. Net eğilme dayanımları ortalama değerleri.

Design Expert Version 6.0.7 programı yardımıyla çizilen Şekil 4.15’de net eğilme dayanımlarının karma lif yüzdelerine göre değişimi görülmektedir.

Bu programa göre toplam % 2 çelik lif kullanıldığında eğilme dayanımları açısından kullanılması gereken regresyon modeli şu formülle (4.5) ifade edilmektedir.  $O=OL6/16$ ,  $Z=ZP305$ ,  $R=RC65/60$  olmak üzere;

$$f_{net} = +3.38656 \times O + 5.61609 \times Z + 9.88085 \times R \quad (4.5)$$

X1 =OL 6/16  
X2 =ZP 305  
X3 =RC 65/60

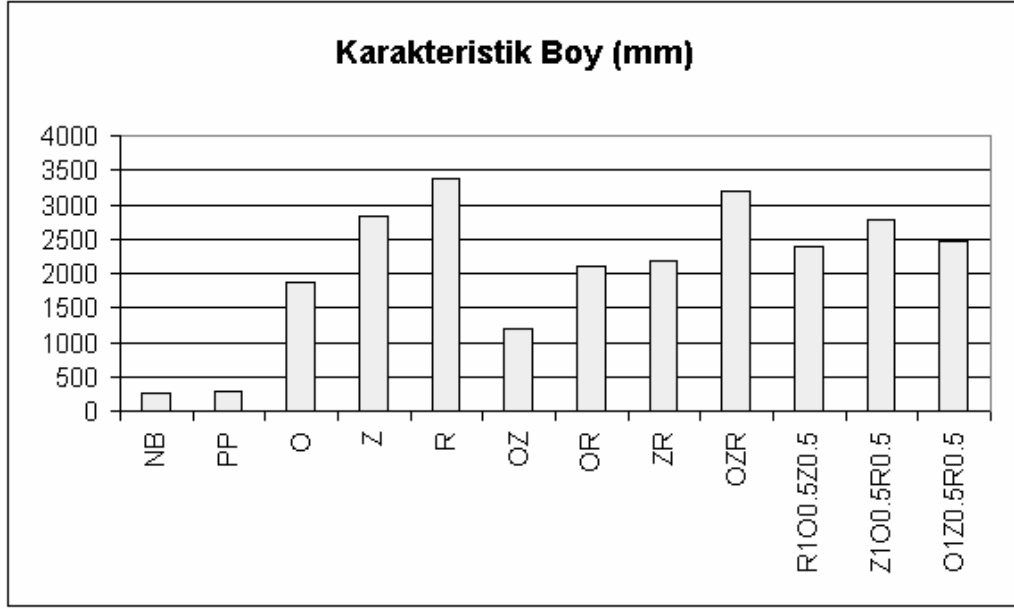


Şekil 4.15. Net eğilme dayanımlarının lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi

#### 4.4. Elde Edilen Karakteristik Boyların Değerlendirilmesi

Çelik lif içermeyen NB karışımında karakteristik boy 100 mm iken en yüksek olarak R karışımında 33, 6 kata varan artış ile 3369 mm, en düşük olarak da O karışımında 18,5 kata varan artış ile 1858 mm değerlerine ulaşmıştır. Elde edilen karakteristik boylar Ek-E'de, ortalamalarından elde edilen grafik Şekil 4.16'da görülmektedir.

Betonda  $l_{ch}$  azaldıkça malzemenin daha gevrek bir davranış sergilediği bilinmektedir [32]. Buna göre en sünek betonlar tek tip makro lifin kullanılan R ve OZR serisi betonları iken en gevrek lifli betonlar OZ serisi betonlarıdır. Yani, karışımda kullanılan kısa ve narinliği düşük liflerin miktarının artmasıyla gevreklik artmakta, uzun ve narinliği büyük liflerin artmasıyla ise malzeme daha sünek bir hale gelmektedir.

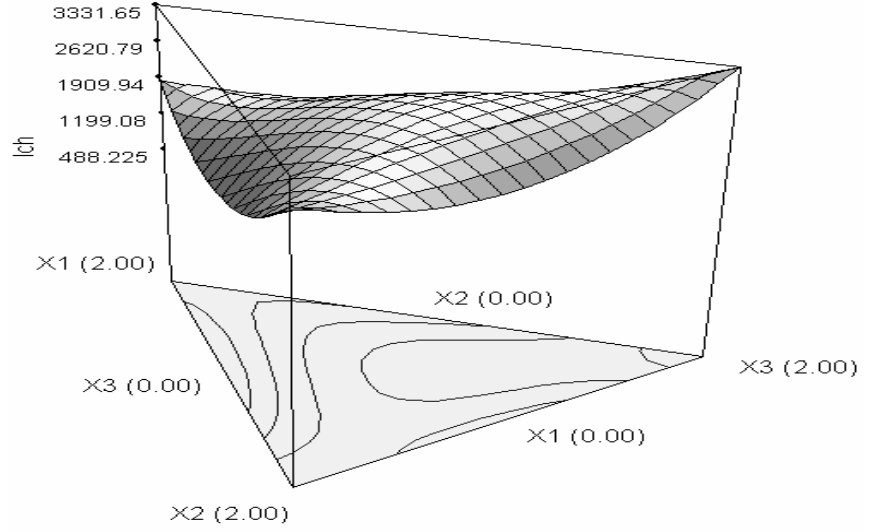


**Şekil 4.16.** Karakteristik boy değerleri.

Taşdemir [32], çelik lif içeren betonların karakteristik boylarının 5000-20000 arasında değişeceğini belirtmiştir. Aynı çalışmada silis dumanı eklenmesinin gevrekliği artırmasından dolayı karakteristik boyda belirgin bir düşüşe neden olacağı belirtilmektedir. Bu çalışmada üretilen bütün beton karışımlarında silis dumanı kullanıldığından karakteristik boylar literatürde belirtilen değerlerden düşük çıkmıştır.

Design Expert Version 6.0.7 programı yardımıyla çizilen Şekil 4.17’de  $l_{ch}$  değerlerinin karma lif yüzdelerine göre değişimi görülmektedir. Bu şekildeki üçgende, her bir beton karışımının hangi noktaya denk geldiği daha önceden Şekil 4.3’de verilmişti.

X1 =OL 6/16  
X2 =ZP 305  
X3 =RC 65/60



Şekil 4.17. Karakteristik boyların lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi.

Bu programa göre toplam % 2 çelik lif kullanıldığında karakteristik boyları açısından kullanılması gereken regresyon modeli şu formülle (4.6) ifade edilmektedir. O=OL6/16, Z=ZP305, R=RC65/60 olmak üzere;

$$\begin{aligned} \text{İç} = &+ 940.40438 \times O + 1416.18699 \times Z + 1665.82467 \times R - 1126.22588 \times O \times Z \\ &- 526.31283 \times O \times R - 975.96501 \times Z \times R + 4046.89405 \times O \times Z \times R \quad (4.6) \end{aligned}$$

Design Expert Version 6.0.7 programında Değişkenlerin Analizi (Anova) yöntemi kullanılarak çalışan bu program yardımıyla oluşturulan regresyon modellerinde bulunan (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) ve (4.6) formüllerine göre lif oranlarına göre beton özellikleri Tablo 4.1’de mevcuttur.

#### 4.5. Lif Maliyetlerinin Değerlendirilmesi

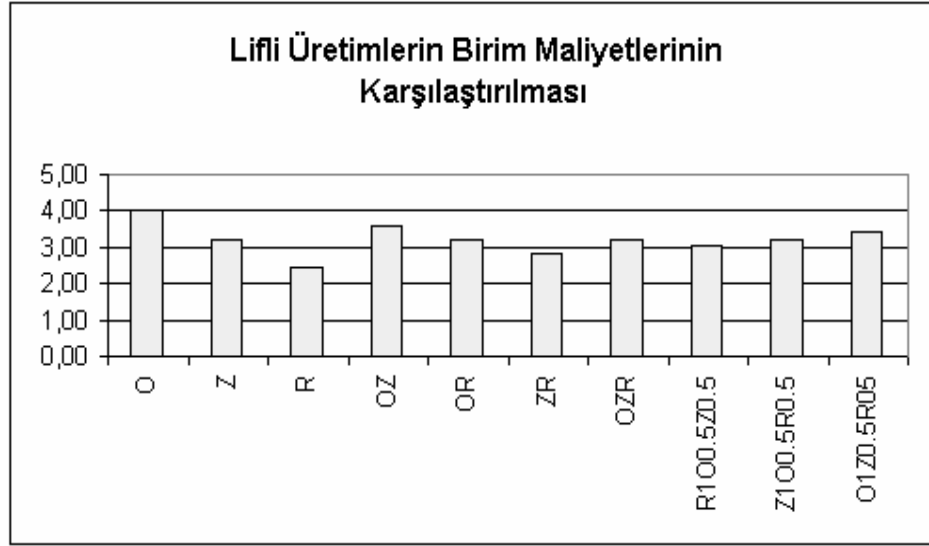
Üretici firma tarafından alınan birim fiyatlara göre

OL 6/16 birim fiyatı 2

ZP 305 birim fiyatı 1,6

RC 65 / 60 birim fiyatı 1,22

Karışım oranlarına göre deney numunelerinin maliyetlerinin karşılaştırılması Şekil 4.18’de verilmiştir.

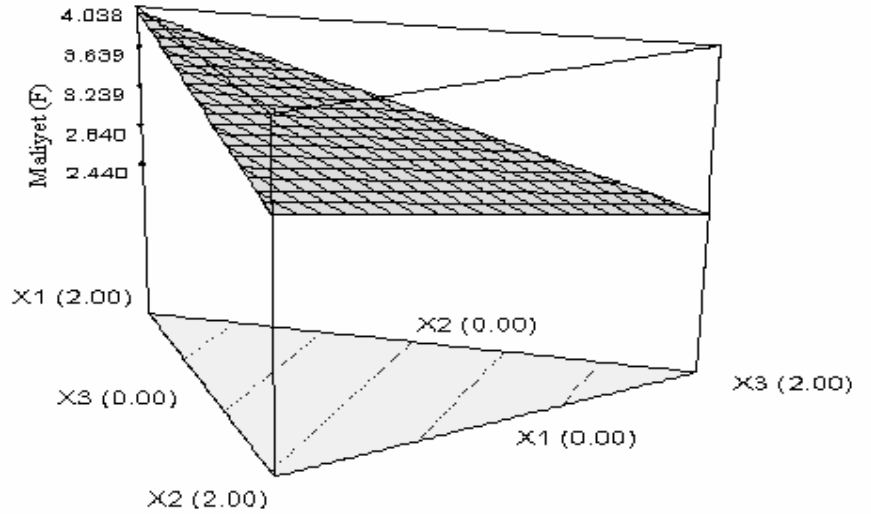


Şekil 4.18. Lifli Üretimlerin Birim Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Design Expert Version 6.0.7 programı yardımıyla çizilen Şekil 4.19'da Birim lif maliyet değerleri karma lif karışımlarına göre değişimi görülmektedir. Bu programa göre lifli üretimlerin birim maliyetleri açısından kullanılması gereken regresyon modeli şu formülle (4.7) ifade edilmektedir.  $O=OL6/16$ ,  $Z=ZP305$ ,  $R=RC65/60$  olmak üzere;

$$\text{Birim Maliyet} = +2.00 \times O + 1.60 \times Z + 1.22 \times R \quad (4.7)$$

X1 =OL 6/16  
X2 =ZP 305  
X3 =RC 65/60



Şekil 4.19. Birim lif maliyetlerinin lif tipine ve miktarına bağlı olarak değişimi.

**Tablo 4.1.:** Regresyon Modeline göre beton özellikleri

Numune Kodları	O	Z	R	OZ	OR	ZR	OZR	R1O0.5Z0.5	Z1O05R0.5	O1Z05R0.5
Basınç Dayanımı- $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	115,5	76,3	102,8	83,4	111,3	109,0	86,7	93,9	83,6	89,1
Elastisite modülü-E (kN/mm <sup>2</sup> )	44,9	38,8	43,9	41,8	44,4	41,3	42,5	42,9	41,6	43,1
Yarmada Çekme Dayanımı- $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	9,4	9,3	10,4	9,4	9,9	9,9	9,7	9,9	9,6	9,7
Net Eğilme Dayanımı- $f_{fnet}$ (N/mm <sup>2</sup> )	6,7	11,2	19,7	9,0	13,2	15,5	12,5	14,3	12,2	14,1
Kırılma Enerjisi- $G_F$ (N/m)	2732	5056	8381	3894	5556	6719	5390	6137	5306	4725
Karakteristik Boy- $l_{ch}$ (mm)	1880	2832	3331	1230	2079	2106	2712	2823	2548	2422
Lif Maliyeti-F (Birim Fiyat)	4,0	3,2	2,4	3,6	3,2	2,8	3,2	3,0	3,2	3,4



#### 4.6. Deney Sonuçlarına Göre Yapılan Optimasyon

Design Expert Version 6.0.7 programı yardımıyla bu çalışmada üretilen betonlar için yapılan optimasyon Tablo 4.2. de gösterilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirilirken toplam 10 deney sonucundan elde edilmiş sonuçlar olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

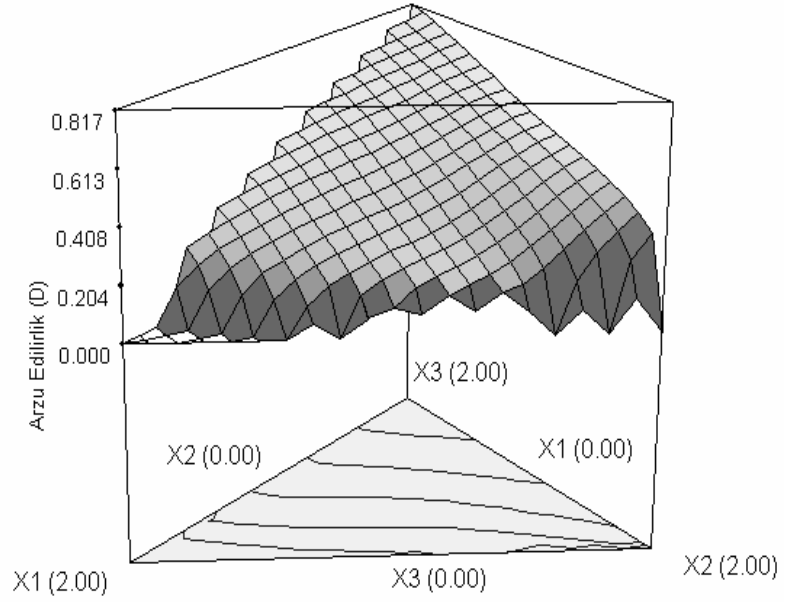
**Tablo 4.2.** :Çok amaçlı optimizasyon ile elde edilen optimum çözüm.

	<b>Amaç</b>	<b>Optimum</b>
Basınç dayanımı ( $f_c$ ), MPa	Maksimum	102,85
Yarma çekme dayanımı ( $f_t$ ), MPa	Maksimum	10,48
Net eğilme dayanımı ( $f_{net}$ ), MPa	Maksimum	19,76
Kırılma enerjisi ( $G_F$ ), N/m	Maksimum	8381,37
Karakteristik boy ( $l_{ch}$ ), mm	Maksimum	3331,65
Maliyet Birim Fiyat (F)	Minimum	2,440
Kompozit arzu edilirlilik (D)		0,817

<b>Programın Önerdiği Çelik Lif Yüzdeleri (%)</b>		
<b>OL 6/16</b>	<b>ZP305</b>	<b>RC 65/60</b>
0,0	0,00	2,00

Design Expert Version 6.0.7 programı yardımıyla çizilen Şekil 4.20'de F'i minimum,  $f_c$ ,  $f_{st}$ ,  $l_{ch}$ ,  $G_F$  ve  $f_{net}$ 'in maksimum, halinde kompozit arzu edilirlilik (D)'nin lif tiplerine göre değişimi görülmektedir.

X1 =OL 6/16  
X2 =ZP 305  
X3 =RC 65/60



**Sekil 4.20.**  $F_i$  minimum,  $f_c$ ,  $f_{st}$ ,  $l_{ch}$ ,  $G_F$  ve  $f_{net}$ 'in maksimum, halinde kompozit arzu edilirlilik (D)'nin lif tiplerine göre değişimini gösteren yüzey

Şekil 4.20 de görüldüğü gibi; basınç, yarma-çekme ve net eğilme dayanımları ile kırılma enerjisi ve sünekliğin bir göstergesi olan karakteristik boyun maksimum ve maliyetin minimum yapılması esasına dayanan optimizasyonda arzu edilirlilik fonksiyonunun maksimum değeri, yani optimum çözüm, narınlığı 65 olan R karışımından elde edilmektedir.

## 5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen deneysel değerlere ve yapılan optimizasyona göre varılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Betona hacmen % 2 oranında çelik lif eklenmesiyle kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı başta olmak üzere basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada çekme dayanımlarında artışlar sağlamaktadır. Bu artışlar, karışımda kullanılan lif tiplerine ve yüzdelere göre değişik oranlarda olmuştur.

- Kompozitlerin basınç dayanımlarında çelik lif içermeyen normal betona göre en fazla % 40 artış olurken, bazı karışımlarda ise önemli değişiklik kaydedilmemiştir. Elastisite modülü değerlerinde de önemli değişiklik olmamıştır. Buna karşılık çekme dayanımlarında %69'a kadar artış, kırılma enerjilerinde yaklaşık 100 kata varan, net eğilme dayanımlarında ise 3,6 kata varan artış kaydedilmiştir. Sünekliğin bir ölçüsü olan karakteristik boyda ise 34 kata varan artışlar elde edilmiştir.

- Çelik lif içermeyen normal beton ve sadece polipropilen lif içeren beton, gevrek bir şekilde kırılırken diğer numuneler yüksek miktarda enerji yutarak, kontrollü bir şekilde ve uzun sürede kırılmıştır. Böylece yüksek performanslı betonlarda önemli bir sorun olan gevrek davranış ortadan kalkmış ve malzeme sünek bir davranış sergilemiştir.

- Kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı makro lif içeriğindeki artış ile artmakta, mezo lif içeriğindeki artış ile azalmaktadır. En yüksek kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı, narinliği ve boyu en büyük lif ile üretilen karışımda elde edilmiştir. Kırılma enerjisinde en düşük değerler ise narinliği ve boyu en küçük lifi yüksek oranda içeren, (% 2) numunelerden elde edilmiştir.

- Betona çelik lif eklenmesiyle basınç dayanımında az miktarda artış veya azalmalar kaydedilmiştir. Artışlar en fazla mezo lifin kullanıldığı karışımda olmuş, orta narinlikte lif kullanılmasının ise basınç dayanımında düşüşe neden olmuştur.

- Yarmada çekme dayanımlarının en yüksek, mezo ve makro lifleri birlikte içeren numunelerden elde edilmiştir.
- Farklı boyut ve narinliğe sahip olan çelik lifler betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde değişik oranlarda katkıda bulunmaktadır. Kullanılan lif tipine bağlı olarak beton özelliklerindeki değişikliklerin saptanması ile karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışlarını daha iyi anlaşılması mümkün olabilecektir.
- Dayanımların, kırılma enerjisinin ve sünekliğin maksimum, fiyatın ise minimum olma ilkesine dayanan bir optimizasyonda en uygun çözümün; narinliği 65 olan kancalı uçlu çelik tel ile üretilen betonlardan elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Karilhaloo,B.L.**, 1995. Fracture Mechanics and Structural Concrete , Longman Group Ltd.,Essex England
- [2] **Akman,M.S.**, 2001. Yüksek Performanslı Betonların Teknolojisi Özellikleri,Sorunları,Geleceği,Türkiye İnşaat Mühendisliği XVI. Teknik Kongre ve Sergisi, ODTÜ Kültür Merkezi, Ankara, 1-3 Kasım.
- [3] **Rossi Pierre**, 2000. Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRFC):An overview, *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes*, Lyon, France, September 13-15.
- [4] **Tasdemir, C.**, 1995. Agrega-Çimento hamuru arayüzeyi mikroyapısının yüksek mukavemetli betonların kırılma parametrelerine etkisi, *Doktora tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [5] **Türker, S., Balanlı, A.**, 1992. Yapı Malzemeleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [6] **Chawla, K.K.**, 1998. Fibrous Materials, Cambridge University Press, United Kingdom.
- [7] **Shah, S.P. and Balaguru, P.N.**, 1992. Fiber-Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill Inc., Singapore..
- [8] **Shah, B.**, 1995. Fiber-Reinforced Composites, American Concrete İnstitute, Detroit U.S.A.
- [9] **Chawla, K.K.**, 1998. Fibrous Materials, Cambridge University Press, United Kingdom.
- [10] **Bartos, P.**, 1992. Fresh Concrete-Properties and Tests, Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam
- [11] **ASTM A 820**, 1996. Standart Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, *The American Society for Testing and Materials*, USA.
- [12] **Özyurt, N.**, 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **TS 10513**, 1992. Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [14] **Vural, T.**, 1998. Fiberli Betonun Basınç Dayanımına Etkisi, *Bitirme Ödevi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [15] **ASTM C 1116**, 1997. Standart Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete, *The American Society for Testing and Materials*, USA..

- [16] **Arslan, A.**, 1999. Lifli betonların darbe etkisi altında genel özellikleri, *Beksa Sempozyum Notları*, Sabancı Center.
- [17] <http://www.nrc.ca/irc/cbd/cbd223e.html>
- [18] **DSİ.**, 1994. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton, Devlet Su İşleri , Ankara.
- [19] **Zollo, R.F.**, 1997. Fibre-reinforced Concrete: an Overview after 30 years of Development, *Cement and Concrete Composites*, **19**, pp. 107-122.
- [20] **Köksal F.**, 2004. Çelik Tel Donatılı betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı
- [21] **Ersoy, H.Y.**, 2001. Kompozit malzeme, Literatür yayınları:66, İstanbul, Türkiye.
- [22] <http://www.beksa.com.tr/celiktel1.pdf>
- [23] **Padmarajaiah, S.K., Ramaswamy, A.**, 2002. A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement, *Cement and Concrete Composites*, **24**, pp. 229-241.
- [24] **Chunxiang, Q., Patnaikuni, I.**, 1999. Properties of high strength steel fiber reinforced concrete beams in bending, *Cement and Concrete Composites*, **21**, pp. 73-81.
- [25] **Li, Z., Li, F., Chang, T.Y.P. and Mai, Y.W.**, 1998. Uniaxial tensile behaviour of concrete reinforced with randomly distributed short fibers, *ACI Materials Journal*, **95-M54**, September-October 1998, 564-574.
- [26] **Pierre, P., Pleau, R. and Pigeon, M.**, 1999. Mechanical properties of steel microfiber reinforced cement pastes and mortars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, November 1999, pp. 317-324.
- [27] **Alkan G.**, 2004. Polipropilen Lifli Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi , Yüksek Lisans Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [28] **Ekinciöglü Ö.**, 2003. Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı-Bir Optimum Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [29] **Ulm, F.-J.**, Fire in Transport Tunnel/Research on Rapidly Heated Concrete, <http://cist.mit.edu/projects/fire.htm>.
- [30] **Acun, S.**, 2000. Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul..
- [31] **Walraven J.**, 1999. The Evolution of Concrete, *Structural Concrete*, **P1. No. 1, March**, pp.3-11.

[32] **RILEM 50 FMC**, 1985. Determination of The Fracture Energy of Mortar and Concrete By Means of Three-Point Bend Tests On Notched Beams, RILEM Draft Recommendation, *Mater. Struct.*, **18(106)** . pp 285-290.

**EKLER:** Fotoğraflar

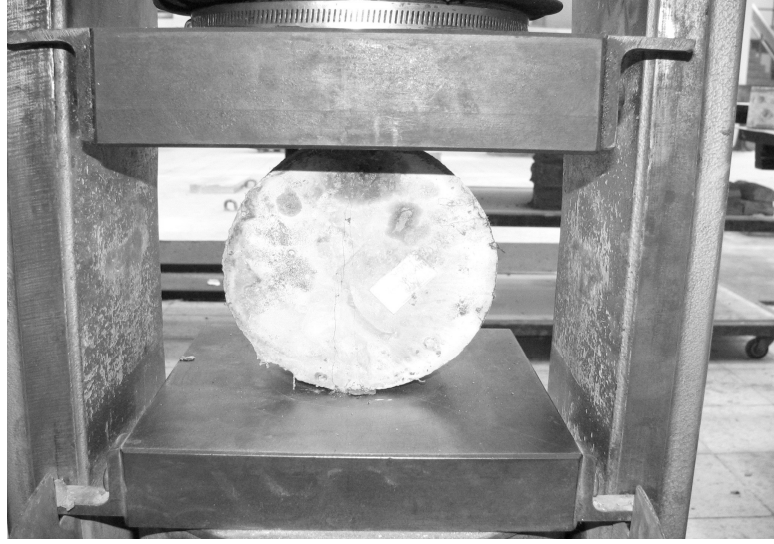


**Şekil Ek. 1.:**Taze betonda çökme deneyi



**Şekil Ek. 2.:** Silindir basınç deneyi düzeneği

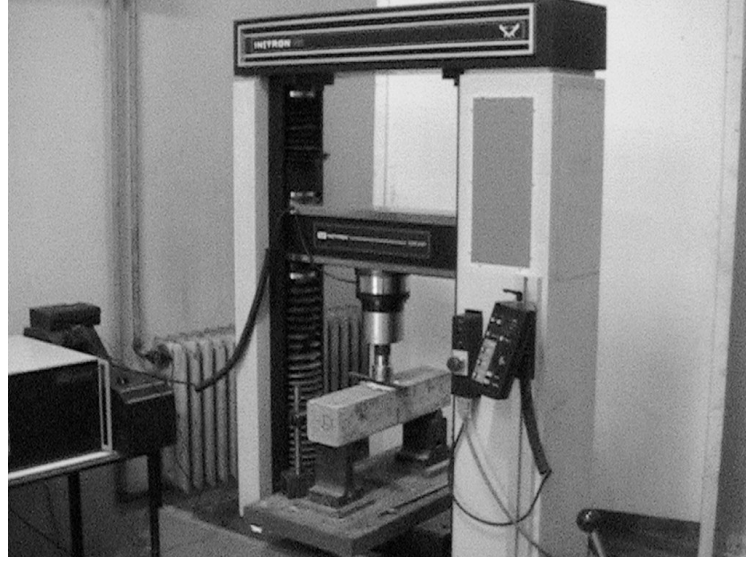




**Şekil Ek. 3.:** Yarmada çekme deneyi düzeneği



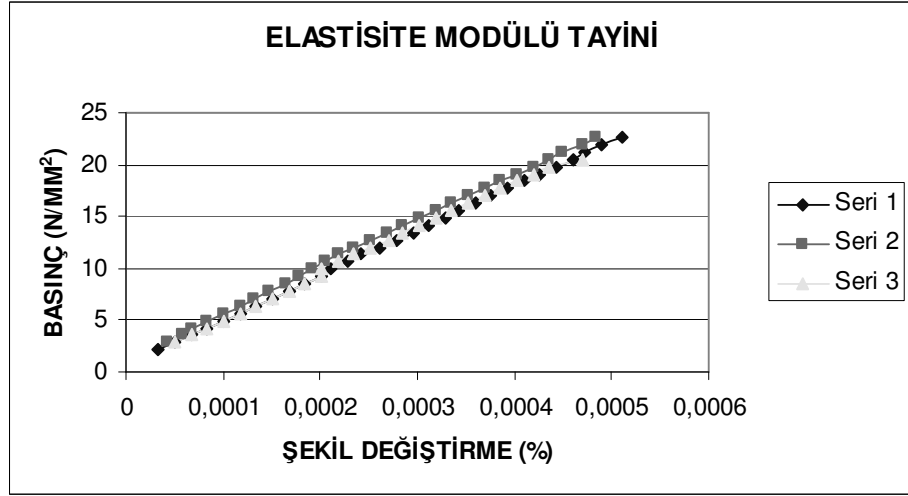
**Şekil Ek.4.:** Yarmada çekme deneyi sonucunda disk numunedeki lif dağılımı



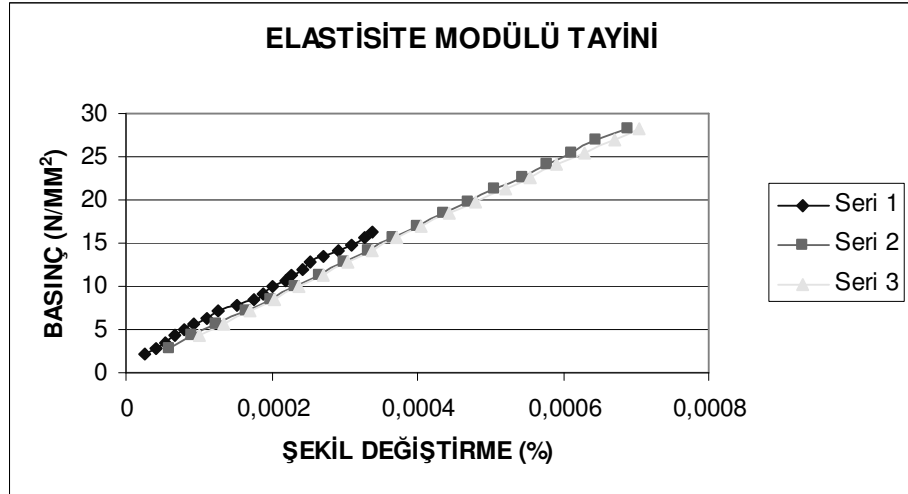
**Şekil Ek.5:** 3 noktadan yüklemeli eğilme deneyi düzeneği

## EKLER

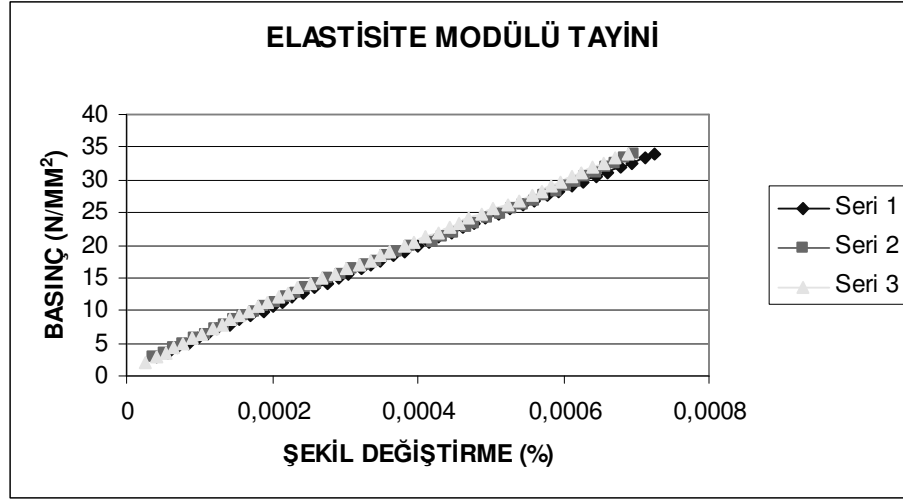
**EK A:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



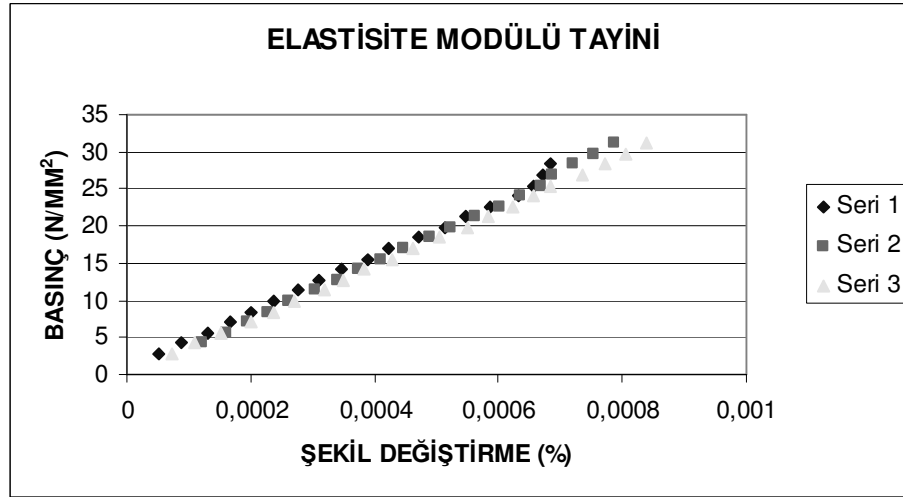
**Şekil A. 1.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen NB numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



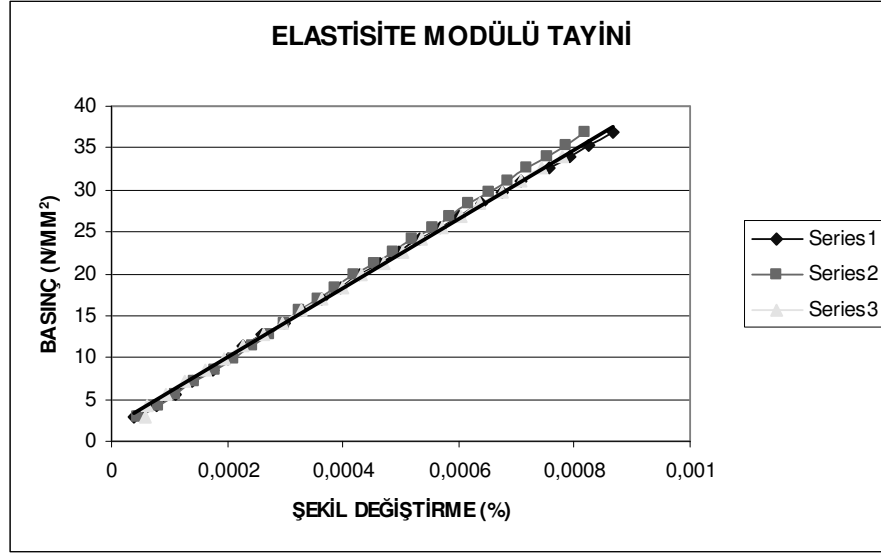
**Şekil A. 2.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen PP numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



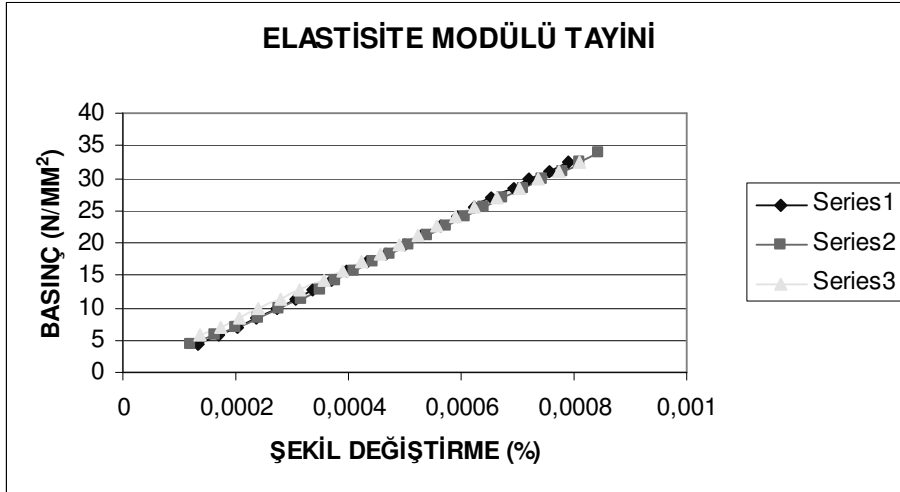
Şekil A. 3.: Silindir basınç deneylerinden elde edilen O numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



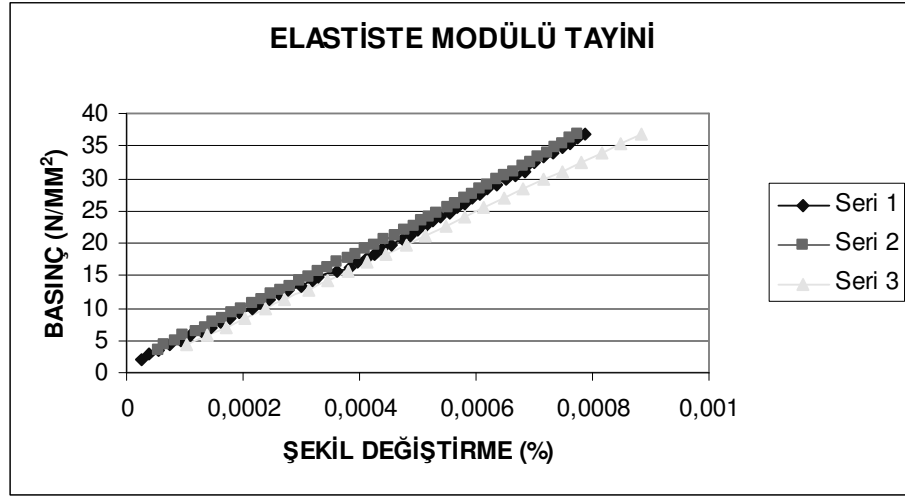
Şekil A. 4.: Silindir basınç deneylerinden elde edilen Z numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



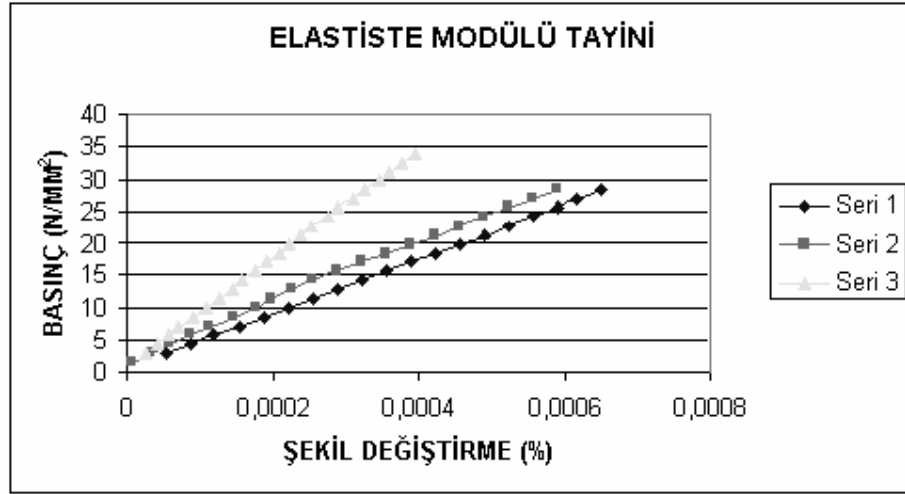
**Şekil A. 5.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen R numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



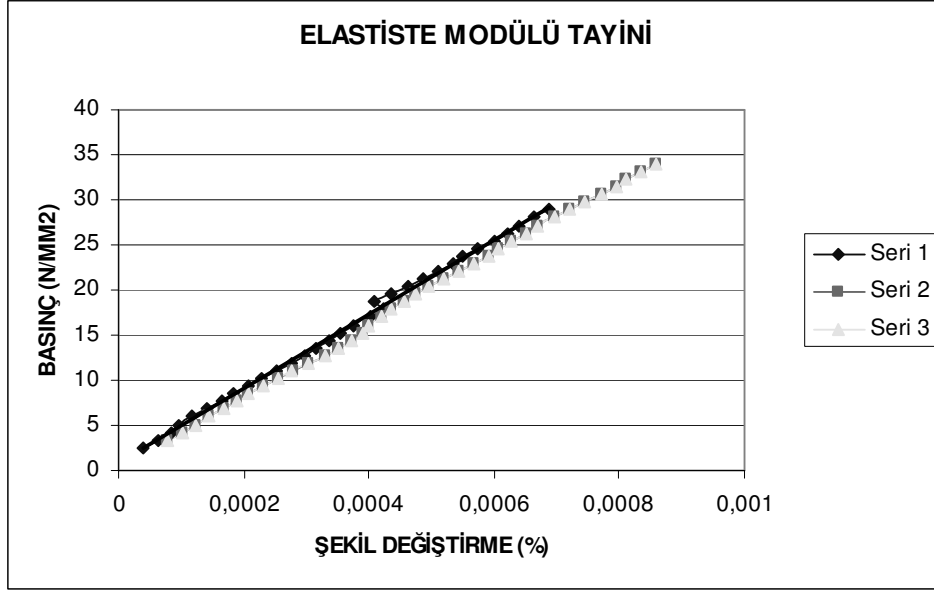
**Şekil A. 6.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen OZ numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



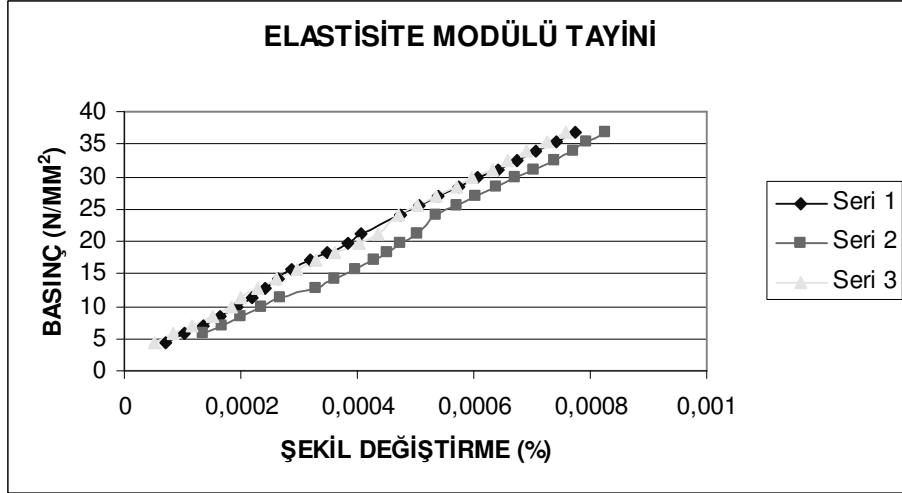
**Şekil A. 7.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen OR numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



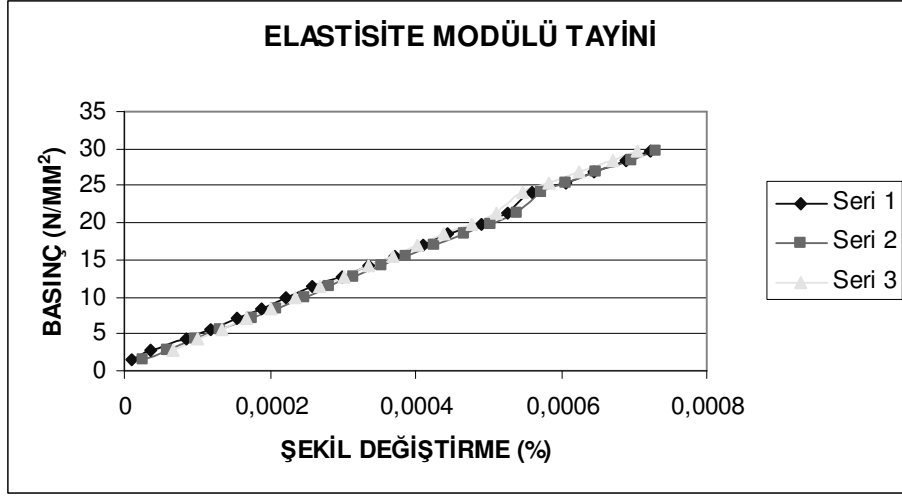
**Şekil A. 8.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen ZR numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



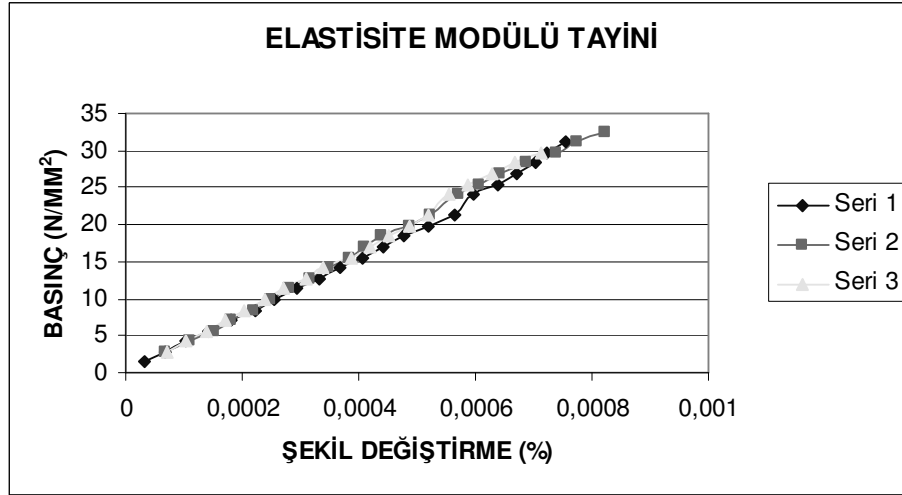
**Şekil A. 9.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen OZR numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



**Şekil A. 10.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen R100.5Z0.5 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



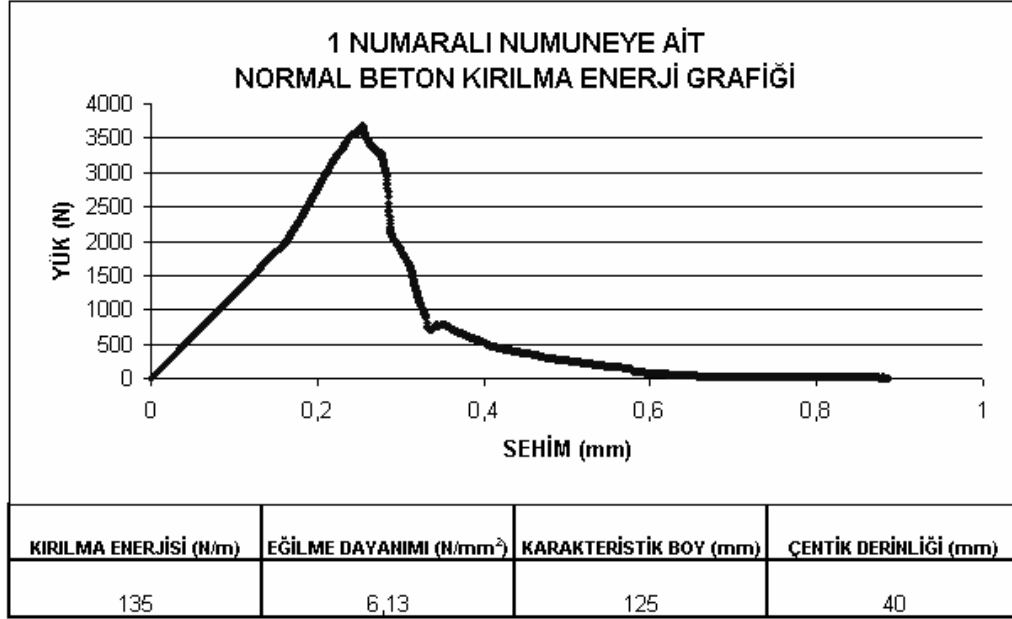
**Şekil A. 11.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen Z1O0.5R0.5 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



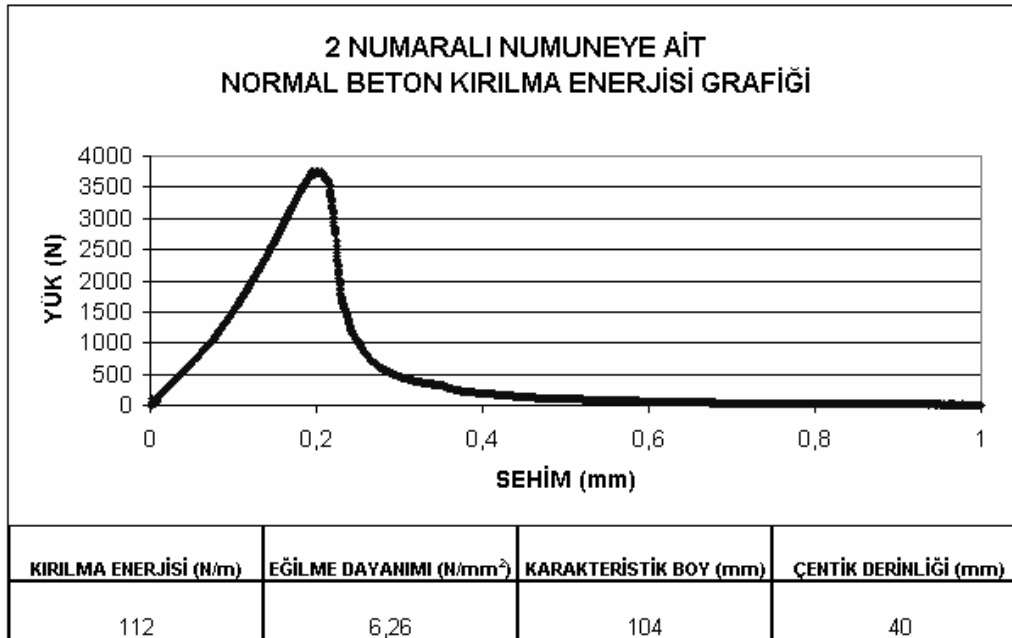
**Şekil A. 12.:** Silindir basınç deneylerinden elde edilen O1R0.5Z0.5 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri



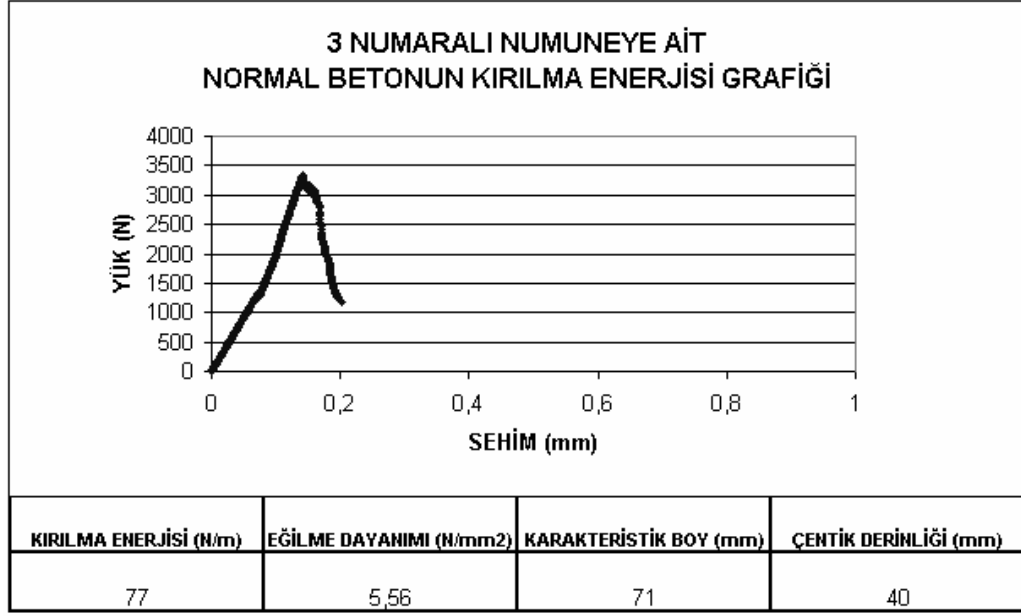
**EK B: 3 Noktalı Eğilme Deneylerinden Elde Edilen Yük-Sehim Grafikleri**



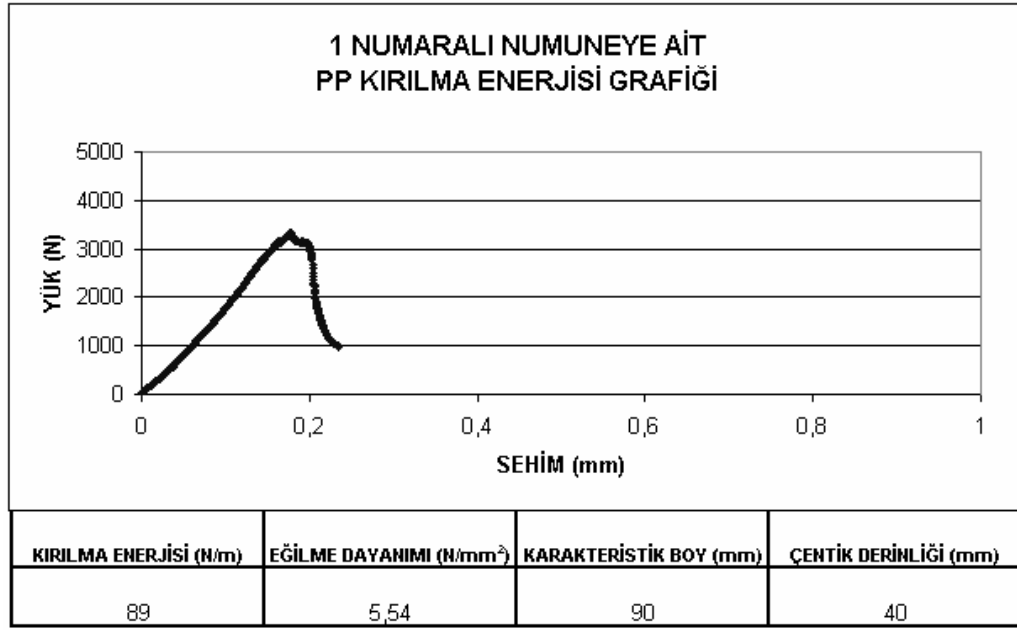
**Şekil B. 1.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı NB numunelerine ait yük-sehim grafikleri



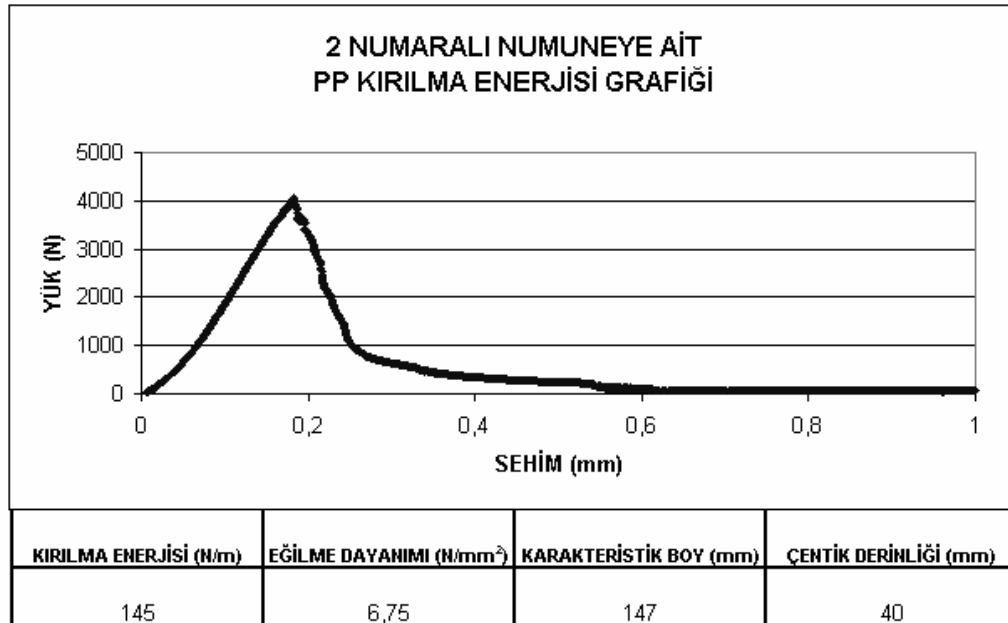
**Şekil B. 2.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı NB numunelerine ait yük-sehim grafikleri



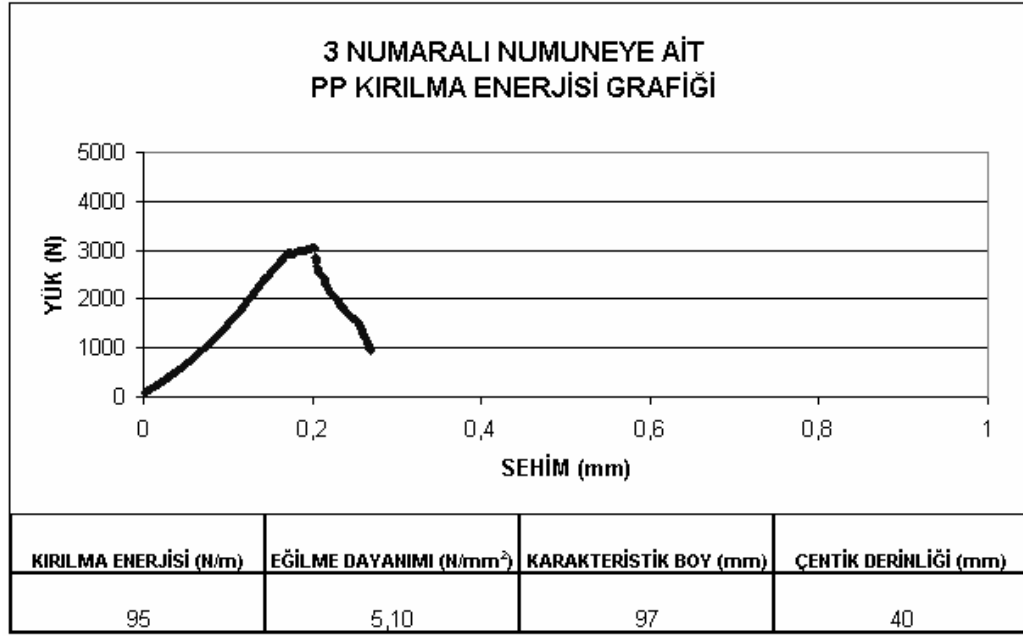
Şekil B. 3.: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı NB numunelerine ait yük-sehim grafikleri



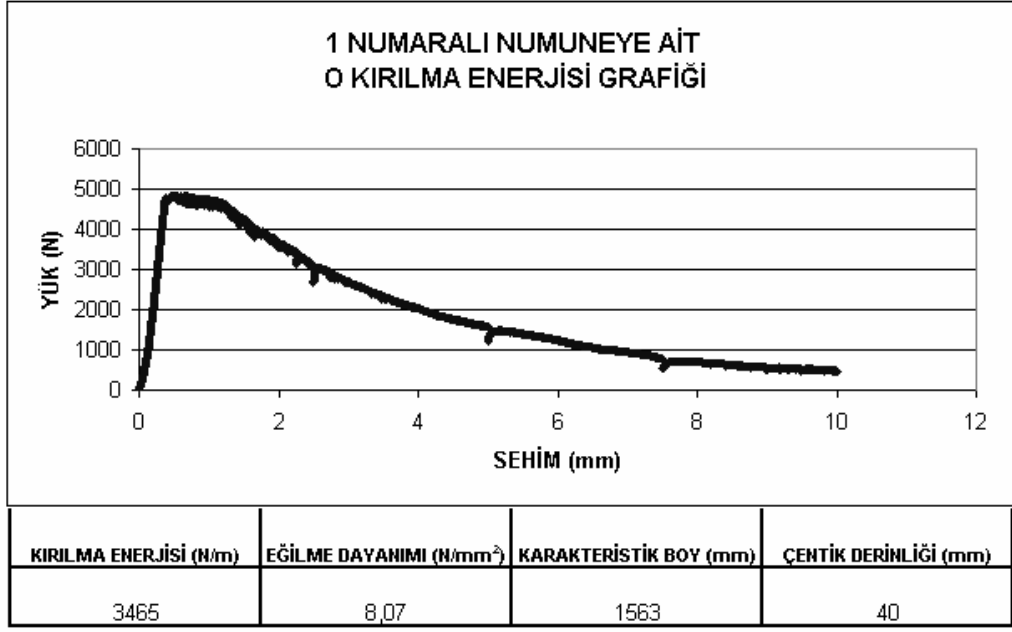
**Şekil B. 4.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı PP numunelerine ait yük-sehim grafikleri



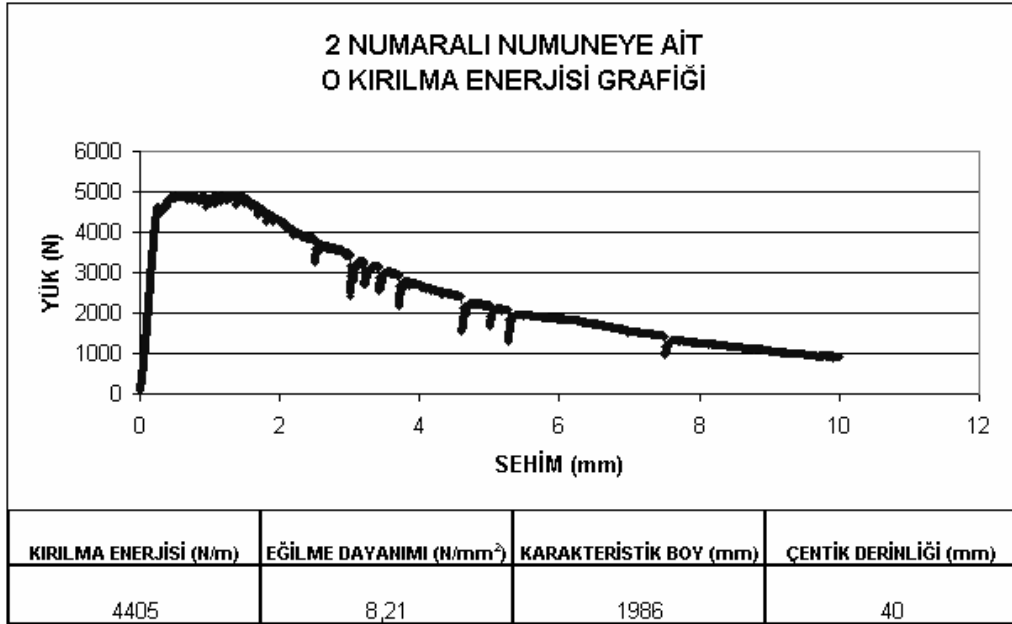
**Şekil B. 5.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı PP numunelerine ait yük-sehim grafikleri



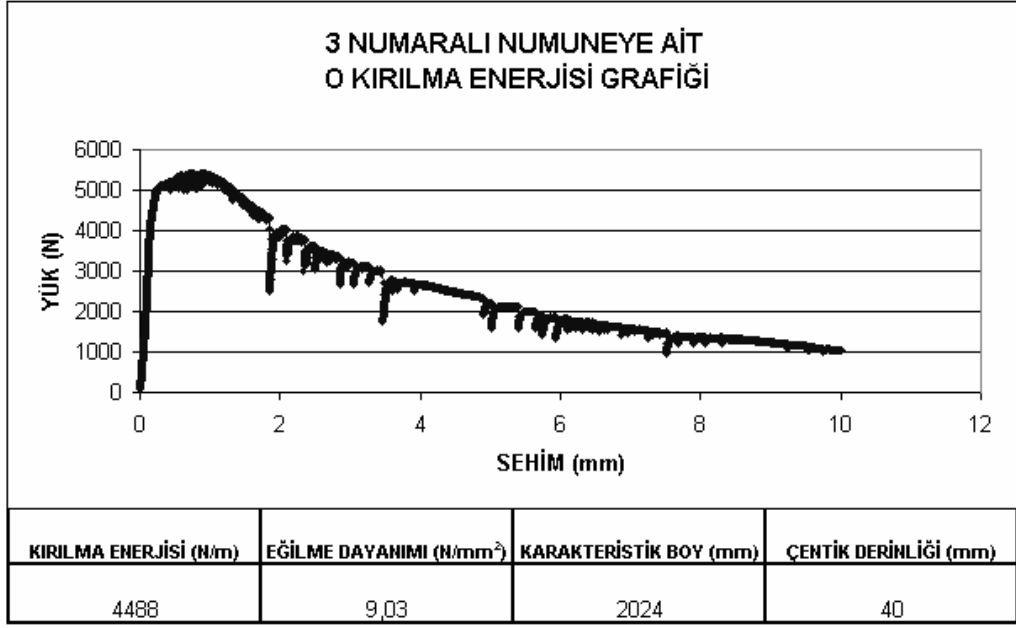
**Şekil B. 6.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı PP numunelerine ait yük-sehim grafikleri



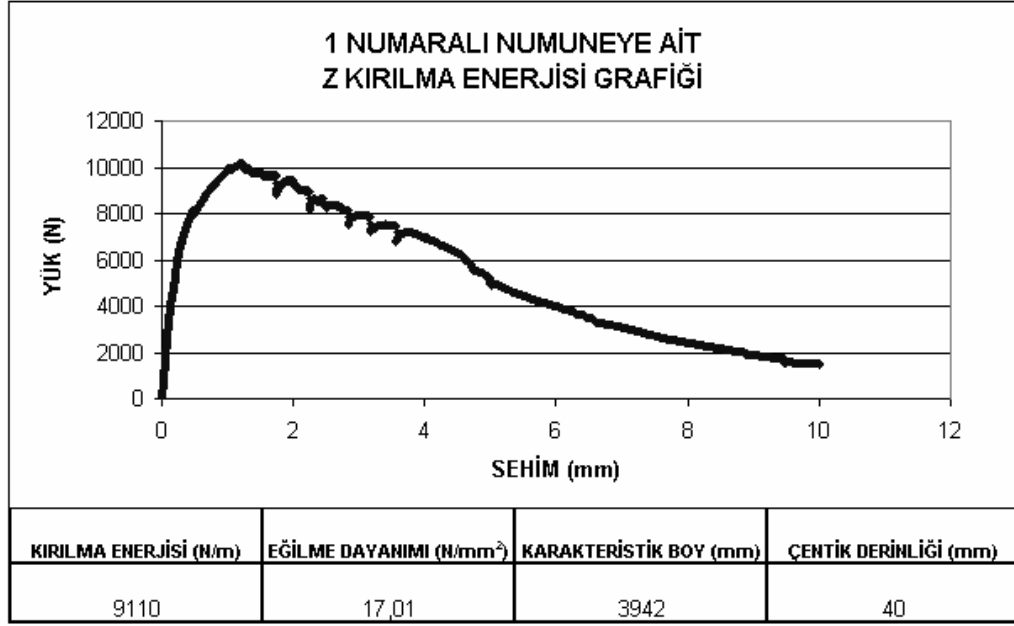
**Şekil B. 7.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı O numunelerine ait yük-sehim grafikleri



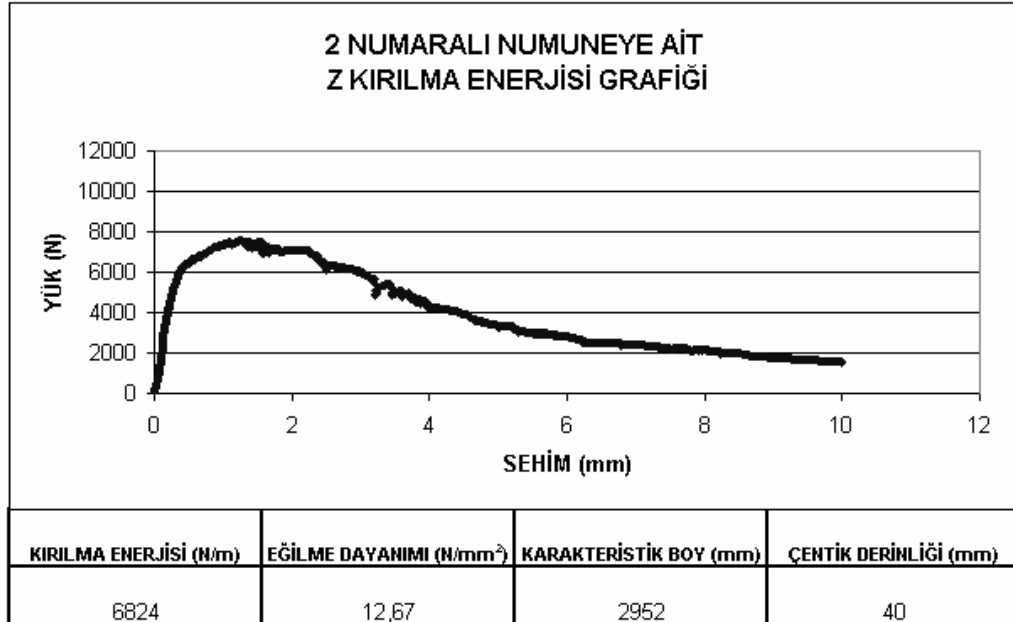
**Şekil B. 8.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı O numunelerine ait yük-sehim grafikleri



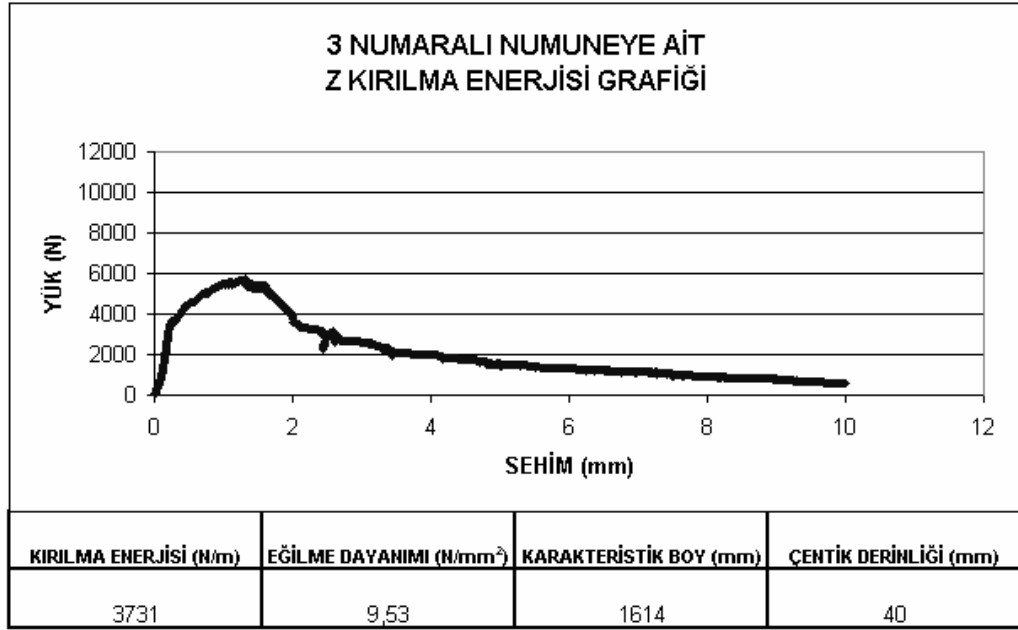
**Şekil B. 9.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı O numunelerine ait yük-sehim grafikleri



**Şekil B. 10.:** noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı Z numunelerine ait yük-sehim grafikleri

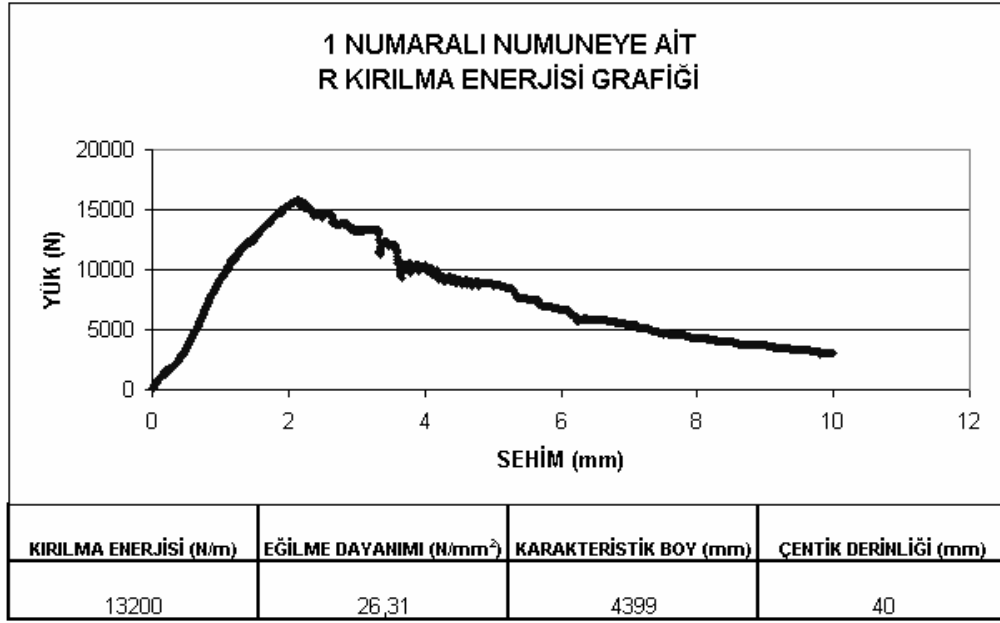


**Şekil B. 11.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı Z numunelerine ait yük-sehim grafikleri

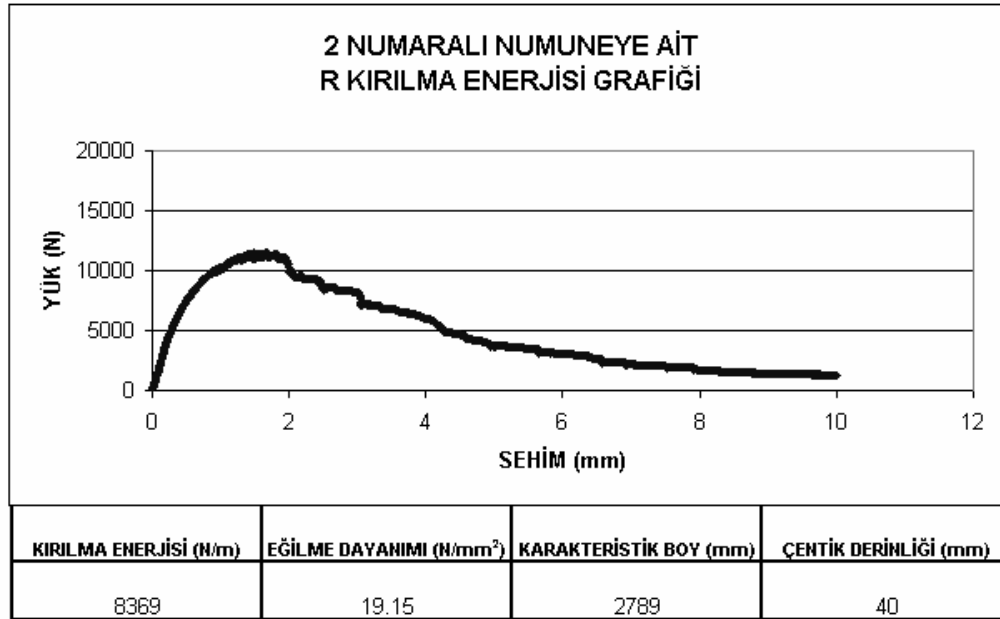


**Şekil B. 12.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı Z numunelerine ait yük-sehim grafikleri

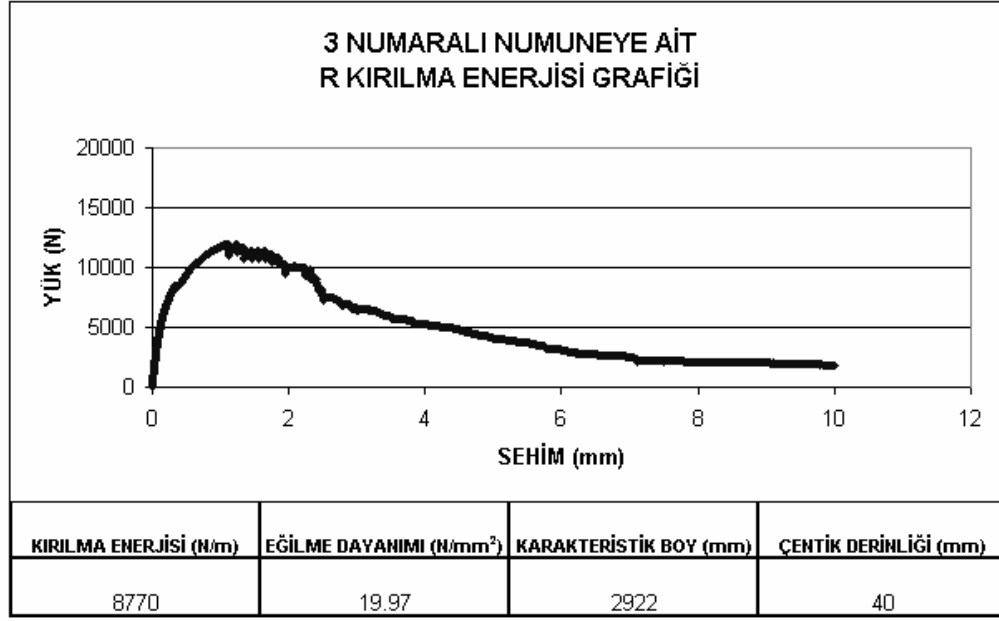




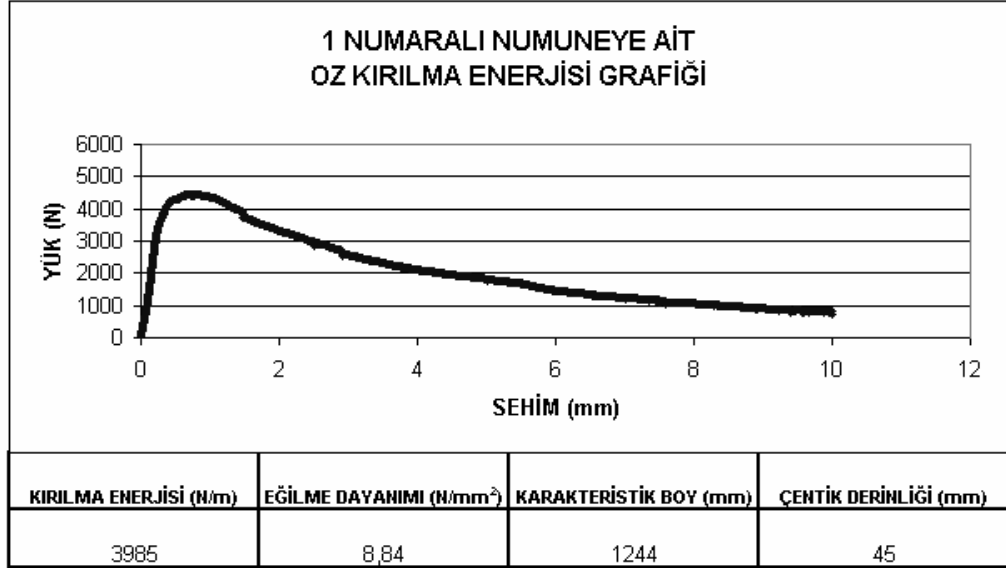
**Şekil B. 13.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı R numunelerine ait yük-sehim grafikleri



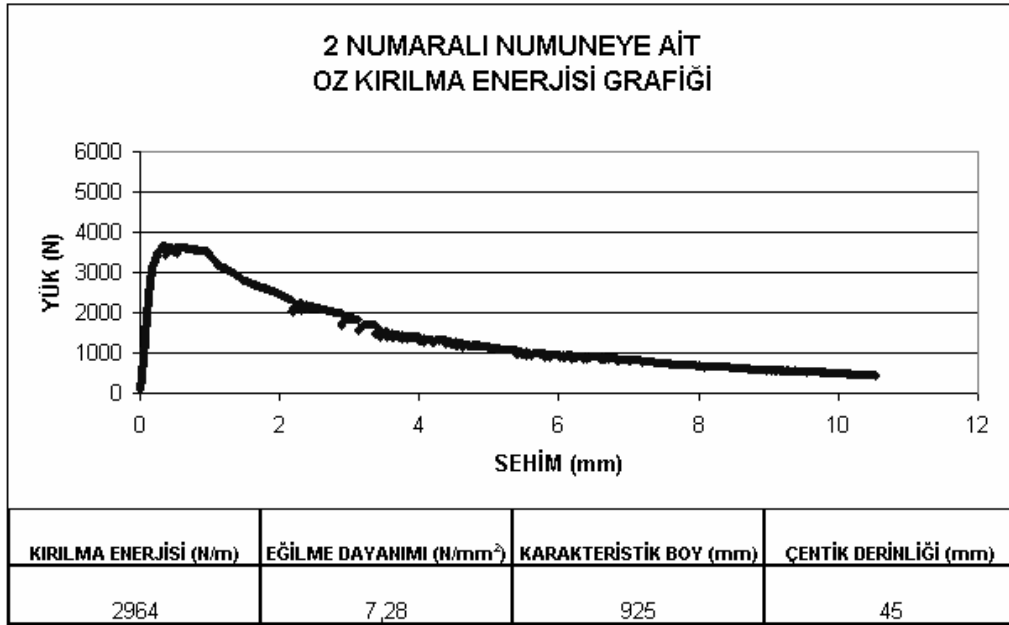
**Şekil B. 14.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı R numunelerine ait yük-sehim grafikleri



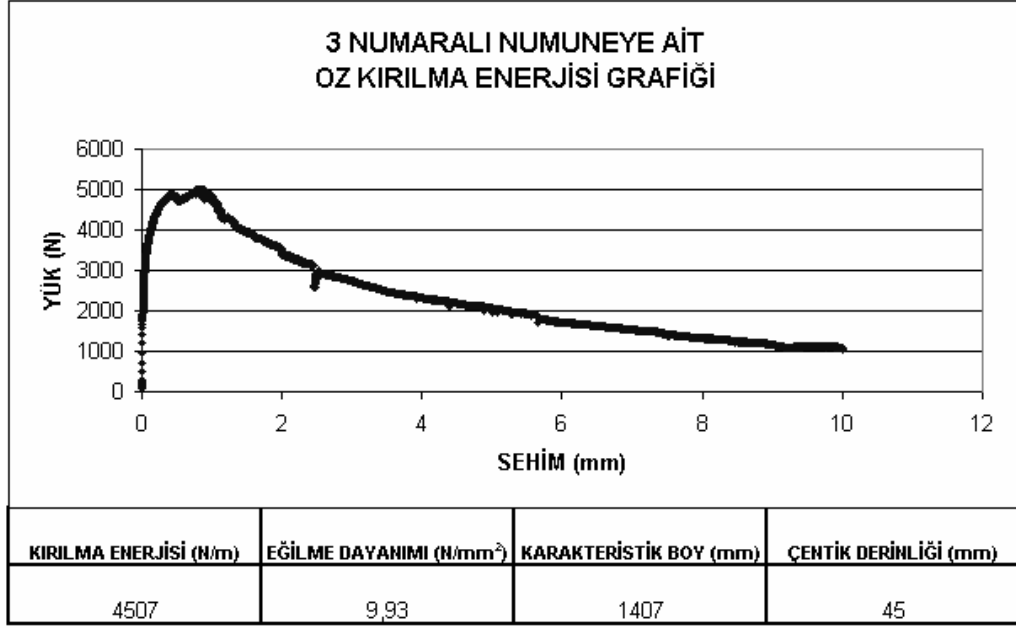
**Şekil B. 15.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı R numunelerine ait yük-sehim grafikleri



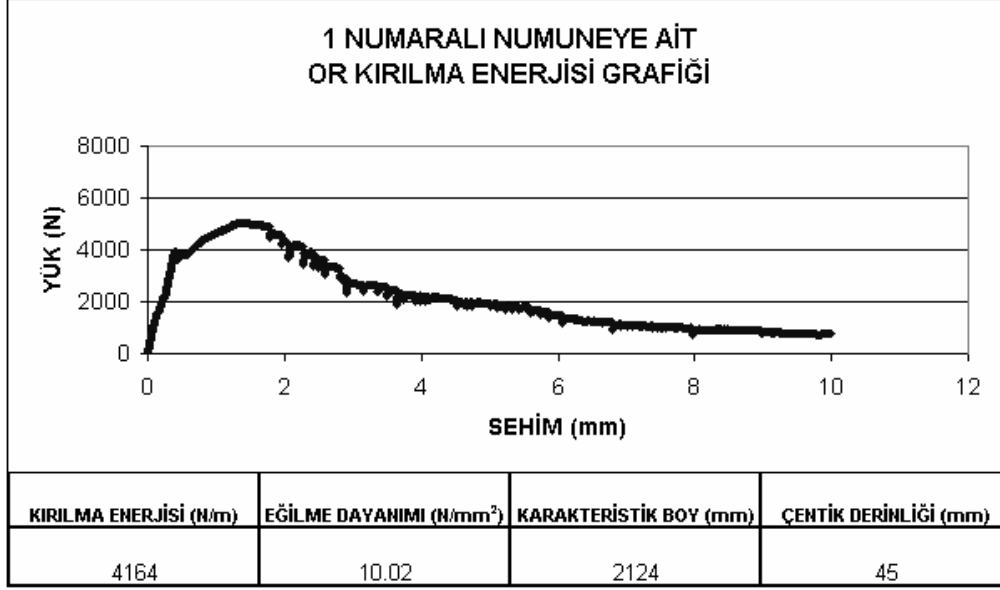
**Şekil B. 16.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı OZ numunelerine ait yük-sehim grafikleri



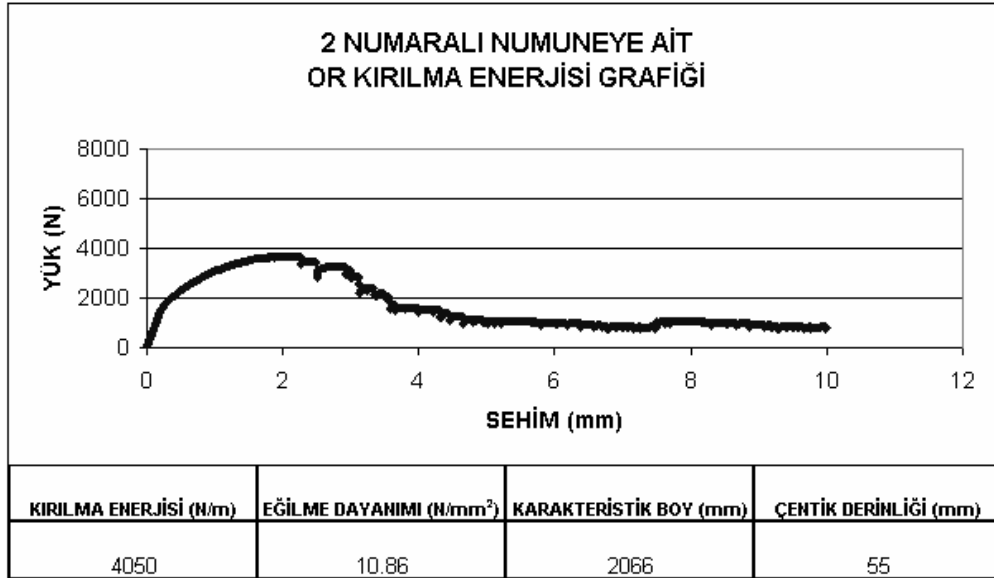
**Şekil B. 17.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı OZ numunelerine ait yük-sehim grafikleri



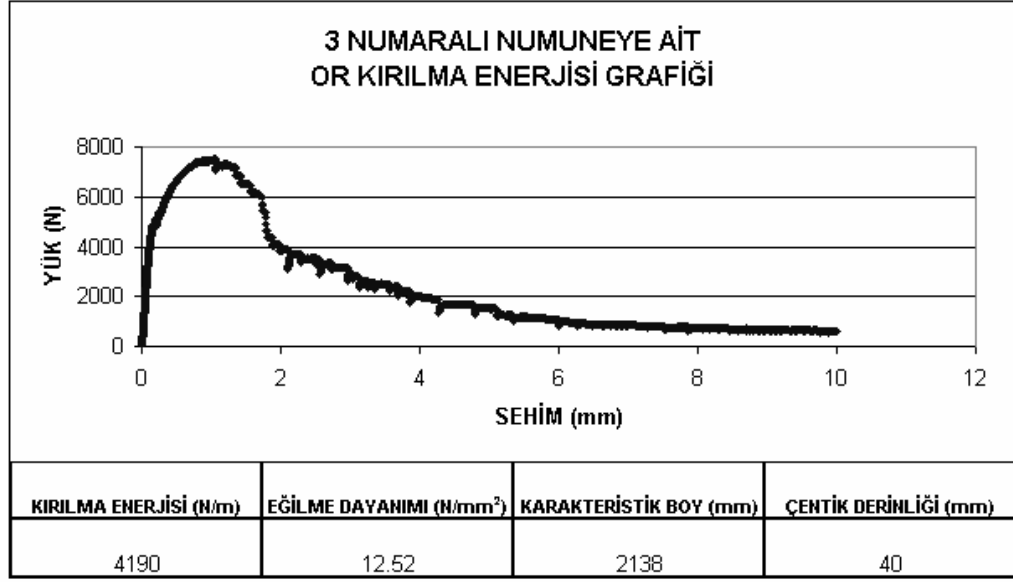
**Şekil B. 18.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı OZ numunelerine ait yük-sehim grafikleri



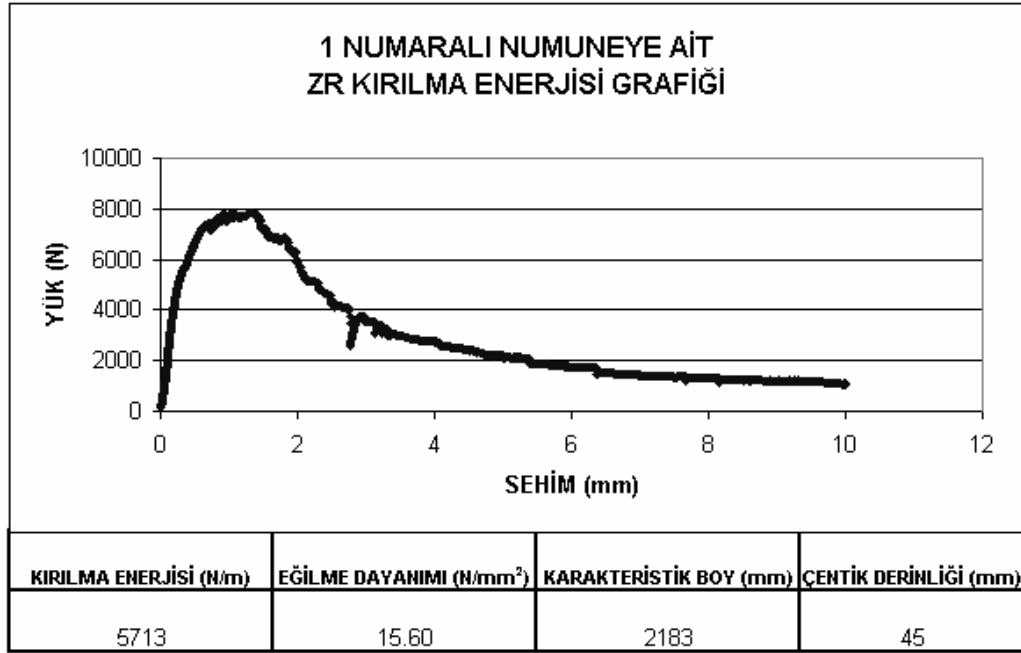
**Şekil B. 19.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı OR numunelerine ait yük-sehim grafikleri



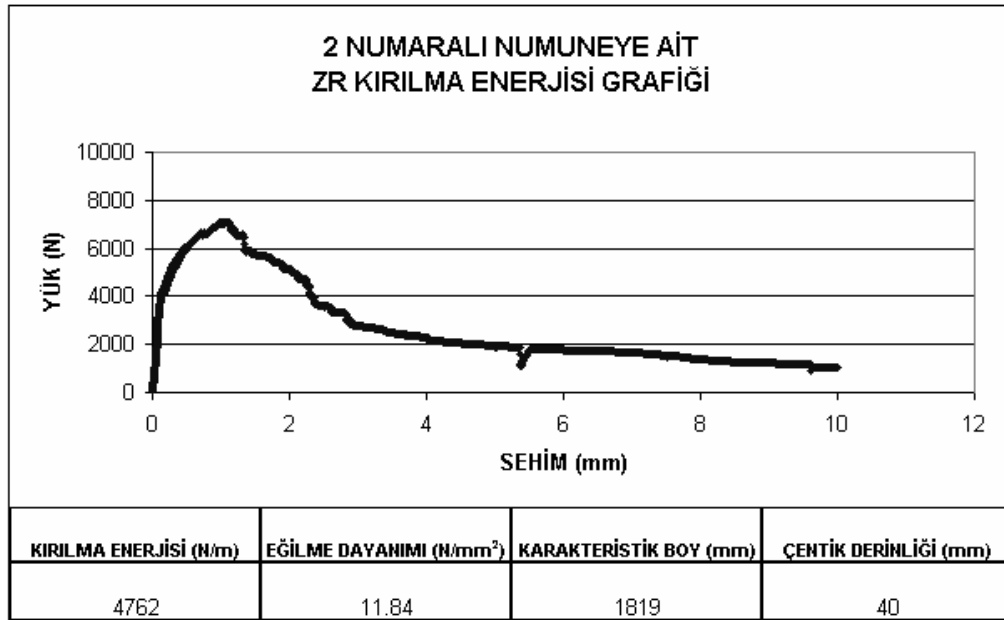
**Şekil B. 20.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı OR numunelerine ait yük-sehim grafikleri



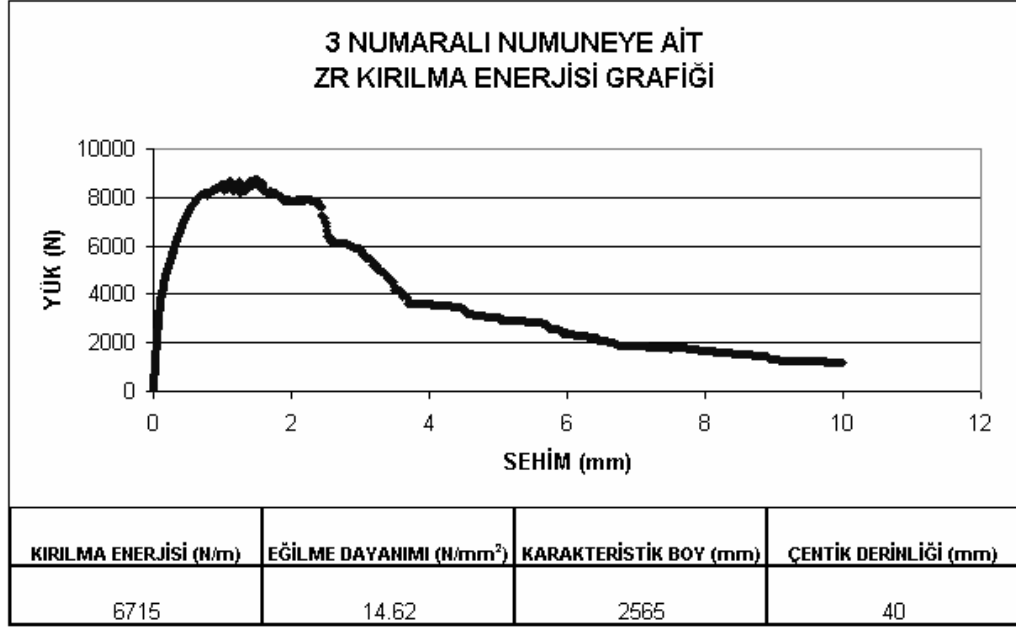
**Şekil B. 21.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı OR numunelerine ait yük-sehim grafikleri



**Şekil B. 22.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı ZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri

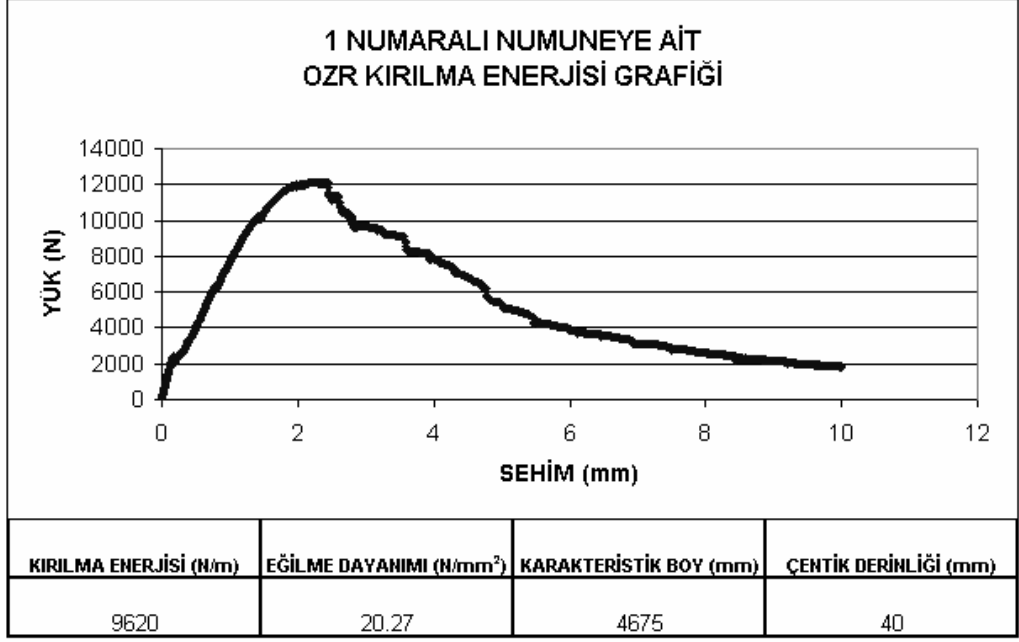


**Şekil B. 23.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı ZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri

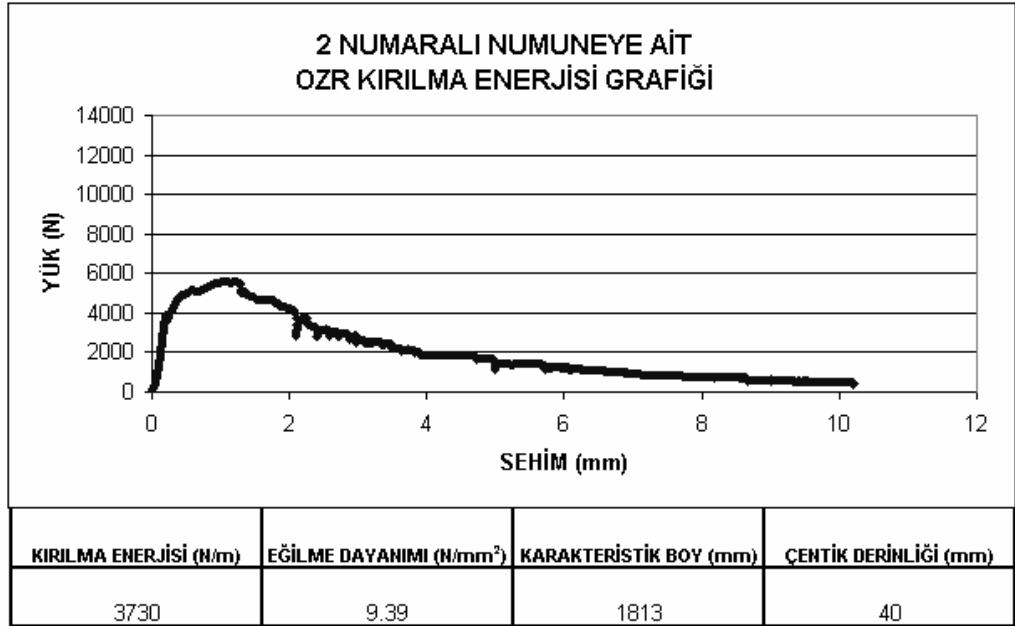


**Şekil B. 24.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı ZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri

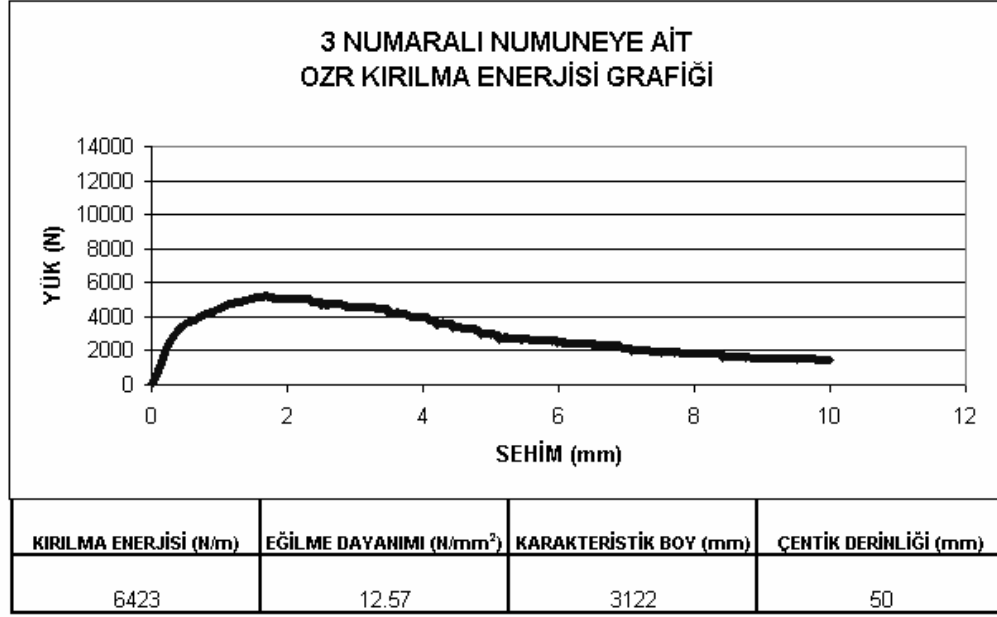




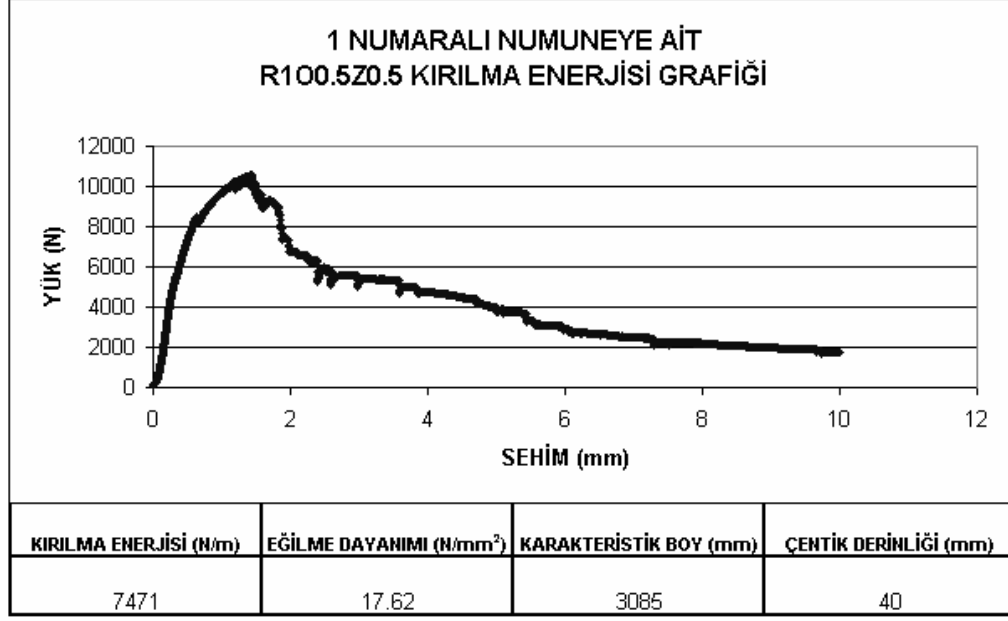
**Şekil B. 25.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı OZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri



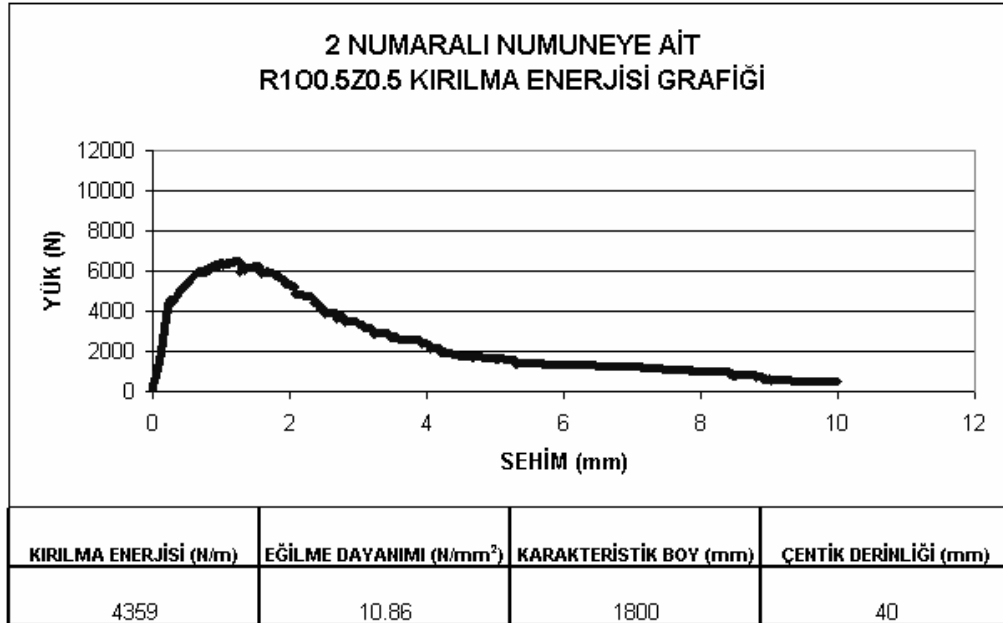
**Şekil B. 26.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı OZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri



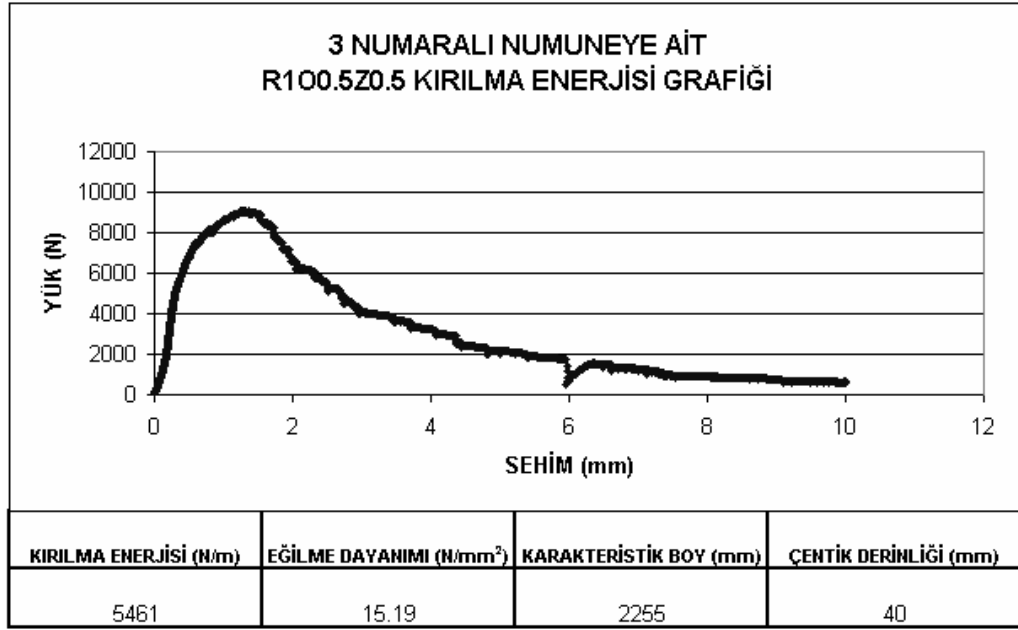
**Şekil B. 27.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı OZR numunelerine ait yük-sehim grafikleri



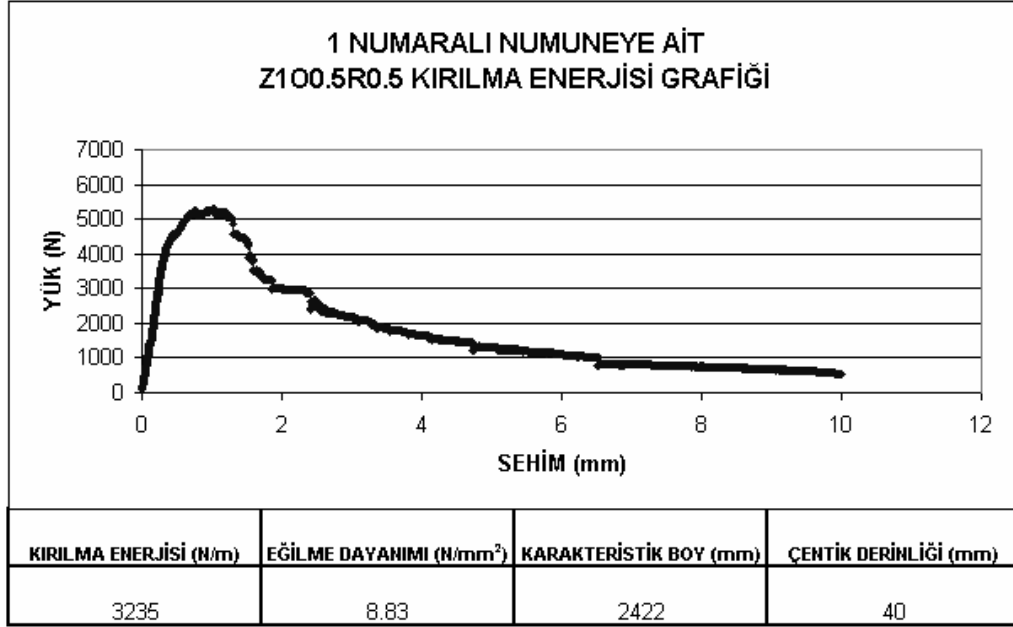
**Şekil B. 28.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen R100.5Z0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri



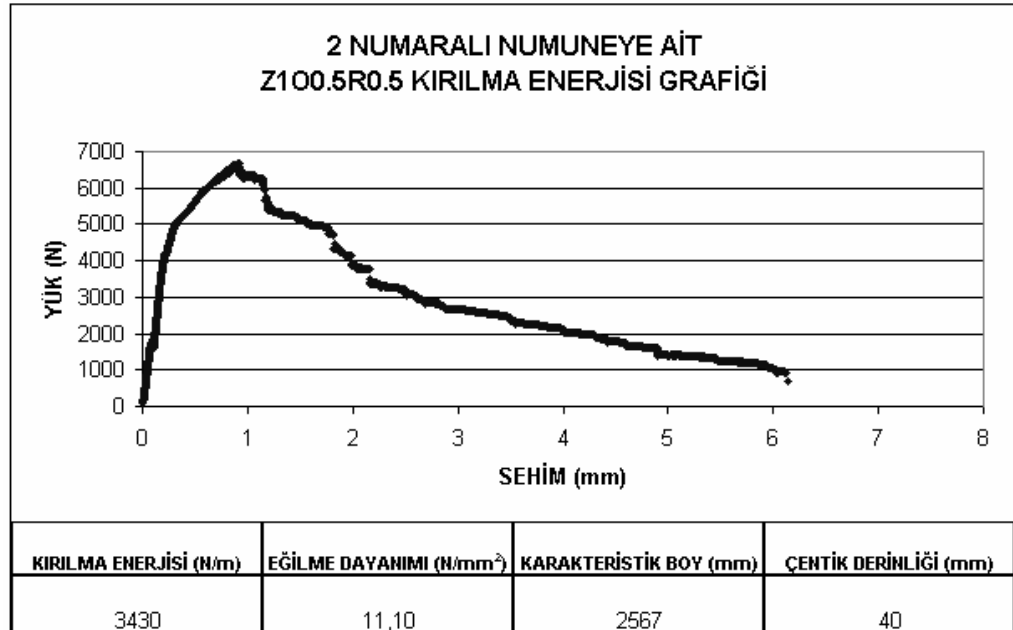
**Şekil B. 29.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı R100.5Z0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri



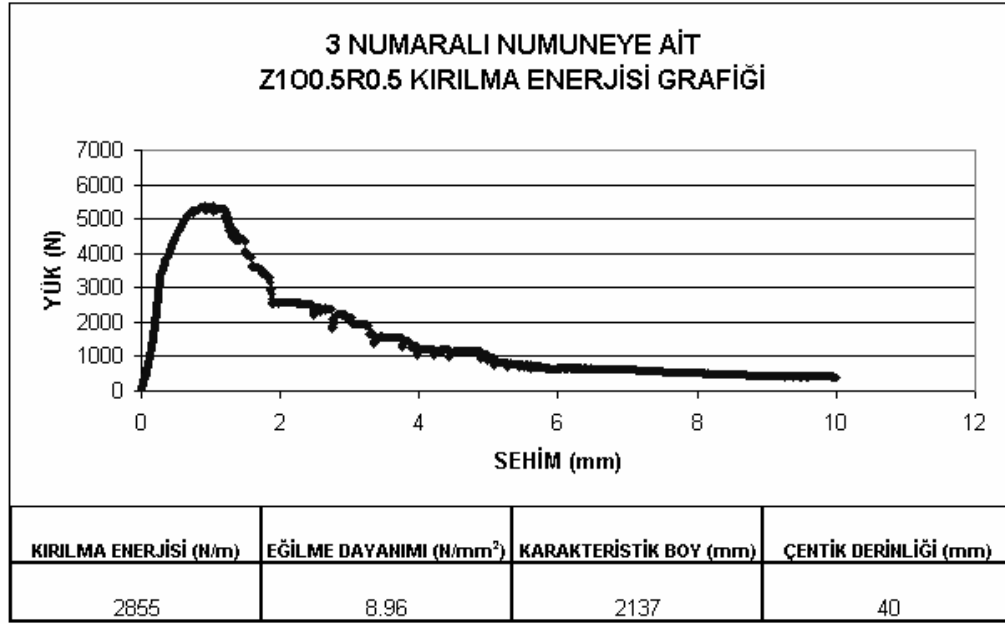
**Şekil B. 30.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı R100.5Z0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri



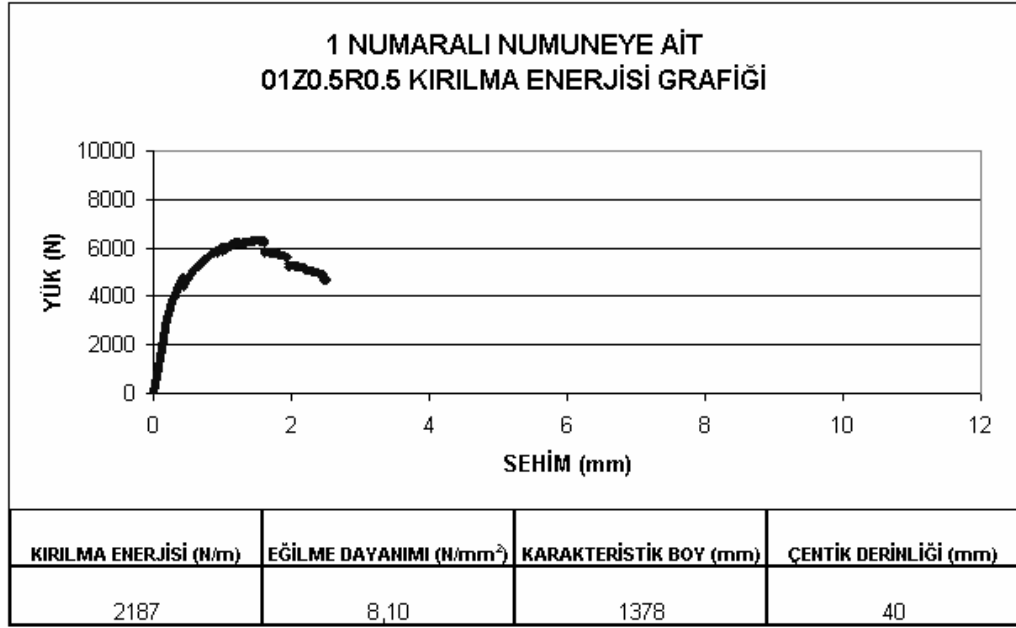
**Şekil B. 31.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı Z100.5R0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri



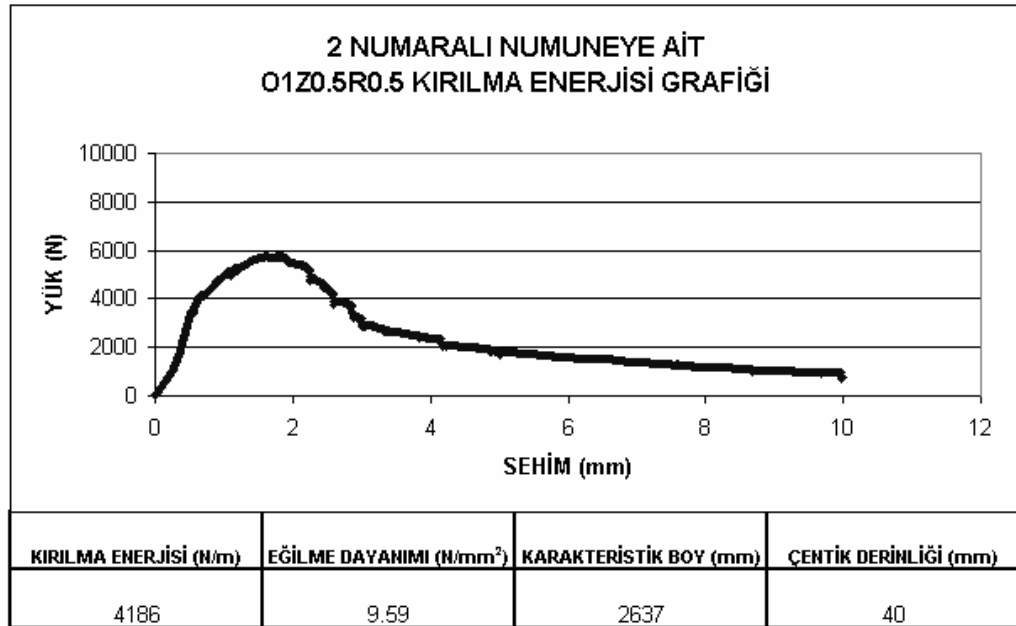
**Şekil B. 32.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı Z100.5R0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri



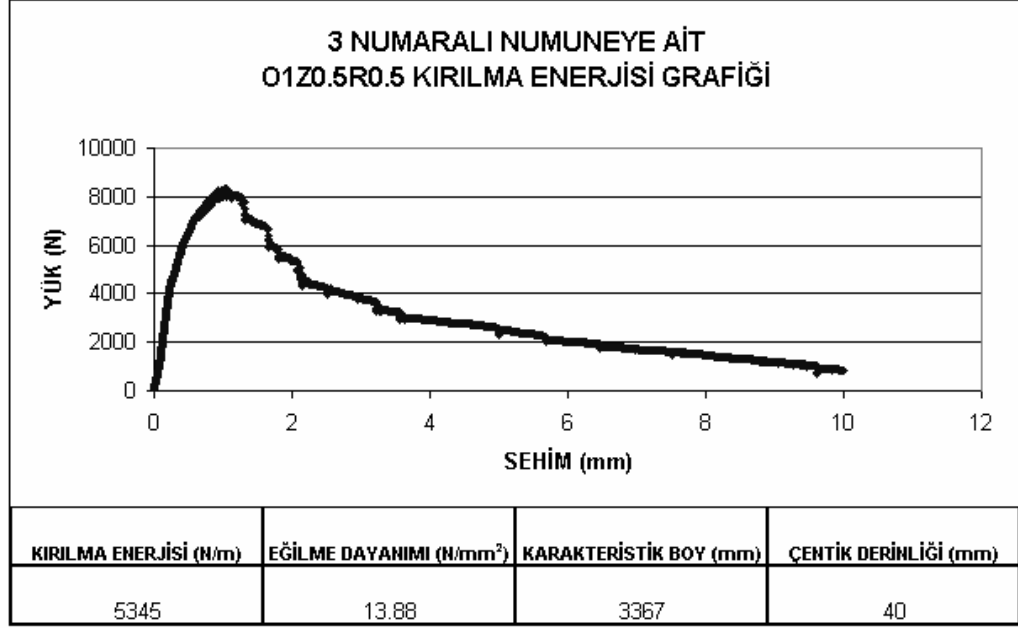
**Şekil B. 33.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı Z100.5R0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri



Şekil B. 34.: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 1 numaralı 01Z0.5R0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri



Şekil B. 35.: 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 2 numaralı 01Z0.5R0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri



**Şekil B. 36.:** 3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen 3 numaralı 01Z0.5R0.5 numunelerine ait yük-sehim grafikleri



**EK C:Kırılma Enerjileri (N/m)****Tablo C. 1.:Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjileri**

<b>Numune adı</b>	<b>Kırılma enerjileri(N/m)</b>	<b>Ortalama</b>
NB-1	135	
NB-2	112	108
NB-3	77	
PP-1	89	
PP-2	145	109
PP-3	95	
O-1	3465	
O-2	4405	4119
O-3	4488	
Z-1	9110	
Z-2	6824	6555
Z-3	3731	
R-1	13200	
R-2	8369	10113
R-3	8770	
OZ-1	3985	
OZ-2	2964	3819
OZ-3	4507	
OR-1	4164	
OR-2	4050	4135
OR-3	4190	
ZR-1	5713	
ZR-2	4762	5730
ZR-3	6715	
OZR-1	9620	
OZR-2	3730	6591
OZR-3	6423	
R100.5Z0.5-1	7471	
R100.5Z0.5-2	4359	5764
R100.5Z0.5-3	5461	
Z100.5R0.5-1	3235	
Z100.5R0.5-2	3430	3173
Z100.5R0.5-3	2855	
O1Z0.5R0.5-1	2187	
O1Z0.5R0.5-2	4186	3906
O1Z0.5R0.5-3	5345	

**EK D: Net Eğilme Dayanımları (N/mm<sup>2</sup>)**

**Tablo D. 1.:** Prizma numunelerden elde edilen net eğilme dayanımları.

<b>Numune adı</b>	<b>Eğilme Dayanımı (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Ortalama</b>
NB-1	6.13	
NB-2	6.26	5.98
NB-3	5.56	
PP-1	5.54	
PP-2	6.75	5.79
PP-3	5.10	
O-1	8.07	
O-2	8.21	8.43
O-3	9.03	
Z-1	17.01	
Z-2	12.67	13.07
Z-3	9.53	
R-1	26.31	
R-2	19.15	21.81
R-3	19.97	
OZ-1	8.84	
OZ-2	7.28	8.68
OZ-3	9.93	
OR-1	10.02	
OR-2	10.86	11.13
OR-3	12.52	
ZR-1	15.60	
ZR-2	11.84	14.00
ZR-3	14.62	
OZR-1	20.27	
OZR-2	9.39	14.07
OZR-3	12.57	
R1O0.5Z0.5-1	17.62	
R1O0.5Z0.5-2	10.86	14.55
R1O0.5Z0.5-3	15.19	
Z1O0.5R0.5-1	8.83	
Z1O0.5R0.5-2	11.10	9.63
Z1O0.5R0.5-3	8.96	
O1Z0.5R0.5-1	8.1	
O1Z0.5R0.5-2	9.59	10.52
O1Z0.5R0.5-3	13.88	

**EK E:** Karakteristik Boy (mm.)

**Tablo E. 1.:** Prizma numunelerden elde edilen karakteristik boylar.

Numune adı	Karakteristik Boy (mm)	Ortalama
NB-1	125	
NB-2	104	100
NB-3	71	
PP-1	90	
PP-2	147	111
PP-3	97	
O-1	1563	
O-2	1986	1858
O-3	2024	
Z-1	3942	
Z-2	2952	2836
Z-3	1614	
R-1	4399	
R-2	2789	3369
R-3	2922	
OZ-1	1244	
OZ-2	925	1192
OZ-3	1407	
OR-1	2124	
OR-2	2066	2109
OR-3	2138	
ZR-1	2183	
ZR-2	1819	2188
ZR-3	2565	
OZR-1	4675	
OZR-2	1813	3203
OZR-3	3122	
R100.5Z0.5-1	3085	
R100.5Z0.5-2	1800	2380
R100.5Z0.5-3	2255	
Z100.5R0.5-1	2422	
Z100.5R0.5-2	2567	2374
Z100.5R0.5-3	2137	
O1Z0.5R0.5-1	1378	
O1Z0.5R0.5-2	2637	2460
O1Z0.5R0.5-3	3367	

**EK F:** Yarmada Çekme Dayanımı Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

**Tablo F.1.:** Disk numunelerden elde edilen maksimum dayanımlar

Numune adı	Disk Numuellerin Taşıdığı Maksimum Kuvvet (KN)	Ortalama (KN)
NB-1	88	98
NB-2	110	
NB-3	92	
NB-4	103	
NB-5	100	
NB-6	95	
PP-1	88	93
PP-2	95	
PP-3	94	
PP-4	89	
PP-5	93	
PP-6	99	
O-1	143	143
O-2	142	
O-3	148	
O-4	140	
O-5	145	
O-6	140	
Z-1	135	133
Z-2	130	
Z-3	136	
Z-4	142	
Z-5	140	
Z-6	115	
R-1	170	160
R-2	168	
R-3	165	
R-4	147	
R-5	150	
R-6	160	

Numune adı	Disk Numuellerin Taşıdığı Maksimum Kuvvet (KN)	Ortalama (KN)
OZ-1	160	165
OZ -2	165	
OZ -3	167	
OZ -4	172	
OZ -5	174	
OZ -6	152	
OR-1	128	132
OR-2	118	
OR -3	132	
OR -4	138	
OR -5	140	
OR -6	136	
ZR-1	148	151
ZR -2	132	
ZR -3	155	
ZR -4	160	
ZR -5	165	
ZR -6	146	
OZR-1	130	129
OZR -2	122	
OZR -3	117	
OZR -4	135	
OZR -5	136	
OZR -6	134	
R100,5Z0,5-1	142	150
R100,5Z0,5-2	145	
R100,5Z0,5-3	150	
R100,5Z0,5-4	148	
R100,5Z0,5-5	157	
R100,5Z0,5-6	158	

Numune adı	Disk Numuellerin Taşıdığı Maksimum Kuvvet (KN)	Ortalama(KN)
Z1O0,5R0,5-1	100	105
Z1O0,5R0,5-2	115	
Z1O0,5R0,5-3	98	
Z1O0,5R0,5-4	109	
Z1O0,5R0,5-5	96	
Z1O0,5R0,5-6	112	
O1Z0,5R0,5-1	104	115
O1Z0,5R0,5-2	108	
O1Z0,5R0,5-3	114	
O1Z0,5R0,5-4	119	
O1Z0,5R0,5-5	125	
O1Z0,5R0,5-6	120	

## ÖZGEÇMİŞ

Murat ARAL, 1977 yılında Almanya Gelsenkirchen’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ’da tamamladı. 1996 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 1996-2000 öğretim yılında tamamladı. 2000-2001 yılları arasında çeşitli özel sektör firmalarında çalıştı. 2002 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilimdalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı .2001 yılında çalışmaya başladığı Ularte Galvaçelik firmasında, proje mühendisi olarak çalışmaktadır.