İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PVA LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kemal Kılıç BOĞAZKESEN

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PVA LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kemal Kılıç BOĞAZKESEN
(501091113)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hakan N.ATAHAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Bekir Y.PEKMEZCİ (İTÜ)
Prof.Dr. Fahriye KILIÇKALE (İÜ)

HAZİRAN 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımları ile yanımda olan çok değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Hakan Nuri ATAHAN'a,

Çalışmalarımda ilgi ve yardımları dolayısıyla sayın hocamlarım Yrd.Doç.Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ'ye ve Arş.Gör. Cengiz ŞENGÜL'e,

Deneysel çalışmalarıma yaptıkları ürün desteklerinden dolayı TİCEM İleri Yapı Teknolojileri San. Tic.Dan Ltd.Şti'ne, ve deneysel çalışmalara katkılarından dolayı Sezgin MEYDAN'a

Deneysel çalışmalarımda göstermiş oldukları yardım ve destekleri dolayısıyla İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Labaratuarı çalışanları Murat MEYDAN'a, Hakan Üzmen'e ve Oktay YALÇINKAYA'ya

Çalışmalarım sırasında her an yanımda olup, yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşlarım, başta Burak YORULMAZ olmak üzere, Alperen TÜRKAY'a, Aydın SAYINER'e, Çağrı DURU'ya, Didem YAŞAR'a, Emre SINIRKAVAK'a, Ferhat KOÇAK'a, Halife KOÇ'a, M.Sait AŞUK'a ve Onur CEYLAN'a,

Gösterdikleri sonsuz sevgi, hoşgörü ve destekleri için çok sevgili AİLEM'e

teşekkür ederim.

Haziran 2011

Kemal Kılıç BOĞAZKESEN

(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI **3**
2.1 Tarihçe 3
2.2 Çimento 4
2.2.1 Türk Standartlarında Yer Alan Çimentolar 4
2.2.2 Çimentonun Ana Bileşenleri 5
2.3 Agregalar 6
2.4 Yüksek Fırın Cürufu 6
2.4.1 Cüruf Kullanımının Taze Beton Özelliklerine Etkisi 7
2.4.2 Cüruf Kullanımının Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi 7
2.5 Nano Silika 7
2.6 Kimyasal Katkılar 8
2.7 Lifler Hakkında Genel Bilgiler 9
2.8 Lif Çeşitleri 9
2.8.1 Metalik Lifler 10
2.8.2 Polimerik Lifler 11
2.8.3 Mineral Lifler 12
2.9 Liflerin Beton Takviyesinde Kullanımı 12
2.10 Lif Özelliklerinin Kompozit Özelliklerine Etkisi 14
2.10.1 Lif Geometrisinin Etkisi 14
2.10.2 Lif Boyunun Etkisi 14
2.10.3 Lif Narinlik Oranı ve Lif Yüzdesinin Etkileri 15
2.11 Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri 15
2.11.1 Çelik Tel Donatılı Betonların Genel Özellikleri 16
2.11.2 Cam Elyaf (GF) Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri 16
2.11.3 Polipropilen Donatılı Betonların Genel Özellikleri 17
2.11.4 Naylon Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri 18
2.11.5 PVA Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri 19
2.11.6 Karma Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri 19
2.12 Lif Donatılı Betonların Kullanım Alanları 20
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **21**
3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 21
3.1.1 Çimento 21
3.1.2 Cüruf(GGBS) 22

3.1.3 Agregalar 23
3.1.4 Nano Silika 23
3.1.5 PVA Lifler 23
3.1.6 Kimyasal Katkı 24
3.2 Çimento Esaslı Kompozit Üretimi 24
3.2.1 Üretimde İzlenen Sıra 25
3.2.2 Numune Kodlarının Belirlenmesi 25
3.2.3 Numune Boyutları ve Şekilleri 25
3.3 PVA Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozit Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler 28
3.3.1 Taze Harç Deneyleri 28
3.3.1.1 Birim Ağırlık Deneyi 28
3.3.1.2 Çökme Deneyi (Slump Deneyi) 28
3.3.1.3 Yayılma Deneyi 28
3.3.2 Sertleşmiş Harç Deneyleri 29
3.3.2.1 Küp Basınç Deneyi 29
3.3.2.2 Eğilme Deneyi 29
3.3.2.3 Net Eğilme Dayanımlarının Hesaplanması 30
3.3.2.4 Kırılma Enerjilerinin Hesaplanması 30
3.3.2.5 Charpy Impact Darbe Deneyi 31
4. DENEY SONUÇLARI 33
4.1 Çimento Esaslı Kompozitler Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları 33
4.1.1 Taze Beton Deney Sonuçları 33
4.1.1.1 Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları 33
4.1.1.2 Slump/Yayılma Deneyi Sonuçları 36
4.1.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları 37
4.1.2.1 Basınç Deneyi Sonuçları 37
4.1.2.2 Charpy Impact (Kırılma Enerjisi) Deneyi Sonuçları 38
4.1.2.3 Eğilme Deneyi Sonuçları 38
4.1.2.4 Kırılma Enerjisi Deneyi Sonuçları 39
5. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ 41
5.1 Taze Beton Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 41
5.2 Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 42
5.3 Eğilme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 48
5.4 Charpy Impact (Darbe Enerji Yutma) Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 54
5.5 Özgül Kırılma Enerjilerinin Değerlendirilmesi 60
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER 65
KAYNAKLAR 67
EKLER 71

KISALTMALAR

ASTM : Amerikan Standartları Enstitüsü
GF : Glass Fiber (Cam Elyaf Lif)
GGBS : Yüksek Fırın Cürufu
PVA : Polivinil Alkol
TSE : Türk Standartları Enstitüsü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler. 10
Çizelge 2.2 : Polimer liflerin fiziksel özelikleri..... 12
Çizelge 2.3 : Lif takviyeli betonların bazı özeliklerinde matris malzemesinin özeliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri. 16
Çizelge 2.4 : Bazı cam liflerinin tipik özellikleri. 17
Çizelge 3.1 : Çimentonun fiziksel özellikleri. 21
Çizelge 3.2 : Çimentonun kimyasal bileşimi. 21
Çizelge 3.3 : Cürufun fiziksel ve mekanik özellikleri. 22
Çizelge 3.4 : Cürufun kimyasal özellikleri. 22
Çizelge 3.5 : Üretimlerde kullanılan nano silikanının fiziksel özellikleri. 23
Çizelge 3.6 : PVA liflerinin fiziksel ve mekanik özellikleri. 23
Çizelge 3.7 : Süper akışkanlaştırıcı katkının fiziksel özellikleri. 24
Çizelge 3.8 : Numune kodları ve lif yüzdeleri. 26
Çizelge 3.9 : Numune şekilleri ve boyutları. 27
Çizelge 4.1 : Su/Bağlayıcı oranı 0,20 olan karışımların birim ağırlık değerleri ve karışım oranları.. 34
Çizelge 4.2 : Su/Bağlayıcı oranı 0,35 olan karışımların birim ağırlık değerleri ve karışım oranları.. 35
Çizelge 4.3 : Slump/yayılma deneyi sonuçları. 36
Çizelge 4.4 : Basınç deneyi sonuçları. 37
Çizelge 4.5 : Charpy Impact deneyi sonuçları. 38
Çizelge 4.6 : Eğilme deneyi sonuçları. 39
Çizelge 4.7 : Kırılma enerjisi deney sonuçları..... 40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : PVA lifli çimento esaslı kompozitte eksenel çekme altında birçok küçük çatlak oluşumu. 13
Şekil 2.2 : PVA lifli ve Polipropilen lifli kompozitlerin mikroskop altındaki görüntüsü ……..... 19
Şekil 2.3 : Mikro ve makro düzeydeki çatlakların köprülenmesi. 20
Şekil 3.1 : Üretimlerde kullanıllan PVA lifler. 24
Şekil 3.2 : Yayılma deneyi uygulaması. 28
Şekil 3.3 : a) Basınç deneyi uygulaması. b) Soldaki küp numune lif içermemektedir, sağdaki küp numune lif içermektedir. 29
Şekil 3.4 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni. 30
Şekil 3.5 : Charpy Impact darbe deneyi düzeneği. 31
Şekil 5.1 : %2,0 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri. 42
Şekil 5.2 : %1,5 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri. 44
Şekil 5.3 : %1,0 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri. 45
Şekil 5.4 : % 0,5 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri..... 46
Şekil 5.5 : Sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri..... 46
Şekil 5.6 : Sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri..... 47
Şekil 5.7 : %2,0 oranında PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri. 48
Şekil 5.8 : %1,5 oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri. 50
Şekil 5.9 : %1,0 oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrisin eğilme dayanım değerleri. 51
Şekil 5.10 : %0,5 hacimsel lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri. 52
Şekil 5.11 : Sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri. 53
Şekil 5.12 : Sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri. 54
Şekil 5.13 : %2,0 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri..... 55
Şekil 5.14 : Charpy impact darbe deneyi sonucu kırılan numuneler a)Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matriste uzun lif (sıyrılma) b) Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matriste kısa lif (sıyrılma) c) Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matriste uzun lif(sıyrılma) d)Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matriste kısa lif(kopma)..... 56

Şekil 5.15 : %1,5 lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri. 56
Şekil 5.16 : %1,0 lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri. 57
Şekil 5.17 : Sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri. 58
Şekil 5.18 : Sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri. 58
Şekil 5.19 : %2,0 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri. 59
Şekil 5.20 : %2,0 lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri. 60
Şekil 5.21 : %2,0 kısa lif içeren su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu 35U00K20 üretim serilerinin gerilme-sehim grafikleri. 61
Şekil 5.22 : %1,5 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri. 61
Şekil 5.23 : %1,0 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri. 62
Şekil 5.24 : %0,5 lif(sadece uzun veya sadece kısa) içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri. 63
Şekil 5.25 : Sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri. 63
Şekil 5.26 : Sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri. 64
Şekil A.1 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan yalın matrislerin (lif içermeyen) yük-sehim eğrileri. 72
Şekil A.2 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %0,5 oranında uzun lif içeren 20U05K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 72
Şekil A.3 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %0,5 oranında kısa lif içeren 20U00K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 73
Şekil A.4 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %1,0 oranında uzun lif içeren 20U10K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 73
Şekil A.5 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %0,5 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren 20U05K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 74
Şekil A.6 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %1,0 kısa lif içeren 20U00K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 74
Şekil A.7 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %1,5 uzun lif içeren 20U15K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 75
Şekil A.8 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %1,0 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren 20U10K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 75
Şekil A.9 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %0,5 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren 20U05K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 76
Şekil A.10 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %1,5 kısa lif içeren 20U00K15 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 76
Şekil A.11 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %2,0 uzun lif içeren 20U20K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 77
Şekil A.12 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %2,0 uzun lif içeren 20U20K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 77
Şekil A.13 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %1,0 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren 20U10K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 78

Şekil A.14 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %0,5 uzun lif ve %1,5 kısa lif içeren 20U05K15 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 78
Şekil A.15 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %2,0 sadece kısa lif içeren 20U00K20 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 79
Şekil A.16 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan yalın matrislerin(35U00K00) yük-sehim eğrileri. 79
Şekil A.17 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %0,5 oranında uzun lif içeren 35U05K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 80
Şekil A.18 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %0,5 oranında kısa lif içeren 35U00K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 80
Şekil A.19 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %1,0 oranında uzun lif içeren 35U10K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 81
Şekil A.20 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %0,5 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren 35U05K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 81
Şekil A.21 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %1,0 kısa lif içeren 35U00K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 82
Şekil A.22 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %1,5 uzun lif içeren 35U15K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 82
Şekil A.23 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %1,0 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren 35U10K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 83
Şekil A.24 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %0,5 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren 35U05K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 83
Şekil A.25 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %1,5 kısa lif içeren 35U00K15 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 84
Şekil A.26 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %2,0 uzun lif içeren 35U20K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 84
Şekil A.27 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %2,0 uzun lif içeren 35U20K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 85
Şekil A.28 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %1,0 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren 35U10K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 85
Şekil A.29 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %0,5 uzun lif ve %1,5 kısa lif içeren 35U05K15 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 86
Şekil A.30 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %2,0 kısa lif içeren 35U00K20 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri. 86

PVA LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Gevrek bir malzeme olan betona karışım sırasında lif ilave edilmesiyle daha sünek bir yapı oluşturularak betonun bazı mekanik özelliklerinde iyileşme beklenir. Lifler; tipi, boyutu, narinlik oranı (boy/çap), geometrisi, miktarı , çekme dayanımı, yüzey özellikleri ve lif-matris aderansı gibi birçok parametreye bağlı olarak betonda dayanımı, çatlak kontrolünü, şekil değiştirme kapasitesini, darbe dayanımını ve durabiliteyi arttırır.

Lifler malzemelerin en geliştirilmiş halidir, dayanımları ve elastisite modülleri genellikle aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre çok büyüktür. Farklı özellikleri ve kullanım alanları bakımından birçok lif türü vardır. Betonun kırılma mekanizması ilk çatlağın oluşmasıyla tamamlanmaktadır. Kısa ve rastgele dağıtılmış liflerle donatılandırılmış betonda ise kırılma mekanizması birçok paralel çatlağın oluşması ile tamamlanır. Beton içinde, gerek priz anında oluşan mikro çatlaklar gerek içsel gerilmelerden oluşan çatlaklar, eleman çalışmaya ve yük almaya başladıktan sonra büyümeye başlayacaktır. Çatlak, beton içinde ilerlerken liflerle karşılaştığında, çatlağın ilerlemesini sağlayan gerilme enerjisi liflere aktarılacak ve lifler tarafından karşılanmaya başlayacak, lif bu enerjiyi karşılayamadığı anda ya kopacak ya da betondan sıyrılacaktır. Lif koptuktan ya da sıyrıldıktan sonra, gerilme enerjisi tekrar betona aktarılacak, çatlak bir sonraki lifle karşılaşıncaya kadar ilerlemeye devam edecektir. Bu işlem yük arttıkça tekrarlanacak ve elemanda paralel çatlaklar oluşacaktır. Nihai kırılma gerçekleşinceye kadar elemanda oluşan paralel çatlaklar elemanın sünekleştiğinin göstergesidir.

Yapılan bu çalışmada, polivinil alkol (PVA) lifler ile üretilmiş çimento bağlayıcılı kompozitlerin, özellikle eğilme altındaki davranışı olmak üzere, mekanik özellikleri araştırıldı. Özellikle farklı fiziksel özelliklerdeki PVA liflerin birlikte (hibrit) kullanılması ile, çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerinin ne derece etkilendiği sistematik olarak incelendi. Çalışma kapsamında su/bağlayıcı oranı 0,20 olan ve 0,35 olan 2 farklı çimento esaslı karışım tasarlandı. Her iki karışım içinde PVA lif yüzdeleri %0,5, 1,0, 1,5, 2,0 oranlarında değişen 14 karışım tasarlandı. Ayrıca her iki su/bağlayıcı oranından lifsiz kontrol serisi harçlar üretildi. Kompozitler 28 gün laboratuvar ortamında kürlendikten sonra sertleşmiş numune üzerinde; kompozitin eğilme davranışını belirlemek amacıyla dört noktalı eğilme deneyi, basınç dayanımını belirlemek için basınç deneyi ve darbede enerji yutma dayanımını belirlemek amacıyla charpy impact darbe deneyi uygulandı.

Deneysel çalışmalar neticesinde, yalın harca PVA lif ilave edilmesinin yalın harcın işlenebilirliğini düşürdüğü görüldü. PVA lif donatılı harçlar ve yalın harçlar kıyaslandığında PVA liflerin basınç dayanımını yüksek oranlarda arttırdığı sonucu elde edildi. Ancak kısa lifin %2,0 oranında karışıma ilave edildiği su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matriste işlenebilirlik değerinin çok düşük olması dolayısıyla kalıba zor

yerleştirilen numunelerin basınç dayanım değerlerinin yalın harca kıyasla düşük olduğu gözlendi.

Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde karışıma lif ilave edilmesi eğilme dayanımlarını düşürmektedir. Bunun sebebi, yüksek lif oranı ve matrisin vizkozitesinin de yüksek olmasına bağlı olarak liflerin matris içerisinde homojen dağılamamasıdır.

Karışımlardaki PVA lif miktarının artmasıyla darbe enerji yutma kapasiteleri artmaktadır. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu üretim serilerinin darbe enerji yutma kapasiteleri, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan üretim serilerine kıyasla genel olarak yüksek olduğu gözlendi.

Özgül kırılma enerjilerinin yalın matrise PVA lif ilave edilmesiyle yüksek oranlarda arttığı görüldü.

INVESTIGATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PVA FIBER REINFORCED CEMENT BASED COMPOSITS

SUMMARY

By adding fibers to the concrete, which is a brittle matter, increased ductility and better mechanical properties are expected. Fiber increases strength, crack (fracture control), capacity of strain , impact strength and durability of concrete depending on fibers type, size, slenderness ratio, geometry, quantity, tensile strength, surface characteristic and fiber- matrix bonding.

Fibers are the most enhanced state of the matter. It has greatly increased strength and modulus of elasticity compared to big volumed form of the matter. Fibers have many varaities depending on characteristic of fiber and usage area. Mechanism of concrete fracture is completed by the first crack occuarance. In short and randomly distributed fibers equipped concrete fracture mechanism is completed with many parallel cracks. In concrete, micro-cracks, which exist at hardened areas and cracks formed by internal stress will begin to grow after receiving load.

When crack encounter fibers in concrete, it will transfer stress energy that allows the crack progress, to the fibers. Fibers will be broken or stripped from concrete when the stress energy exeeds their strength. The stress energy will be transferred back to the crack and crack will progress until encountering next fiber. This process will be repeated while the load increases and many parallel cracks will occur on the element. These cracks show that the elements ductility has been increased.

In this study, the mechanical properties, especially the behaviour under flexural loads of cement composites containing polyvinyl alcohol (PVA) fibers with various ratios and fiber types has been investigated. For this purpose, two different mixtures with water to binder ratios 0,20 and 0,35 has been selected. For these mixtures, PVA fiber volume ratios were selected as %0,5, %1,0, %1,5 %2,0. Referance mixtures, not containing fiber reinforcement has also been prepared. All the samples have been kept in 22^{o}C water curing tank until the age of testing. Tests were performed at 28 days of age. For determining the flexural behaviour of the composits, four point bending test was chosen. The compressive tests were performed on 7x7x7cm cubic specimens. Charpy impact tests were also performed for determining impact energy absorption capacity of the composites.

Workability tests made on fresh mortar mixtures has shown that, especially for higher fiber volume fractions, PVA fiber addition to plain mortar has significantly decreased the workability of the mortars. From the point view of compressive strength, increasing PVA fiber volume fraction has increased the compressive strength of mixtures. However, the mixtures with water to binding ratio of 0,20 and PVA fiber content of %2,0 by volume has given lower compressive strength compared to plain mortar. This result has been explained by this mixture's low workability property.

Flexural strength of mixtures with water to binder ratio of 0,20 has decreased by addition of PVA fiber. This result was attributed to high volume fraction of fiber and high matrix viscosity which obstruct homogeneous distribution of the fiber.

For all mixtures, increasing PVA fiber volume fraction in the mixtures has also increased the impact energy absorption capacity of the PVA composits. It has been shown that the impact energy absorption capacity of the mixtures with water to binder ratio of 0,35 is generally higher than the mixtures with water to binder ratio of 0,20.

The specific fracture energy of composits has also been increased with increasing PVA fiber volume ratio.

1. GİRİŞ

Günümüzde son derece yaygın bir yapı malzemesi olarak kullanılan beton, düşük maliyeti, kolay bulunabilirliği ve yüksek basınç mukavemeti gibi avantajlara sahip olmasına rağmen, düşük çekme dayanımına ve gevrek bir yapıya sahip olması gibi bazı önemli dezavantajları vardır.

Son yıllarda beton üzerinde yapılan yoğun araştırmalar sonucunda, betonun yüksek basınç dayanımının yanında, çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve sünekliğini de artırmak için beton bünyesine lif katılması fikri geliştirildi. Betonun bünyesine çelik lif gibi metalik lifler, cam elyafı gibi yapay lifler veya şeker kamışı posası gibi doğal kaynaklı lifler de katılabilmektedir. Bu lif türlerinin birbirine göre birçok avantajları ya da dezavantajları olmakla birlikte, lif donatılı betonlar ile ilgili yayınlar incelendiğinde, lif donatılı betonların, özellikle eğilme dayanımı, darbe dayanımı, tokluk, enerji yutma kapasitesi ve süneklik gibi mekanik özelliklerine büyük oranda katkıda bulunduğu görülür.

Lif donatılı betonlar, günümüzde yol kaplamaları, endüstriyel döşemeler, su yapıları, tüneller, köprüler, patlamaya dayanıklı askeri yapılar, uçak pistleri, beton borular ve ön dökümlü beton elemanlar gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

PVA lifler diğer organik liflere kıyasla yüksek dayanıklılık ve elastisite modülü değerine sahiptir. PVA lifler yüksek çekme dayanımları ve elastisite modülleri ile çatlak ilerlemesine karşın çok iyi peroformans gösterirler. PVA lifler yüksek derecede lif-matris aderansı gösterirler ve üretim esnasında liflerin yüzeylerinde yapılacak deformasyonlar ile lif-matris aderansının daha da güçlü kılınması mümkündür.

Bu çalışmanın amacı; PVA lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerde farklı su/bağlayıcı oranının, karışımdaki lif yüzdesinin, lif çeşidinin değişiminin ve liflerin hibrit kullanılmasının kompozitlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini inceleyerek matris özelliklerinin, lif çeşidinin, lif miktarının ve liflerin hibrit kullanılmasının kompozitin mekanik davranışı üzerindeki etkisini belirlemektir.

Bu amaç doğrultusunda, su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu 2 farklı PVA lif çeşidinin değişen miktarlarda ayrı ayrı ve birlikte kullanıldığı 15 farklı karışım tasarlandı. Su/bağlayıcı oranı 0,35 oranına çıkarılarak aynı lif çeşidi ve miktarlarında bu 15 karışım tekrararlandı. Karışımlardan alınan numunelere, basınç dayanım deneyleri, dört noktalı eğilme deneyleri ve charpy impact darbe deneyi uygulandı. Deneyler sonucunda numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları, eğilme etkisinde enerji yutma kapasiteleri ve darbe enerji yutma(Charpy Impact) kapasiteleri incelendi ve liflerin hibrit kullanım durumuna, lif çeşidine, lif miktarına ve bağlayıcı matrisin su/bağlayıcı oranına göre oluşan değişimler araştırıldı.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Tarihçe

Beton agrega, çimento, su ve gerekli olduğu durumlarda çeşitli kimyasal ve/veya mineral katkı maddelerinin de eklenerek bir arada karıştırılmasıyla elde edilen ve zamanla sertleşerek dayanım kazanan bir yapı malzemesidir [1].

Beton ve harçların yapı malzemesi olarak kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. Tarihte ilk harç uygulamalarında bağlayıcı malzeme olarak kil kullanılmıştır. Bilindiği gibi kerpiç; balçık, kil bağlayıcı malzeme kullanılarak yapılan ilk yapı malzemelerindendir ve dünyanın pek çok yöresinde, ülkemizde de halen kullanılan bir yapı malzemesidir. Daha sonra, alçı, kireç gibi bağlayıcıların üretilmesiyle, Eski Mısır' da alçının, Eski Roma' da kireç ve puzolanların, daha sonraları Avrupa' da grapye ve su kirecinin harç yapımında kullanıldığı görülmektedir. Yüzyıllar boyunca Anadolu ve çevresinde kullanılan Horasan harcı da kireç esaslı taneli bir kompozit malzemedir.

Betonun tarihi Eski Roma Dönemi' ne kadar gider. Romalılar, kireç, volkanik küller ve tüfler kullanılarak elde ettikleri, havada ve suda katılaşma özelliğine sahip olan su kireci (hidrolik kireç) ve agrega ile beton diye tanımlanabilecek malzemeler yapmışlardır. Kireç ile puzolanik maddelerin karışımının bağlayıcı olarak kullanıldığı ve ‘‘opus caementicium’’ adı verilen malzeme yolların ve yapıların inşasında kullanılmıştır.

Günümüzdeki anlamıyla beton ile ilgili çalışmalar, XIX.yüzyılın başlarında başlamıştır. Çimentoyla ilgili çalışmaların ilerlemesi ve 1824 yılında Portland Çimentosunun üretilip, patentinin alınması, bu alanda dönüm noktasını oluşturmaktadır.

İlk çağlardan beri insanlar kırılgan malzemenin içine bitkisel veya hayvansal kaynaklı lifler koyarak, bu kırılganlık özelliğinin giderilmesine çalışmışlardır. Bu konuda en iyi örneklerden biri kerpiç malzemedir. Kerpiç üretiminde, killi çamur

içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi bitkisel sap ve lifler, malzemenin gerek üretim, gerek kullanım sırasındaki dayanımını arttırmaktadır [2].

Lifli betonlar, normal veya yüksek dayanımlı betonlara lif eklenmesiyle elde edilen kompozit malzemelerdir. Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polipropilen, karbon ve alkali dirençli cam liflerdir. Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özelik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır. Üniform bir şekilde dağılan lifler, beton içerisinde oluşan çatlakları önlemekte ve çatlakların beton içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanıklı hale getirmektedir. Bu özeliğinden dolayı lifli betonun özellikle çekme ve eğilme dayanımını artıran faktörler, darbe etkisine karşı dayanımını da artırırlar [3].

2.2 Çimento

Çimento, esas olarak, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Genel çimentolar TS EN 197-1 de "CEM çimentosu" olarak adlandırılır. Ayrıca bir klinker standardı olmadığı için, klinkerde aranan özellikler de çimento standardının içine alınmıştır. Bu tanımlamalar şöyle özetlenebilir:

2.2.1 Türk Standartlarında Yer Alan Çimentolar

CEM çimentosu: hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu meydana gelen ve içindeki reaktif CaO ve reaktif SiO_2 toplamının kütlece en az %50 olması gereken çimentodur. Bileşimi portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılardan oluşabilir.

Portland Çimentosu Klinkeri: kalker ve kil gibi hammaddelerin CaO, SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3 gibi oksitlerini içeren, hassas bir orantı ile birleştirilip ince öğütülmüş karışımının döner fırında 1400-1500 ºC sıcaklıkta sinterlenmesi sonucu elde edilen yaklaşık 1-3 mm çapında granüle malzemedir. Kütlece en az 2/3 oranında kalsiyum silikat içermeli, CaO/SiO_2 orantısı 2 den az olmamalıdır. Ayrıca MgO içeriği en fazla %5 olarak sınırlanmaktadır.

TS EN 197-1 standardı genel amaçlı çimentoları (CEM çimentoları) 5 ana tip içerisinde toplanmaktadır:

1- CEM IPortland Çimentosu

2- CEM IIPortland Kompoze Çimento

3- CEM IIIPortland Yüksek Fırın Cüruflu Çimento

4- CEM IVPuzolanik Çimento

5- CEM VKompoze Çimento

2.2.2 Çimentonun Ana Bileşenleri

Klinker ile tabloda belirtilen ve miktarları kütlece %5' in üzerinde olan ana bileşen katkılardır.

Tiplerin ve çimento ana bileşenlerinin belirlenmesinde aşağıdaki semboller kullanılmıştır.

A: Çimentonun En Az Mineral Katkı İçeren Tipi

B: Çimentonun A Tipinden Daha Fazla Mineral Katkı İçeren Tipi

C: Çimentonun B Tipinden Daha Fazla Mineral Katkı İçeren Tipi

K: KlinkerS: Granüle Yüksek Fırın Cürufu

D: Silis DumanıP: Doğal Puzolan

Q: Doğal Kalsine Edilmiş PuzolanV: Silisli Uçucu Kül

W: Kalkersi Uçucu KülT: Pişmiş Şist

L: Kalker (TOC< %5)LL: Kalker (TOC< %2)

Minör İlave Bileşen: Her çimento tipine kütlece % 0-5 arasında bir minör ilave bileşen katılabilmektedir. Bu madde o çimentoda ana bileşen olarak kullanılmamış bir mineral katkı veya çimento özelliklerini iyileştirecek başka bir inorganik madde olabilmektedir.

Bileşim Oranları: Aşağıdaki tabloda çimento tipleri için verilen bileşim yüzde değerleri klinker, ana bileşen katkı ve minör ilave bileşen katkıların toplamı esasına göredir. Yani bunların toplamı 100 olmalıdır. Katılacak kalsiyum sülfat 100' e ilave edilecektir. Miktarı kütlece %5' i geçen katkılar ana bileşen olarak kabul edilecektir.

Dayanım Sınıfları: Çimentolar için 3 standart dayanım sınıfı belirlenmiştir. 32.5, 42.5 ve 52.5, bu değerler TS EN 196-1' e göre tayin edilen ve MPa olarak ifade edilen 28 günlük basınç dayanımları ile ilişkilidir. TS EN 197-1 de karakteristik değerler olarak belirtilmişlerdir [4].

2.3 Agregalar

Betonda kullanıma uygun taneli mineral malzemelere agrega denir. Agregalar, doğal, yapay veya daha önce yapıda kullanılmış malzemelerden tekrar kazanım yoluyla elde edilmiş olabilir [5].

Agregalar, çimentonun hidratasyonu sırasında meydana gelen rötre nedeniyle betonda meydana gelebilecek hacim değişikliklerini önlemenin yanı sıra, betonun maliyetini de düşüren, ucuz bir dolgu malzemesidir. Beton üretiminde kullanılan agregaların özelikleri, plastik kıvamdaki taze betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilediği gibi sertleşmiş betonun dayanım, dayanıklılık ve yoğunluk gibi başlıca karakteristik özeliklerini de belirler. Agregaların betonun teknik özeliklerine olan katkıları şu şekilde özetlenebilir:

1. Çimento hamurunun zamana bağlı olarak gösterdiği hacim değişikliğini önemli ölçüde engeller.

2. Beton agregaları genellikle sert ve dayanımı yüksek malzemeler olduğundan, betonun dayanımının ve dayanıklılığının da yüksek olmasını sağlar [1].

2.4 Yüksek Fırın Cürufu

Cüruflar çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Örneğin, yüksek fırın cüruflarının kendi başına bağlayıcı özelliği olmasına karşın nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzolanik özellikleri vardır.

Cüruflara çimento ve beton sektörlerinde çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. Konvansiyonel çelik üretim teknikleri ile elde edilen cüruflar kristal yapıya sahip kütleler olarak ortaya çıkar. Bu tür cüruflar ya hiç kullanılmaz ve atılırlar yada yol malzemesi veya beton agregası olarak kullanılırlar. Buna karşılık, modern teknoloji ile çelik üretimi yapılan tesislerde camsı yapıya ve bir miktar

hidrolik özelliklere sahip olan cüruflar elde edilir. Bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkün olmaktadır. Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır [6].

2.4.1 Cüruf Kullanımının Taze Beton Özelliklerine Etkisi

Yüksek fırın cürufunun, klinkere göre, daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının daha düşük olması, dolayısı ile hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi cüruflu çimentoların betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkileyeceğinin göstergeleridir. Ancak, bu iyileşme çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenmez [6].

2.4.2 Cüruf Kullanımının Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi

Eşit çimento miktarı ve eşit su-çimento oranları söz konusu olduğunda cüruflu çimentolar normal portland çimentolarına göre, erken yaşlarda nispeten düşük, geç yaşlarda ise yüksek beton dayanım değerlerine neden olurlar. Buradan anlaşılacağı gibi, eşdeğer 28 günlük beton dayanımları söz konusu olduğunda beton karışımlarında cüruflu çimento miktarı normal portland çimentosu miktarına göre biraz daha fazla olmalıdır. Bu durumda, geç yaşlardaki dayanımlar cüruflu çimento ile yapılmış betonlarda çok daha yüksek olmalıdır [6].

2.5 Nano Silika

Uzun zamandır beton üretiminde kullanılan geleneksel maddelerin yerini gelişen teknolojiyle birlikte nano materyaller almıştır. Yapılan çalışmalarda da görülmüştür ki fizik ve kimya dallarının işbirliğiyle ortaya çıkan nano materyallerle üretilen beton, geleneksel yollarla üretilen betona göre hem daha iyi bir performans göstermiş hem de daha ucuza üretilmiştir.

Bir çimento hamuru, hidrate olmuş kalsiyum silikat jellerinin küçük tanelerinden, nano ölçekli bireysel gözeneklerden, kılcal gözeneklerden, hidrate olmuş ürünlerin büyük kristallerinden oluşur. Bu yüzden, çimento hamurunun boşluklarını doldurmak amacıyla nano fazlı malzemeler için bir hücre olmalıdır. Puzolanın temel bileşeni olan amorf veya camsı nano ölçekli silika, kalsiyum silikatın hidratasyonundan oluşan kalsiyum hidroksitlerle reaksiyona girer. Puzolanik tepki hızı Blaine incelik değeri ile doğru orantılıdır. Bu nedenle nano-SiO_2, 40 μm parçacık boyutu olan ve 60

m^2/g Blaine incelik değeri olan %99,9 SiO_2 ile beraber kullanılan parçacık formlu bir malzemedir.

Nano Silika İle Üretilen Betonun Özellikleri;

- Yüksek basınç dayanımına sahip betonlarda, nano silika ile üretilmiş beton, mikro silika ile üretilene göre %88 daha etkilidir.
- Nano silika ile beton üretim maliyeti, geleneksel metodlara ve formüllere göre üretilen betona göre büyük ölçüde daha düşüktür.
- Nano silika ile üretilen beton %0 ila %1 arasında hava içerir.
- Huni testi sonucu, betonun huni şeklini bir saatten fazla koruduğu görülmüştür. Su/çimento oranı = 0,5 olan, katkı olarak % 0,5 nano silika eklenmiş beton için örnek verilecek olursa, nano silika ile üretilmiş beton 60 cm çapındaki daire şeklini iki saat süreyle sadece %5'lik bir kayıpla korumuştur.
- 0,2 gibi azaltılmış su/beton oranında yüksek işlenebilirlik özelliği vardır.
- Kolay homojenleşme özelliğine sahiptir. Karıştırma süresinin kısalması nedeniyle, beton santralleri üretimlerini artırabilirler.
- Beton üretimindeki çimento miktarı ve betonun formülasyonuna bağlı olarak 1 günde 15 MPa ve 75 MPa arasında bir basınç dayanımı, 28 günde 40 MPa ile 90 MPa arasında bir basınç dayanımı, 120 günde ise 48 MPa ile 120 MPa arasında bir basınç dayanımı bu tür beton için elde edilmiştir.
- Nano silika çevre sağlığı ve insan sağlığını göz önünde bulunduran ISO 14001 yönetmeliğine tabidir. Beton üretiminde çalışan operatörleri silikoz gibi akciğer rahatsızlıklarından korur ve çevre için kirlilik teşkil etmez [7].

2.6 Kimyasal Katkılar

TS EN 206'da kimyasal katkılar "Taze veya sertleşmiş betonun bazı özelliklerini değiştirmek üzere, karıştırma işlemi esnasında betona, çimento kütlesine oranla az miktarda ilave edilen malzeme" olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım inert veya puzolonik mineral katkıları içermemektedir (silis dumanı gibi). Fakat bu maddeler kimyasal katkının içinde bulunabilir.

Kimyasal katkıların beton yapıların durabilitesi ve maliyetlerine katkıda bulunduğu artık herkesçe kabul edilmektedir. Kimyasal katkıların geliştirdiği özellikler betonun işlenebilirliği ve sıkıştırılmasında sağlanan kolaylıklar, sertleşmiş betonun geçirgenliğini azalma ve donma çözülme dayanımını artırma olarak sayılabilir.

Beton katkılarının performansı TS EN 934-2 tarafından tek fonksiyonlu katkıların ana fonksiyonlarına ve çift etkili katkıların ana ve ikincil fonksiyonlarına göre kontrol edilir [5].

2.7 Lifler Hakkında Genel Bilgiler

Lif, doğal kaynaklardan elde edilen, ya da insan eliyle üretilen, uzunluğu, bükülebilirliği, esnekliği ve dayanıklılığı olan hammaddedir. Uygulamada kullanılan doğal ve yapay lifler vardır. Hayvan, bitki, mineral gibi doğal kaynaklardan elde edildiği biçimi ile doğrudan kullanılabilen hammaddeler 'doğal lifler' dir. 'Yapay lifler' ise, aranan belirli özelikleri taşıyacak biçimde özel olarak geliştirilen ve bu amaçla insan yapısı olarak üretilen malzemelerdir [8].

Liflerle donatılı kompozit malzeme, genellikle yeterli basınç dayanımına oranla çekme, eğilme, çarpma dayanımları çok düşük düzeyde kalan veya zayıf yapılı, kırılgan malzemenin zayıf olan yönlerinin iyileştirilmesi, kırılganlığın giderilmesi, malzemenin sünekleştirilmesi gibi amaçlarla, bu özelikleri iyileştirecek nitelikte liflerle donatılmasıyla üretilen kompozitlerdir. Bu tür kompozitler, matris fazını oluşturan malzeme ile fazın özeliklerine bağlı olarak, ''kırılgan matris ve sünek lifli kompozitler'' ile ''sünek matris ve kırılgan lifli kompozitler'' olarak iki grupta toplanmaktadır. Bu gruba giren endüstrinin çesitli alanlardaki üretimin yanı sıra, özelikle son yirmi beş yıldan beri yapı alanında da gitgide artış kaydeden bir uygulama olanağı bulmaktadır [2].

2.8 Lif Çeşitleri

Lifler malzemelerin en geliştirilmiş halidir, dayanımları ve elastisite modülleri genellikle aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre çok büyüktür. Farklı özelikleri ve kullanım alanları bakımından birçok lif türü vardır [8].

Lifler genel olarak şöyle sınıflandırılabilir [9]:

Doğal Lifler

- Hayvansal Lifler
- Bitkisel Lifler
- Mineral Lifler

Sentetik Lifler

- Polimer Lifler
- Metalik Lifler
- Seramik Lifler

Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler Çizelge 2.1'de görülmektedir [9,10].

Çizelge 2.1 : Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler [9,10].

Lif Cinsi	**Çekme Dayanımı (MPa)**	**Elastisite Modülü(10^3MPa)**	**Maksimum Uzama(%)**	**Özgül Agırlık(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
Yüksek Performanslı Polietilien	2700	120	5	0,97
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
PVA	880-1600	25-40	6-10	1,30

2.8.1 Metalik Lifler

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 ila 1,0 mm arasında değişmektedir. Uzunlukları ise genelde 20 ila 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 ila 60 mm arasındadır.

Çelik liflerin sertlikleri ve karıştırma sırasında bükülmeye karsı gösterdikleri yüksek dirençleri, diğer liflerle karşılaştırırken çelik liflerin narinliğini göz önünde bulundurmayı gerektirmektedir. Narinlik oranı, lifin boyunun çapına bölünmesiyle (L/d) bulunur. Çelik liflerin narinlik oranı 20 ile 250 arasında değişmektedir [11].

Türk standardı TS 10513/92 [12] ise çelik lifleri şekillerine göre şu şekilde sınıflandırmaktadır:

- A: Düz, pürüzsüz yüzeyli 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.

C sınıfı lifler sonlarındaki kancalara göre;

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

2.8.2 Polimerik Lifler

Polimer lifler çok geniş uygulama alanları ve çeşitleri olan bir lif türüdür [13]. Polimerik lifleri doğal ve sentetik olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür. Doğal polimerik lifler, pamuk, sisal, hint keneviri gibi bitkisel kökenli yada yün, deri gibi hayvansal kökenli liflerdir. Sentetik polimerik liflerin başlıcaları ise polipropilen, naylon, polietilen, aramid ve perlondur [14].

Polipropilen lifler, aynı zamanda çimento esaslı malzemelerin takviyesinde de kullanılabilir. Fakat liflerin kullanım miktarı genelde çok düsüktür (% 0,5 ile %10 arası). Harç ve betona lif katılmaya başlamasının nedeni; lifin malzemenin çekme ve

darbe dayanımını arttırması ve çatlak oluşumundan sonra sünek bir yapı göstermesidir [15].

Bazı polimer liflerin fiziksel özelikleri Çizelge 2.2'de verilmistir.

Çizelge 2.2 : Polimer liflerin fiziksel özelikleri.

Lif Tipleri	Etkili Çap (10^{-3} mm)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	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
Polyester	-	1,34-1,39	896-1100	17,5	-
Polietilen	25-1020	0,96	200-300	5	3
Polipropilen	-	0,90-0,91	310-760	3,5-4,9	15

2.8.3 Mineral Lifler

En bilineni cam lifler olup, sertlik, dayanıklılık ve diğer malzemelerle fazla tepkimeye girmeme gibi özelikleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Esnek, hafif ve pahalı olmayan bu malzemeler genelde çimento hamuruna veya harç karışımlarına katılarak kullanılır. İri agregalı betonda pek kullanılmaz [14].

2.9 Liflerin Beton Takviyesinde Kullanımı

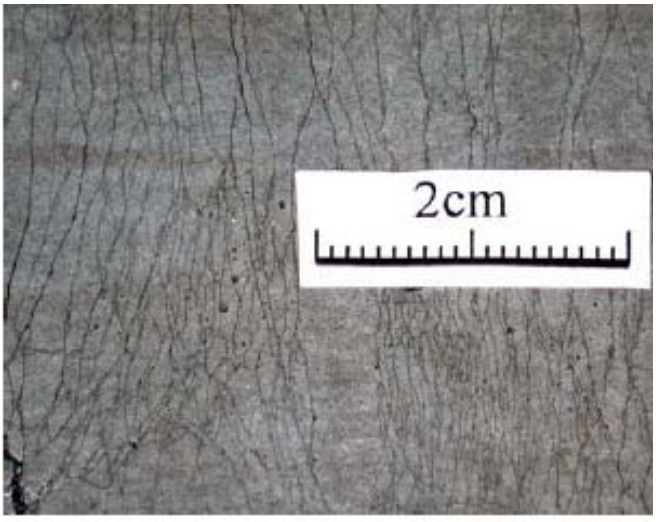
Betonda lif kullanımının başlıca yararları şu şekilde sıralanabilir; 1) Yüksek taşıma kapasitesine sahip, sünek bir beton elde edilmesi, 2) Donatı korozyonunun önlendiği düzgün yüzeyli beton üretimi, 3) Etkin çatlak kontrolü, 4) Dayanıklılık, 5) Donatı işçiliğindeki önemli azalma [3].

Gevrek bir malzeme olan betona karışım sırasında lif ilave edilmesiyle daha sünek bir yapı oluşturularak betonun bazı mekanik özelliklerinde iyileşme beklenir [10].

Çimento esaslı kompozitler, plastik şekil değiştirme esnasında eşsiz bir özellik gösterirler, birçok küçük çatlak oluşması ile tek bir çatlağın genişlemesi kontrol edilmiş olur. İlk çatlak oluşumundan sonra yük taşıma kapasitesi şekil değiştirmenin

devam etmesine rağmen hala artmaktadır [15]. Betonun kırılma mekanizması ilk çatlağın oluşmasıyla tamamlanmaktadır. Kısa ve rastgele dağıtılmış liflerle donatılandırılmış betonda ise kırılma mekanizması birçok paralel çatlağın oluşması ile tamamlanır. Beton içinde, gerek priz anında oluşan mikro çatlaklar gerek içsel gerilmelerden oluşan çatlaklar, eleman çalışmaya ve yük almaya başladıktan sonra büyümeye başlayacaktır. Çatlak, beton içinde ilerlerken liflerle karşılaştığında, çatlağın ilerlemesini sağlayan gerilme enerjisi liflere aktarılacak ve lifler tarafından karşılanmaya başlayacak, lif bu enerjiyi karşılayamadığı anda ya kopacak ya da betondan sıyrılacaktır. Lif koptuktan ya da sıyrıldıktan sonra, gerilme enerjisi tekrar betona aktarılacak, çatlak bir sonraki lifle karşılaşıncaya kadar ilerlemeye devam edecektir. Bu işlem yük arttıkça tekrarlanacak ve elemanda paralel çatlaklar oluşacaktır. Nihai kırılma gerçekleşinceye kadar elemanda oluşan paralel çatlaklar elemanın sünekleştiğinin göstergesidir. Normal beton ile lifli betonların yük deplasman eğrisine bakıldığında, ilk çatlak oluştuktan sonra normal beton derhal kırılacak, ancak lifli beton yük almaya devam edecek, hatta eğilme dayanımının artığı görülecektir [15].

Şekil 2.1'de kesikli PVA lif donatılı numune üzerinde yukarıda izah edilen paralel çatlaklar gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : PVA lifli çimento esaslı kompozitte eksenel çekme altında birçok küçük çatlak oluşumu [16].

Liflerle donatılı harç ve betonların üretiminde genelde üç temel yöntem kullanılmaktadır. Bunlar ön karıştırma, püskürtme ve fitil veya örgü elyaf kullanma yöntemleridir. Ön karışım yapılması halinde, kompozit içinde lifler serbest ve üç

boyutta olmak üzere gelişigüzel dağılmaktadır. Püskürtme yönteminde ise matrise püskürtülen lifler, kesitte düzlemde dağınık olarak yer almaktadır. Fitil ve örgü lif kullanılması halinde ise, donatı bir yönde ve sürekli olmaktadır [17].

Rasgele dağıtılmış kısa liflerle donatılandırılmış çimento pastası ya da beton karışımları, normal betondan farklı olarak, sadece çimento, kum, su, lifler ve çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak imal edilirler.

Rasgele dağıtılmış kısa liflerle donatılandırılmış betonların ya da kompozitlerin iki türlü uygulaması vardır: 1) kısa lifler rasgele çimento pastasının içine karıştırılır, agrega, kum gibi betonu oluşturan malzemelerden biri olarak kullanılır ve bununla oluşturulan yapı elemanı geleneksel olarak donatılandırılır, 2) rasgele beton içine karıştırılmış lifler doğrudan donatı olarak kullanılır, başka bir donatı kullanılmaz [18].

2.10 Lif Özelliklerinin Kompozit Özelliklerine Etkisi

Lif Takviyeli Kompozitlerin performansı; kullanılan liflerin geometrisi, boyu, karışımda kullanılan yüzdesi, narinlik adı verilen boy/çap oranı, hangi maddeden üretildiği ve üretim teknikleri gibi özeliklere bağlıdır. Bu yüzden lif takviyeli kompozitler üretilirken bu özeliklerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir [2].

2.10.1 Lif Geometrisinin Etkisi

Taze beton karışımında liflerin topaklanması ve liflerin varlığından dolayı islenebilirliğin azalması, özelikle yüksek oranda lif içeren karışımlarda sorun yaratır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, suda eriyebilen ya da mekanik etkiler ile kopabilen bir yapıştırıcı ile 10-30 adet lifin birbirine yapıştırılması yoluna gidilmiştir. Böylece işlenebilirlik artar ve liflerin topaklanması önlenir. Bu yöntem sayesinde taze beton karışımının islenebilirliği çok az düşer. Daha sonra da karıştırma sırasında yapıştırıcının çözülmesi ile her bir lif karışım içinde dağılır [19].

2.10.2 Lif Boyunun Etkisi

Uzun lifler mikro çatlaklar bölgesinden uzakta iseler oluşan mikro çatlakları önleyemezler; ancak mikro çatlaklar makro çatlaklara dönüşürse uzun lifler işlev görmeye başlar ve kompozitin tokluğunu artırırlar. Buna karşılık kısa lifler mikro çatlaklar arasında köprü görevi görürler; bunlar aynı hacimsel yüzdede kullanıldıkları

durumlarda dahi birbirine daha yakın mesafede olacaklardır. Kısa lifler çekme dayanımını çok artırırlar [20].

2.10.3 Lif Narinlik Oranı ve Lif Yüzdesinin Etkileri

Narinlik oranı, lifleri tanımlayan en önemli parametrelerden biridir. Lif uzunluğunun yuvarlak kesitli lifler için çapa (l/d), yuvarlak olmayanlar içinse eşdeğer çapa (l/dc) bölünmesiyle bulunur. Bu oran 40 ila 1000 arasında değişir ama genelde 300' den daha düşüktür [21]. Narinliğin artmasıyla beraber, mekanik performans artsa da, yerleştirmede ve karıştırmada karşılaşılan problemler dolayısıyla, bu değerin 100 gibi bir değerle sınırlandırılması önerilmektedir [22].

Üretimde kullanılan lif içeriği de optimum bir değerin üzerine çıkmamalıdır. Lif içeriğinin yüksek olması durumunda karıştırma ve yerleştirme problemleri ortaya çıkar ve lifler karışım içerisinde topaklanır. Bu topaklanmalar matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olur. Karışımda iri taneli agrega kullanılmaması, lif narinlik oranının optimum bir değerde olması, liflerin karışıma kuru katılması ve süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile liflerin matris içerisinde homojen dağılması sağlanabilir [23].

2.11 Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri

Lif takviyeli çimento esaslı kompozitler, kompozit malzemelerin önemli bir grubunu oluşturmaktadırlar. Bilindiği gibi her malzeme çeşitli olumlu ve olumsuz özeliklere bir arada sahiptir. Tasarımcı ve üretici, amaçlarına uygun malzemeyi seçerken, bilinçli ya da bilinçsiz olarak birbirine seçenek oluşturan malzemeler arasında, nitelikleri her yönüyle değerlendirilerek, içinde bulunulan koşullar altında en uygun malzemeyi seçmeyi hedeflemektedir. Kompozit malzeme üretimi mevcut temel malzemelerin olumsuz yanlarının iyileştirilmesi ve böylelikle kullanım alanının genişletilmesi, çok yönlü kullanımın sağlanması yönünde önemli bir adımı oluşturmaktadır [24].

ASTM C 1116-97' ye [25] göre lif takviyeli betonlar 3' e ayrılmaktadır:

Tip1: Çelik Lif Takviyeli Betonlar (SFRC): Paslanmaz çelik, çelik alaşımı veya karbon çeliğini içerir.

Tip 2:Cam Lifi Katkılı Betonlar (GFRC): Alkaliye karşı dirençli camları içerir.

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

2.11.1 Çelik Tel Donatılı Betonların Genel Özellikleri

Çelik tel donatılı betonlar, geleneksel betonlarla mukayese edildiğinde, daha yüksek süneklik, tokluk, eğilme dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesi gibi üstün mekanik özelikleri nedeniyle, günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Çelik tel donatılı betonlar, hemen her türlü inşaat projesinde kullanım alanı bulabilmeleri nedeniyle de yine en yaygın olarak kullanılan lif donatılı beton türlerinden birisidir [26].

Çelik lif takviyeli betonun mekanik özelikleri; lifin boyu, şekli ve beton içerisindeki miktarı, liflerin narinlik oranı, çimento cinsi ve miktarı, numunelerin boyutu, sekli, hazırlanma metotları, su/bağlayıcı oranı, kullanılan agreganın cinsi ve tane dayanımı ile yakından ilgilidir. Ayrıca, ısıl işlem uygulamasının da lifli betonun mekanik özeliklerine etkisi büyüktür. Bu tip etkenler deney sonuçlarını büyük ölçüde etkiler ve normal betonun zayıf olan bir çok özelliğini iyileştirerek performansını arttırır. Bu iyileşmeler genel olarak Çizelge 2.3'de görülmektedir.

Çizelge 2.3 : Lif takviyeli betonların bazı özeliklerinde matris malzemesinin özeliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri [24].

Betonun Özelliği	**Artış%)**
Tokluk	100-1200
Darbe Dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Çekme Dayanımı	25-100
Basınç Dayanımı	±25
Yorulma Dayanımı	50-100
Şekil Değiştirme Oranı	50-300
Eğilme Çekme Dayanımı	25-200
Kavitasyon-Erozyon Direnci	200-300
Elastisite Modülü	±25

2.11.2 Cam Elyaf (GF) Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri

Cam lifler; sertlik, korozyona dayanıklılık ve diger malzemelerle fazla tepkimeye girmeme gibi tipik cam özeliklerini sergiler. Ayrıca, esnek, hafif ve pahalı olmayan

bir malzemedir. Bu özelikler, cam liflerini düsük maliyetli endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen lif tipi yapmaktadır. Cam lifler yüksek dayanıma sahip olduklarından, lif yüzeyinde olusan kusurlar hem sayıca az, hem de boyutça küçüktür.

Cam liflerin özelikle E tipi, beton ve çimento gibi alkalin içeren ortamlarda kullanılması zamanla korozyona neden olabilir, bu yüzden cam liflerin bu uygulamalarda kullanılması istenmez. CEM-Fil diye adlandırılmıs olan, alkali etkisine dirençli nitelikteki cam liflerini üretmesi, cam lifi donatı alanında bir dönüm noktası olusturmustur. Bundan sonra, beton ve harçların donatılmasında, bu özel cam lifleri kullanılmaya baslamıstır. Bazı önemli cam liflerinin tipik özellikleri çizelge 2.4'de verilmiştir [2].

Çizelge 2.4 : Bazı cam liflerinin tipik özellikleri [2].

Cam lifi tipi	**Özgül Agırlık (gr/cm^3)**	**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-FİL	2,70	-	80

Cam Lifi Takviyeli Betonlar (Glass Fiber Reinforced Concrete), alkaliye dayanıklı özel cam lifiyle güçlendirilmiş; yüksek dozajda çimento, ince agrega ve katkı malzemelerinin karıstırılmasıyla olusan kompozit malzemelerdir [27].

Cam lifi takviyeli betonlarda, cam lifi kullanılması, malzemenin kırılma sırasında gevrek davranış göstermesini engellemektedir. Cam lifi içermeyen numuneler gevrek bir şekilde kırılırken, cam lifi içeren numuneler yüksek miktarda enerji yutarak, kontrollü ve uzun sürede kırılmaktadır. Bu özelik ile kompozit malzemelerde karşılaşılan ve en önemli sorun olan gevrek davranış ortadan kalkar. Malzeme içerisindeki cam lifi miktarı arttıkça kırılma enerjisi, net egilme dayanımı ve karakteristik boy büyük oranda artmaktadır [2].

2.11.3 Polipropilen Donatılı Betonların Genel Özellikleri

Beton ve harçların donatılmasında kullanılan en yaygın yapay lif türü olan polipropilen lifler, ilk kez 1965 yılında, A.B.D.' nde patlamaya karşı dayanıklı askeri

yapıların inşasında kullanılmıştır. Polipropilen lifler oldukça yüksek dayanımları, betonun alkali ortamına çok iyi direnç göstermeleri ve düşük maliyetleri nedeniyle önemli bir donatı malzemesi özeliği taşımaktadır [28].

Beton matrisinin, polipropilen lifler kullanılarak donatılması uygulaması ilk kez 1965 yılında gerçekleştirilmiş olup, 1970'li yıllarda da polipropilen lif donatılı betonların büyük çapta üretimine geçilmiştir. Günümüzde, polipropilen lifler, betona hacimce %0,1 gibi oldukça düşük oranlarda katılmakta olup [28], öncelikli olarak rötre çatlaklarının engellenmesi amacıyla kullanılmaktadır [15,28]. Betonun yangına karşı dayanımını da arttırdığı da bilinmektedir [15].

Polipropilenin donatı malzemesinin yüzeyinin hidrofob özelliği dolayısıyla, lifler çimento bağlayıcılı matris malzemesinin içinde ıslanarak topaklanmamaktadır [17]. Polipropilen lif donatılı betonların işlenebilirlik özelikleri ile ilgili olarak yapılan deneysel çalışmalar, polipropilen liflerin, hacimce %2' ye varan miktarlarda, taze betonun işlenebilirlik özeliklerinde herhangi bir problemle karşılaşılmadan kullanılabileceğini göstermiştir. Polipropilen liflerin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisiyle ilgili olarak, bilim adamları arasında henüz kesin bir görüş birliğine varılmamış olsa da, polipropilen lif donatılı betonların basınç etkisi altındaki göçme mekanizmalarının ve göçme şekillerinin çok daha sünek bir karakter sergilediği kabul edilen bir gerçektir [3].

2.11.4 Naylon Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri

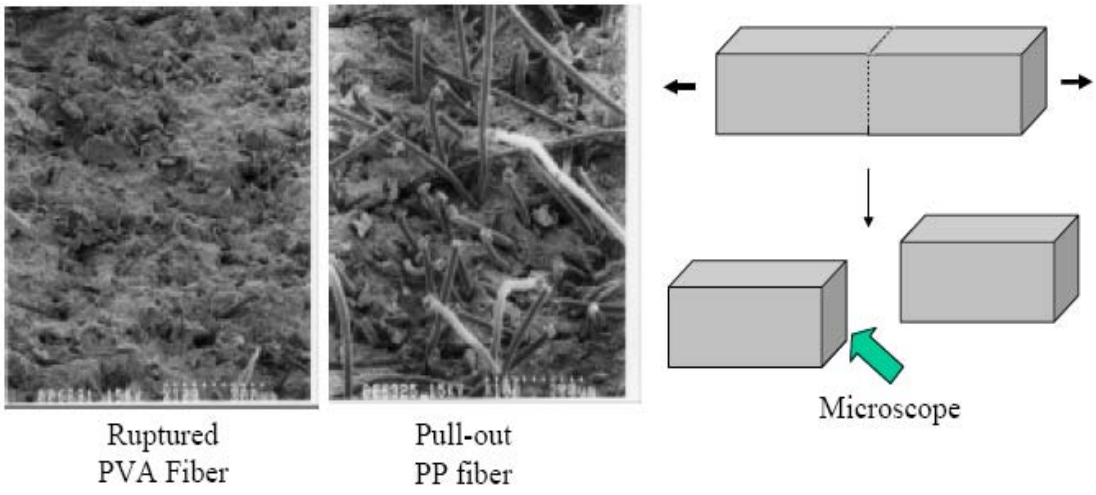
Naylon lifler, betonda dayanımı, sünekliği, durabiliteyi ve tokluğu artırmak için güçlendirici olarak kullanılmaktadır [29]. Naylon lifli betonların basınç dayanımlarında lifsiz betona kıyasla kayda değer bir artış görülmese de, diğer sentetik liflerin kullanıldığı betonlara kıyasla basınç dayanımları daha fazladır. Bunun nedeni naylon liflerin çekme dayanımlarının daha yüksek olması ve bunu kompozite aktarmaları ve beton içindeki dağılımlarının daha düzenli olmasıdır. Bunun yanı sıra naylon lifler çatlak oluşumundan sonra beton performansını hızlandırır ve yüksek gerilmeyi sürdürürler [30].

Beton içinde kullanıldıklarında, suyu emerek liflerin betonu içten dışa doğru kür etmesini sağlayabilirler. Ayrıca emilen bu su, lif ve beton arasında yapışmayı sağlar [29].

2.11.5 PVA Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri

PVA lif 50 yıl önce Japonya'nın ilk organik lifi olarak üretildi ve bu zamandan itibaren çeşitli uygulamalarda kullanıldı. Özellikle 1980'li yıllardan itibaren çimento esaslı kompozitlerin donatılandırılmasında kullanılmıştır.

PVA lifler diğer organik liflere kıyasla yüksek dayanıklılık ve elastisite modülü değerine sahiptir. PVA lifler yüksek eğilme dayanımları ve elastisite modülleri ile çatlak ilerlemesine karşın çok iyi performans gösterirler. PVA lifler yüksek derecede lif-matris aderansı gösterirler ve üretim esnasında liflerin yüzeylerinde yapılacak deformasyonlar ile lif-matris aderansının daha da güçlü kılınması mümkündür. Şekil 2.2'de PVA lifli ve Polipropilen lifli kompozitin kırıldıktan sonraki mikroskop görüntüsü görülmektedir. Polipropilen liflerin sıyrıldığı PVA liflerin koptuğu görülmektedir [10].



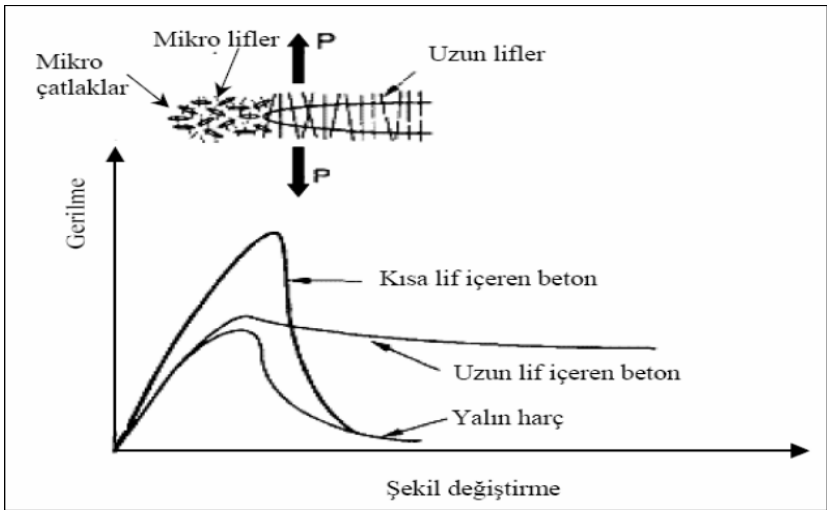
Şekil 2.2 : PVA lifli ve Polipropilen lifli kompozitlerin mikroskop altındaki görüntüsü [10].

PVA lif donatılı betonlarla ilgili olarak yürütülen çalışmalar neticesinde, bu betonların eğilmede çekme dayanımlarının yalın betonlara kıyasla oldukça yüksek olduğu, enerji yutma kapasitelerinin yüksekliği nedeniyle oldukça sünek bir davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir [28]. Ayrıca bir başka çalışmada, PVA lif donatılı betonların eğilmede çekme dayanımlarının ve donma çözülme çevrimlerine karşı dayanıklılıklarının çok iyi olduğu belirtilmiştir [16].

2.11.6 Karma Lif Donatılı Betonların Genel Özellikleri

Karma lif donatılı betonlar, geometri, boyut ve malzeme bakımından sadece bir tek tipte lifin kullanılmasından ziyade aynı malzemeden yapılmış farklı boyutlardaki

liflerin veya farklı malzemelerden yapılmış farklı boyutlardaki liflerin bir arada kullanılması esasına dayanılarak üretilen lif donatılı beton türleridir. Şekil 2.3'de mikro ve makro liflerin, mikro ve makro düzeydeki çatlakların köprülenmesi görülmektedir [28].



Şekil 2.3 : Mikro ve makro düzeydeki çatlakların köprülenmesi [3,28].

Mikro lifler;

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

Makro lifler ise;

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

2.12 Lif Donatılı Betonların Kullanım Alanları

Lif donatılı betonlar, günümüzde yol kaplamaları, endüstriyel döşemeler, su yapıları, tüneller, köprüler, patlamaya dayanıklı askeri yapılar, uçak pistleri, beton borular ve ön dökümlü beton elemanlar gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır [28].

Türkiye'de lifli beton aktif olarak asbestli çimento olarak güncel yaşamımıza girmiştir. Asbestin kanserojen olması dolayısı ile asbestli çimento çok hızlı bir şekilde yerini alternatif liflerle donatılandırılmış çimento ya da çimento karışımlarına bırakmıştır [18].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, üretimlerde kullanılan malzemeler ve özellikleri, üretilen çimento esaslı kompozitlern uygulanan deneyler ile bu deneylerin yapılışı hakkından bilgi verilmektedir.

3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1 Çimento

Bu çalışma için üretilen numunelerin tümünde Akçansa çimento fabrikasından temin edinilen CEM I 52,5 R/85 beyaz portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Çimentonun fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
Priz başlangıç süresi (dak.)	115
Hacim genleşmesi (mm)	1,0
Beyazlık (%)	85,3
2 Günlük Basınç Dayanımı (Mpa)	37,0
28 Günlük Basınç Dayanımı(Mpa)	60,0

Çizelge 3.2 : Çimentonun kimyasal bileşimi.

Bileşen		Değer
SO_3	(%)	3,45
Çözünmez kalıntı	(%)	0,16
Kızdırma kaybı	(%)	3,10
Çözünen $Krom^{+6}$	(ppm)	0,50
Klorür (CL^-)	(%)	0,011

3.1.2 Cüruf(GGBS)

Bu çalışmada kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu Betonsa hazır beton firmasından temin edildi. Cürufun fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'de verilmektedir.

Çizelge 3.3 : Cürufun fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2,91
Özgül Yüzey(cm^2/gr)	4370
0,045 mm, elekte kalıntı(%)	1,3
0,090 mm, elekte kalıntı(%)	0,0
0,200 mm, elekte kalıntı(%)	0,0

Çizelge 3.4 : Cürufun kimyasal özellikleri.

$CaCO_3 + MgCO_3$	(%)	0,30
H_2O	(%)	0,30
Çözünmeyen Kalıntı	(%)	-
SiO_2	(%)	46,12
Al_2O_3	(%)	9,21
Fe_2O_3	(%)	1,25
CaO	(%)	36,14
MgO	(%)	5,23
S	(%)	0,21
Na_2O	(%)	0,21
K_2O	(%)	1,24
Klorür(Cl^-)	(%)	0,0354
Kızdırma Kaybı	(%)	0,00

3.1.3 Agregalar

Çalışma kapsamında özgül ağırlığı 2650 kg/m^3 olan kuvars kumundan oluşan iki farklı max. dane boyutuna sahip agrega kullanılmıştır. Birinci agrega max. 500 μ, ikinci agrega ise max. 1200 μ dane boyutunda kuvars içermektedir.

3.1.4 Nano Silika

Üretimlerde Cembinder 8 markalı nano silika kullanıldı. Ürün kataloğunda yer alan bilgilere göre kullanılan nano silikanın fiziksel özellikleri Çizelge 3.5'te verildi.

Çizelge 3.5 : Üretimlerde kullanılan nano silikanının fiziksel özellikleri.

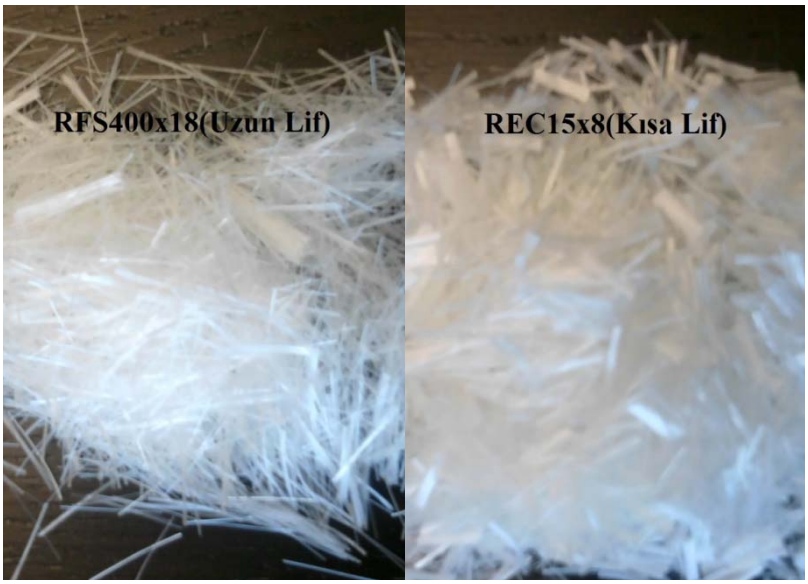
Yoğunluk(g/cm^3)	2,33
pH	9,5
Viskozite(cPS)	<15
Çözeltideki katı içeriği(%)	50
Görünümü	Donuk,kokusuz ve tatsız

3.1.5 PVA Lifler

Bu çalışmada Arkem Kimya San. ve Tic. A.ş'den temin edilen, ürün kodları RFS400x18 ve REC15x8 olmak üzere iki farklı tipte PVA lif kullanıldı. Bu liflerden RFS400x18 uzunluğunun 18 mm olması nedeniyle uzun lif, REC15x8 'in ise uzunluğunun 8 mm olması dolayısıyla tezin bu aşamasından itibaren kısa lif olarak anılacaktır. Bu liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında Arkem Kimya San. ve Tic. A.ş'den elde edilen bilgiler Çizelge 3.6'da verilmektedir. Ayrıca Şekil 3.1'de liflerin görünümü verilmektedir.

Çizelge 3.6 : PVA liflerinin fiziksel ve mekanik özellikleri.

	Çap (micron)	**Uzunluk (mm)**	**Çekme Dayanımı (GPa)**	**Elastisite Modülü (GPa)**
RFS400x18	200	18	1,0	30
REC15x8	40	8	1,6	42



Şekil 3.1 :Üretimlerde kullanıllan PVA lifler.

3.1.6 Kimyasal Katkı

Karışım dizaynında kıvama göre değişen oranlarda Polikarbosilik eter esaslı "Glenium 51" yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Çizelge 3.7'de süper akışkanlaştırıcı katkının fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Süper akışkanlaştırıcı katkının fiziksel özellikleri.

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilat Eter esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,082 - 1,142 kg/dm^3
Klor İçeriği % (EN480-10)	< 0,1
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	< 3
pH değeri	6,6

3.2 Çimento Esaslı Kompozit Üretimi

Bu çalışmada, bağlayıcı matrisin su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu karışımlarda liflerin ayrı ayrı ve hibrit olarak kullanıldığı, lif çeşidinin ve miktarının değiştiği 15 farklı karışım tasarlandı. Su/bağlayıcı oranı 0,35 oranına çıkarılarak aynı lif çeşidi ve

miktarlarında bu 15 karışım tekrarlandı. Tüm karışımlarda çimento ve cüruf dozajı 500kg/m^3 olup, bağlayıcı harcın kıvamı akışkanlaştırıcı katkı ile sağlandı.

3.2.1 Üretimde İzlenen Sıra

- Çimento, cüruf ve kumlar mikserde kuru olarak karıştırıldı.
- Karışım suyunun yaklaşık % 80'i ve nano silika karışıma eklendi.
- Akışkanlaştırıcı katkı karışım suyunun kalan kısmı ile karışıma ilave edildi.
- Liflerin tamamı karışıma ilave edildi.
- Harcı kıvamına bağlı olarak çökme ya da yayılma deneyleri ve birim hacim ağırlık deneyleri yapıldı.
- Elde edilen karışım gerek duyulan durumlarda vibrasyon yardımıyla kalıplara yerleştirildi.

3.2.2 Numune Kodlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, PVA lif çeşidi, lif yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı değiştirilerek 30 farklı çimento esaslı harç karışımı üretildi. Numune kodları belirlenirken su/bağlayıcı oranı 0,20 için 20, Su/Bağlayıcı oranı 0,35 için 35 rakamları kullanıldı.

İkinci kısaltma lif çeşidini ve oranını göstermekte olup kullanılan RFS400x15 lifleri için U(uzun lif), REC15x8 lifleri için K(kısa lif) harfleri, %0,0 lif yüzdesi için 00, %0,5 lif yüzdesi için 05, %1,0 lif yüzdesi için 10, %1,5 lif yüzdesi için 15, %2,0 lif yüzdesi için 20 rakamları kullanıldı. Üretilen betonların kodları ve karışımdaki lif yüzdeleri hakkında bilgi Çizelge 3.8'de verilmektedir.

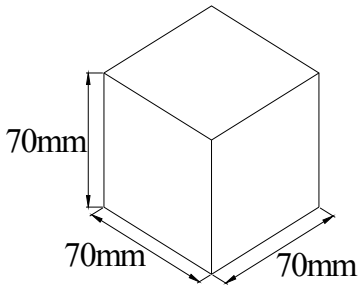
3.2.3 Numune Boyutları ve Şekilleri

Üretilen çimento esaslı kompozitlerden deneysel çalışmalar kapsamında daha net sonuçlara ulaşabilmek için her bir çimento esaslı malzeme üretiminden; basınç dayanım deneyleri için 6 adet küp numune, charpy impact darbe dayanımı deneyleri için 5 adet 40x30x300mm kiriş ve dört noktalı eğilme deneyleri için 10 adet 50x15x350mm kiriş üretildi. Numune boyutları ve şekilleri Çizelge 3.9'da verilmektedir**.**

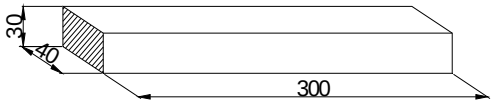
Çizelge 3.8 : Numune kodları ve lif yüzdeleri.

Lif Yüzdesi(V_f)	Numune Kodu	Su/Bağlayıcı Oranı	Lif İçeriği
V_f=%2,0	**20U20K00**	0,20	%2,0 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif
	20U15K00		%1,5 Uzun Lif+%0,5 Kısa Lif
	20U10K10		%1,0 Uzun Lif+%1,0 Kısa Lif
	20U05K15		%0,5 Uzun Lif+%1,5 Kısa Lif
	20U00K20		%0,0 Uzun Lif+%2,0 Kısa Lif
Vf=%1,5	**20U15K00**		%1,5 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif
	20U10K05		%1,0 Uzun Lif+%0,5 Kısa Lif
	20U05K10		%0,5 Uzun Lif+%1,0 Kısa Lif
	20U00K15		%0,0 Uzun Lif+%1,5 Kısa Lif
Vf=%1,0	**20U10K00**		%1,0 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif
	20U05K05		%0,5 Uzun Lif+%0,5 Kısa Lif
	20U00K10		%0,0 Uzun Lif+%1,0 Kısa Lif
Vf=%0,5	**20U05K00**		%0,5 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif
	20U05K00		%0,0 Uzun Lif+%0,5 Kısa Lif
Vf=%0,0	**20U00K00**		%0,0 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif
V_f=%2,0	**35U20K00**	0,35	%2,0 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif
	35U15K00		%1,5 Uzun Lif+%0,5 Kısa Lif
	35U10K10		%1,0 Uzun Lif+%1,0 Kısa Lif
	35U05K15		%0,5 Uzun Lif+%1,5 Kısa Lif
	35U00K20		%0,0 Uzun Lif+%2,0 Kısa Lif
Vf=%1,5	**35U15K00**		%1,5 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif
	35U10K05		%1,0 Uzun Lif+%0,5 Kısa Lif
	35U05K10		%0,5 Uzun Lif+%1,0 Kısa Lif
	35U00K15		%0,0 Uzun Lif+%1,5 Kısa Lif
Vf=%1,0	**35U10K00**		%1,0 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif
	35U05K05		%0,5 Uzun Lif+%0,5 Kısa Lif
	35U00K10		%0,0 Uzun Lif+%1,0 Kısa Lif
Vf=%0,5	**35U05K00**		%0,5 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif
	35U05K00		%0,0 Uzun Lif+%0,5 Kısa Lif
Vf=%0,0	**35U00K00**		%0,0 Uzun Lif+%0,0 Kısa Lif

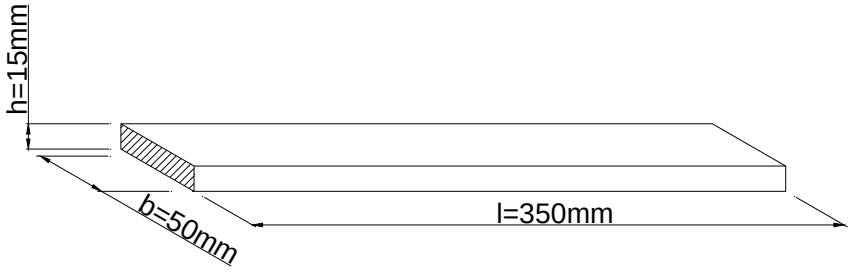
Çizelge 3.9 : Numune şekilleri ve boyutları.



Basınç Dayanım Deneyi Numunesi



Charpy Impact Darbe Deneyi Numunesi



Eğilme Deneyi Numunesi

3.3 PVA Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozit Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

3.3.1 Taze Harç Deneyleri

3.3.1.1 Birim Ağırlık Deneyi

Çimento esaslı kompozitin birim ağırlık deneyleri TS EN 12350-6 [31] kapsamında tarif edildiği şekilde gerçekleştirildi. Üretilen karışım kalıplara yerleştirilmeden önce, hacmi belirli olan bir kaba vibrasyon uygulanarak yerleştirildi ve taze harcın ağırlığı bulundu. Elde edilen ağırlık değerinden kabın ağırlığı çıkarılarak bu değerinin kap hacmine bölünmesi ile birim ağırlıklar elde edildi.

3.3.1.2 Çökme Deneyi (Slump Deneyi)

Taze harcın işlenebilirlik özelliğinin ölçülmesi amacıyla TS EN 12350-2'e [32] göre çökme konisi ile çökme deneyi yapıldı. Çökme konisinin üst çapı 10cm, alt çapı 20cm ve yüksekliği 30cm'dir. Bu koniye çökme değeri araştırılan beton, her defasında çökme konisinin hacimce 1/3'ünü dolduracak şekilde üç tabaka halinde çökme konisine yerleştirildi, her tabaka 25 defa şişlenerek betonun sıkışması sağlandı. Daha sonra çökme hunusi yere dik bir şekilde yukarı doğru döndürülerek çekildi ve taze betonun çökme değeri okunarak işlenebilirliği hakkında bilgi elde edildi.

3.3.1.3 Yayılma Deneyi

Çökme deneyinden tamamen çökmenin elde edildiği yüksek ve çok yüksek işlenebilirliğe sahip karışımların değerlendirilmesinde TS EN 12350-5'e [33] uygun olarak yayılma deneyi yapıldı. Şekil 3.2'de yayılma deneyi uygulaması verilmektedir.



Şekil 3.2 : Yayılma deneyi uygulaması.

3.3.2 Sertleşmiş Harç Deneyleri

3.3.2.1 Küp Basınç Deneyi

Küp basınç deneyi TS EN 12390-3 ‘e [34] uygun olarak, 7. ve 28. gününü dolduran 70x70x70mm^3 boyutlarındaki küp numunelere press makinesi ile basınç uygulanarak gerçekleştirildi. Deney aleti olarak 300 tonluk hidrolik pres kullanıldı. Basınç deneyinde yükleme hızı 4,0 kN/sn olarak seçildi. Basınç deneyi uygulaması Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



a b)

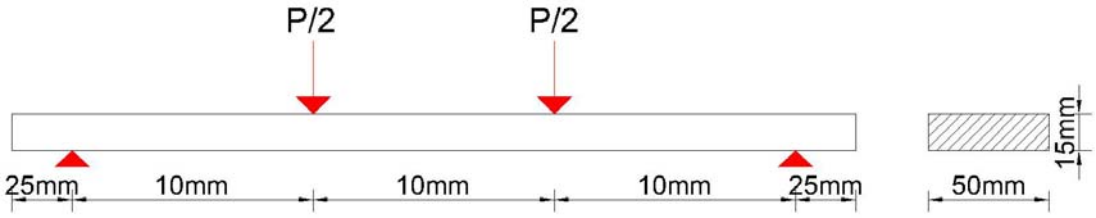
Şekil 3.3 : a) Basınç deneyi uygulaması. b) Soldaki küp numune lif içermemektedir, sağdaki küp numune lif içermektedir.

3.3.2.2 Eğilme Deneyi

Dört noktalı eğilme deneyi, 28 günlük numunelere TS EN 12390-5’a [35] göre uygulandı. Her kompozit malzeme türünden 5 numunede deney gerçekleştirildi. Ayrıca karşılaştırma amacı ile her iki matris için lif içermeyen (yalın) numunelerde de eğilme deneyi gerçekleştirildi. Deney aracı olarak, maksimum kapasitesi 100 kN olan Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi kullanıldı. Yükleme hızı 1,0 mm/dakika olacak şekilde seçildi ve tüm deney numunelerinde bu yükleme hızı sabit tutuldu. Numune boyutları Çizelge 3.9’da belirtildiği gibi 50x15x350 mm^3’dür. Mesnet açıklığı 300 mm olacak şekilde ve yükleme mesnetlerde 10’ar cm içerde olacak şekilde iki noktadan yapıldı. Şekil 3.4’de yükleme düzeneği görülmektedir.

Numunelerin yük-sehim ilişkileri, deney aletinin çapraz (cross-head) hareketi esas alınarak kaydedildi. Deneyler, ulaşılan maksimum yük değerinin yaklaşık %90’a düştüğü ana kadar devam ettirildi.





Şekil 3.4 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.

3.3.2.3 Net Eğilme Dayanımlarının Hesaplanması

Numunelerin eğilme dayanımları (3.1) bağıntısı kullanılarak hesaplandı.

$$F_{net}=(3Pl) / (2bh^2) \quad (3.1)$$

F_{net}= Net Eğilme Dayanımı(N/mm^2)

P=Kırılma Yükü(N)

l=Mesnetler arası uzaklık(mm)

b=Numune kesitinin genişliği(mm)

h=Numune kesitinin yüksekliği(mm)

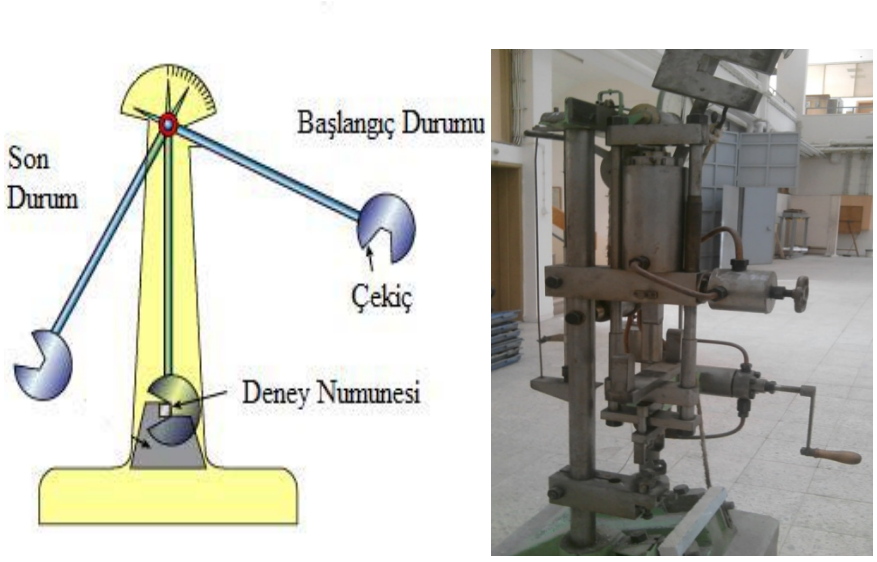
3.3.2.4 Kırılma Enerjilerinin Hesaplanması

Kırılma enerjisi, eğilme deneyi sonucu elde edilen gerilme-sehim grafiğinin altında kalan alana eşittir. Böylece grafikler altındaki alan hesaplanarak üretim serilerinin kırılma enerjileri elde edildi.

3.3.2.5 Charpy Impact Darbe Deneyi

Charpy Impact darbe deneyi 28 günlük numunelere her bir üretim serisinden 5 adet numunede gerçekleştirildi. Ayrıca karşılaştırma amacı ile her iki matris için içerisinde lif bulunmayan numuneler üretilip charpy impact darbe deneyi gerçekleştirildi. Numune boyutları Şekil 3.1'de verildiği üzere 40x30x35mm^3'dir.

Mekanik deney düzeneğinde sarkaç, daha önce belirlenen potansiyel enerjiye sahip olabileceği bir yüksekliğe çıkarıldı. Daha sonra numune, mesnetlere tam yaslanacak şekilde yerleştirildi. Numune uygun şekilde yerleştirildikten sonra, okumaların yapıldığı kadranın göstergesi başlangıç durumuna getirildi ve sarkaç düzgün bir şekilde serbest bırakıldı. Sonuç, deneyden sonra kadrandan okundu. Şekil 3.5'de deney düzeneği temsili olarak verilmektedir.



Şekil 3.5 : Charpy Impact darbe deneyi düzeneği.

Numunelerin darbe enerjisi (3.2) bağıntısı kullanılarak elde edildi.

$$\text{Darbe Enerjisi}(\text{Nmm/mm}^2) = M/A \qquad (3.2)$$

M= Kadrandan okunan birimi kgm olan değer 10^4 ile çarpılarak birimi Nmm'ye çevrildi.

A=Numunenin kesit alanı(mm^2)

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Çimento Esaslı Kompozitler Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları

Üretilen çimento esaslı kompozitlere taze haldeyken birim ağırlık deneyi, çökme (slump) deneyi ve çökmenin tamamen sağlandığı çimento esaslı üretimlere yayılma deneyi uygulandı. Sertleşmiş çimento esaslı kompozitlere basınç dayanımlarını belirlemek için basınç dayanım deneyi, eğilme dayanımı değerlerini belirlemek için ve eğilmede kırılma enerjilerini belirlemek için 4 noktalı eğilme deneyi ve darbede kırılma enerjilerini belirlemek için charpy impact darbe deneyi uygulandı.

4.1.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Yapılan bu çalışmada, üretilen çimento esaslı kompozitler üzerine, çimento esaslı kompozitlerin birim ağırlıklarının belirlenebilmesi için birim ağırlık deneyi, kompozitlerin işlenebilirlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla çökme (slump) deneyi uygulandı. Ancak bazı üretim serilerinde lif oranına ve lif çeşidine bağlı olarak çökmenin tamamen sağlandığı durumlarda işlenebilirlik değerinin belirlenebilmesi için yayılma deneyi yapıldı.

4.1.1.1 Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

Üretilen çimento esaslı kompozitler kalıplara yerleştirilmeden önce, taze haldeyken, hacmi belirli olan bir kap içerisine vibrasyon uygulanarak yerleştirildi ve bu belirli hacim için taze çimento esaslı kompozitin ağırlığı bulundu. Elde edilen ağırlık değerinin kabın hacmine bölünmesiyle çimento esaslı kompozitlerin birim ağırlıkları elde edildi. Üretilen çimento esaslı kompozitlere ait birim ağırlık değerleri ve çimento esaslı kompozit bileşimlerin karışım oranları su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrisler için Çizelge 4.1'de ve su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrisler için Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Su/Bağlayıcı oranı 0,20 olan karışımların birim ağırlık değerleri ve karışım oranları.

Lif Yüzdesi	Karışım Kodu	Çimento (kg/m^3)	GGBS (kg/m^3)	Nano Silika (kg/m^3)	PVA lif (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	0-0.5mm Kum (kg/m^3)	0.5-1.0mm Kum (kg/m^3)	Katkı (kg/m^3)	Birim Ağ (kg/m^3)	Hava Boşluğu (%)
V_f=%2,0	**20U20K00**	500	500	20	26+0	200	543	543	20	2340,1	3,5
	20U15K05	500	500	20	19,5+6,5	200	543	543	20	2344,1	5,2
	20U10K10	500	500	20	13+13	200	543	543	20	2343,3	4,8
	20U05K15	500	500	20	6,5+19,5	200	543	543	30	2345,5	5,8
	20U00K20	500	500	20	0+26	200	543	543	40	2340,1	3,5
V_f=%1,5	**20U15K00**	500	500	20	19,5+0	200	550	550	20	2358,7	8,1
	20U10K05	500	500	20	13+6,5	200	550	550	20	2353,1	5,8
	20U05K10	500	500	20	6,5+13	200	550	550	20	2348,9	4,0
	20U00K15	500	500	20	0+19,5	200	550	550	20	2349,3	4,2
V_f=%1,0	**20U10K00**	500	500	20	13+0	200	557	557	12	2355,6	3,7
	20U05K05	500	500	20	6,5+6,5	200	557	557	12	2354,1	3,0
	20U00K10	500	500	20	0+13	200	557	557	20	2357,1	4,3
V_f=%0,5	**20U05K00**	500	500	20	6,5+0	200	563	563	10	2363,3	4,6
	20U00K05	500	500	20	0+6,5	200	563	563	10	2365,5	5,5
V_f=%0,0	**20U00K00**	500	500	20	0	200	570	570	10	2368,9	3,8

Çizelge 4.2 : Su/Bağlayıcı oranı 0,35 olan karışımların birim ağırlık değerleri ve karışım oranları.

Lif Yüzdesi	Karışım Kodu	Çimento (kg/m^3)	GGBS (kg/m^3)	Nano Silika (kg/m^3)	PVA lif (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	0-0.5mm Kum (kg/m^3)	0.5-1.0mm Kum (kg/m^3)	Katkı (kg/m^3)	Birim Ağ. (kg/m^3)	Hava Boşluğu (%)
V_f=%2,0	**35U20K00**	500	500	20	26+0	350	344,5	344,5	2,5	2091,4	6,4
	35U15K05	500	500	20	19,5+6,5	350	344,5	344,5	2,5	2090,2	5,2
	35U10K10	500	500	20	13+13	350	344,5	344,5	2,5	2091,3	6,3
	35U05K15	500	500	20	6,5+19,5	350	344,5	344,5	2,5	2089,9	4,9
	35U00K20	500	500	20	0+26	350	344,5	344,5	0	2092,1	7,1
V_f=%1,5	**35U15K00**	500	500	20	19,5+0	350	351	351	2,5	2099,5	8,0
	35U10K05	500	500	20	13+6,5	350	351	351	2,5	2101,4	9,9
	35U05K10	500	500	20	6,5+13	350	351	351	2,5	2095,8	4,3
	35U00K15	500	500	20	0+19,5	350	351	351	2,5	2102,5	11,0
V_f=%1,0	**35U10K00**	500	500	20	13+0	350	357	357	2,5	2107,7	10,7
	35U05K05	500	500	20	6,5+6,5	350	357	357	2,5	2108,6	11,6
	35U00K10	500	500	20	0+13	350	357	357	2,5	2106,7	9,7
V_f=%0,5	**35U05K00**	500	500	20	6,5+0	350	364	364	1,25	2120,0	15,5
	35U00K05	500	500	20	0+6,5	350	364	364	1,25	2114,3	9,8
V_f=%0,0	**35U00K00**	500	500	20	0	350	371	371	1,25	2115,0	3,0

4.1.1.2 Slump/Yayılma Deneyi Sonuçları

Taze beton üzerine yapılan slump/yayılma deneyleri sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.3'de verilmektedir.

Çizelge 4.3 : Slump/yayılma deneyi sonuçları.

Lif Yüzdesi	Karışım Kodu	Slump(cm) &Yayılma(cm)	Karışım Kodu	Slump(cm) &Yayılma(cm)
Vf=%2,0	**20U20K00**	70	**35U20K00**	50
	20U15K05	35	**35U15K05**	16
	20U10K10	13	**35U10K10**	13
	20U05K15	13	**35U05K15**	11
	20U00K20	0	**35U00K20**	0
Vf=%1,5	**20U15K00**	75	**35U15K00**	55
	20U10K05	23	**35U10K05**	52
	20U05K10	18	**35U05K10**	15
	20U00K15	0	**35U00K15**	12
Vf=%1,0	**20U10K00**	66	**35U10K00**	40
	20U05K05	25,5	**35U05K05**	18
	20U00K10	24	**35U00K10**	14
Vf=%0,5	**20U05K00**	60	**35U05K00**	60
	20U00K05	10	**35U00K05**	15
Vf=%0,0	**20U00K00**	65	**35U00K00**	65

4.1.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

4.1.2.1 Basınç Deneyi Sonuçları

Küp numunelerin gerçekleşen deneyler neticesinde elde edilen basınç dayanımları Çizelge 4.4'de verilmektedir.

Çizelge 4.4 : Basınç deneyi sonuçları.

		7.Gün	28.Gün		7.Gün	28.Gün
Lif Yüzdesi	**Karışım Kodu**	**BasınçDayanımı (MPa)**	**BasınçDayanımı (MPa)**	**Karışım Kodu**	**BasınçDayanımı (MPa)**	**BasınçDayanımı (MPa)**
V_f=%2,0	**20U20K00**	91,3	108,9	**35U20K00**	52,8	75,0
	20U15K05	84,8	142,8	**35U15K05**	60,0	78,5
	20U10K10	92,7	144,7	**35U10K10**	55,3	73,7
	20U05K15	79,9	164,9	**35U05K15**	60,0	80,3
	20U00K20	60,8	92,2	**35U00K20**	49,1	65,3
V_f=%1,5	**20U15K00**	82,0	127,7	**35U15K00**	51,3	71,2
	20U10K05	90,6	126,1	**35U10K05**	53,0	73,9
	20U05K10	87,4	117,8	**35U05K10**	53,7	72,2
	20U00K15	72,4	122,3	**35U00K15**	57,5	79,2
V_f=%1,0	**20U10K00**	103,0	123,7	**35U10K00**	53,3	64,7
	20U05K05	92,4	116,9	**35U05K05**	47,6	70,4
	20U00K10	85,2	115,9	**35U00K10**	52,7	68,0
V_f=%0,5	**20U05K00**	95,1	114,0	**35U05K00**	38,7	60,1
	20U00K05	88,9	116,2	**35U00K05**	40,1	68,4
V_f=%0,0	**20U00K00**	67,3	101,1	**35U00K00**	46,3	57,9

4.1.2.2 Charpy Impact (Kırılma Enerjisi) Deneyi Sonuçları

40x30x300mm boyutlarındaki numunelere uygulanan Charpy Impact deneyi sonuçları Çizelge 4.5'de verilmektedir.

Çizelge 4.5 : Charpy Impact deneyi sonuçları.

Lif Yüzdesi	Karışım Kodu	Kırılma Enerjisi (Nmm/mm^2)	Karışım Kodu	Kırılma Enerjisi (Nmm/mm^2)
V_f=%2,0	**20U20K00**	13,8	**35U20K00**	13,8
	20U15K05	10,8	**35U15K05**	13,5
	20U10K10	7,9	**35U10K10**	14,3
	20U05K15	7,0	**35U05K15**	11,4
	20U00K20	7,1	**35U00K20**	10,3
V_f=%1,5	**20U15K00**	11,8	**35U15K00**	13,1
	20U10K05	7,4	**35U10K05**	12,4
	20U05K10	6,9	**35U05K10**	12,8
	20U00K15	8,9	**35U00K15**	9,7
V_f=%1,0	**20U10K00**	7,3	**35U10K00**	9,6
	20U05K05	7,1	**35U05K05**	7,5
	20U00K10	6,4	**35U10K00**	9,2
V_f=%0,5	**20U05K00**	6,6	**35U05K00**	6,2
	20U00K05	5,7	**35U00K05**	6,1
V_f=%0,0	**20U00K00**	5,9	**35U00K00**	5,3

4.1.2.3 Eğilme Deneyi Sonuçları

28 gün sonunda, numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyi ile elde edilen eğilme dayanımları Çizelge 4.6'da verilmektedir. Eğilme dayanımları için

verilen değerler, 5 numune üzerinde yapılan deneyler sonucu bulunan değerlerin ortalamasıdır.

Çizelge 4.6 : Eğilme deneyi sonuçları.

Lif Yüzdesi	Karışım Kodu	Eğilme Dayanımı (N/mm^2)	Karışım Kodu	Eğilme Dayanımı (N/mm^2)
V_f=%2,0	**20U20K00**	13,4	**35U20K00**	7,9
	20U15K05	9,2	**35U15K05**	11,2
	20U10K10	10,7	**35U10K10**	11,6
	20U05K15	13,6	**35U05K15**	9,7
	20U00K20	7,9	**35U00K20**	10,3
V_f=%1,5	**20U15K00**	16,1	**35U15K00**	7,3
	20U10K05	16,1	**35U10K05**	9,2
	20U05K10	14,7	**35U05K10**	8,7
	20U00K15	13,3	**35U00K15**	11,2
V_f=%1,0	**20U10K00**	13,8	**35U10K00**	8,5
	20U05K05	14,6	**35U05K05**	9,2
	20U00K10	15,1	**35U00K10**	6,3
V_f=%0,5	**20U05K00**	16,1	**35U05K00**	6,0
	20U00K05	13,4	**35U00K05**	5,4
Vf=%0,0	**20U00K00**	15,5	**35U00K00**	8,2

4.1.2.4 Kırılma Enerjisi Deneyi Sonuçları

28 gün sonunda, numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyi sonucunda gerilme şekil değiştirme grafikleri çizildi. Kırılma enerjisi, eğilme deneyi sonucu elde edilen gerilme-sehim grafiğinin altında kalan bu alana eşittir. Böylece grafikler

altındaki alan hesaplanarak üretim serilerinin kırılma enerjileri elde edildi.Üretimlerin kırılma enerjileri Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.7 : Kırılma enerjisi deney sonuçları.

		Kırılma Enerjisi(N/mm)		**Kırılma Enerjisi(N/mm)**
Vf=%2,0	**20U20K00**	899,9	**35U20K00**	875,8
	20U15K05	356,4	**35U15K05**	1306,7
	20U10K10	283,1	**35U10K10**	1444,4
	20U05K15	403,7	**35U05K15**	1394,3
	20U00K20	61,5	**35U00K20**	1476,4
Vf=%1,5	**20U15K00**	925,3	**35U15K00**	983,0
	20U10K05	516,5	**35U10K05**	1243,6
	20U05K10	335,4	**35U05K10**	729,8
	20U00K15	368,6	**35U00K15**	881,1
Vf=%1,0	**20U10K00**	375,7	**35U10K00**	3242,8
	20U05K05	316,0	**35U05K05**	580,3
	20U00K10	281,9	**35U00K10**	508,9
Vf=%0,5	**20U05K00**	339,3	**35U05K00**	151,6
	20U00K05	138,9	**35U00K05**	171,9
Vf=%0,0	**20U00K00**	124,8	**35U00K00**	91,1

5. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bölüm 4'de yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler tablolar halinde verilmektedir. Bu bölümde ise, taze ve sertleşmiş harç deneylerinden elde edilen veriler incelenecek ve sonuçlar değerlendirilecektir.

5.1 Taze Beton Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Üretilen yalın ve lif donatılı harçların taze haldeki özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla önceki bölümlerde açıklandığı üzere, çökme konisi (slump), yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapıldı.

Lif donatılı harçların işlenebilirliğinin ölçülmesi amacıyla yapılan deneylerden elde edilen değerler, kontrol serisi harçların çökme/yayılma değerleri bir önceki bölümde tablolar halinde verildi.

Üretilen harçlara çökme/yayılma deneylerinin yapılmasının yanı sıra, üretilen harçların kalıplara yerleştirilmesi ve kalıplara yerleştirilen harçların yüzey düzeltme işlemlerinin yapılması aşamasındaki gözlemler de dikkate alındı. Deneyler ve öznel gözlemler neticesinde elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Karışımlara ilave edilen liflerin taze harcın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediği, lifli harçlarda, yalın matrisin işlenebilirlik değerine daha yüksek oranlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak ulaşıldığı görüldü. Harca katılan lif yüzdesinin artması sonucu işlenebilirlik gittikçe azaldı. Lif hacim oranının %0,5 ve %1,0 olduğu üretimlerde taze harcın işlenebilirliğinde göreceli bir düşüş görülürken, hacimsel lif oranının %1,5 ve %2,0 oranına çıkması sonucu taze harcın işlenebilirlik değerlerinin önemli derecede düştüğü görüldü.

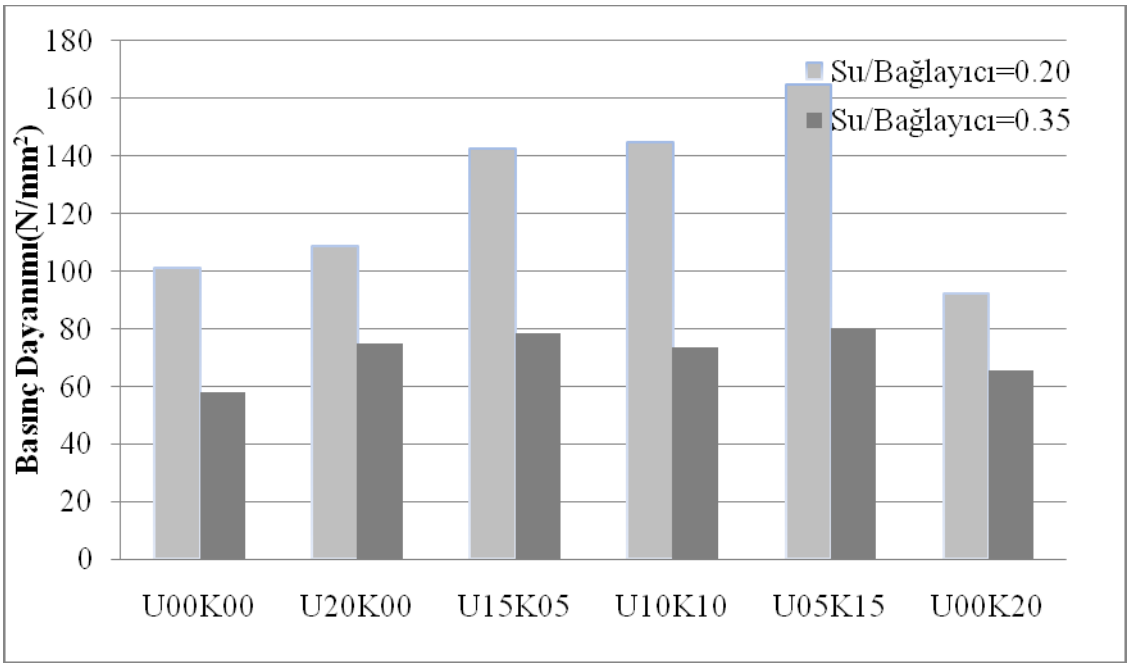
Taze harçların işlenebilirliği ile kullanılan lif tipi arasındaki ilişki incelendiğinde, kısa liflerin, harçların işlenebilirliğini uzun liflere göre daha fazla etkilediği görüldü. Bu durum, kısa liflerin uzun liflere kıyasla daha fazla özgül yüzey alanına sahip olması gerekçesi ile açıklanabilir.

Her iki matris çeşidi içinde %2,0 kısa lif içeren üretimler sıfır çökme değeri verdi ve bu lif oranına sahip kısa lifli harçların kalıba yerleştirilmesinde zorluklar yaşandı. İleriki paragraflarda da açıklanacağı gibi, bu durum, sertleşmiş harçların mekanik özelliklerine de olumsuz şekilde yansıdı.

Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrisin sahip olduğu işlenebilirlik değerine daha düşük akışkanlaştırıcı katkı miktarı ile ulaşıldı. Deneyler sırasında yapılan gözlemlere göre, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrislerin vizkozitesinin yüksek olmasına ve artan lif oranına da bağlı olarak liflerin matris içerisinde homojen olarak dağılması zorlaştı.

5.2 Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Basınç dayanım deneylerine tabi tutulan 70x70x70 mm^3 boyutlu küp numunelerden elde edilen dayanım değerleri Bölüm 4, Çizelge 3.4'de verilmektedir. Şekil 5.1'de, her iki su/bağlayıcı oranı için %2 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın (lif içermeyen) matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri toplu olarak görülmektedir.



Şekil 5.1 : %2,0 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri.

Şekil 5.1 incelendiğinde, her iki matris tipi içinde PVA lif donatılı harçların basınç dayanımlarının yalın harca kıyasla her zaman yüksek olduğu görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde lif miktarının artmasıyla birlikte

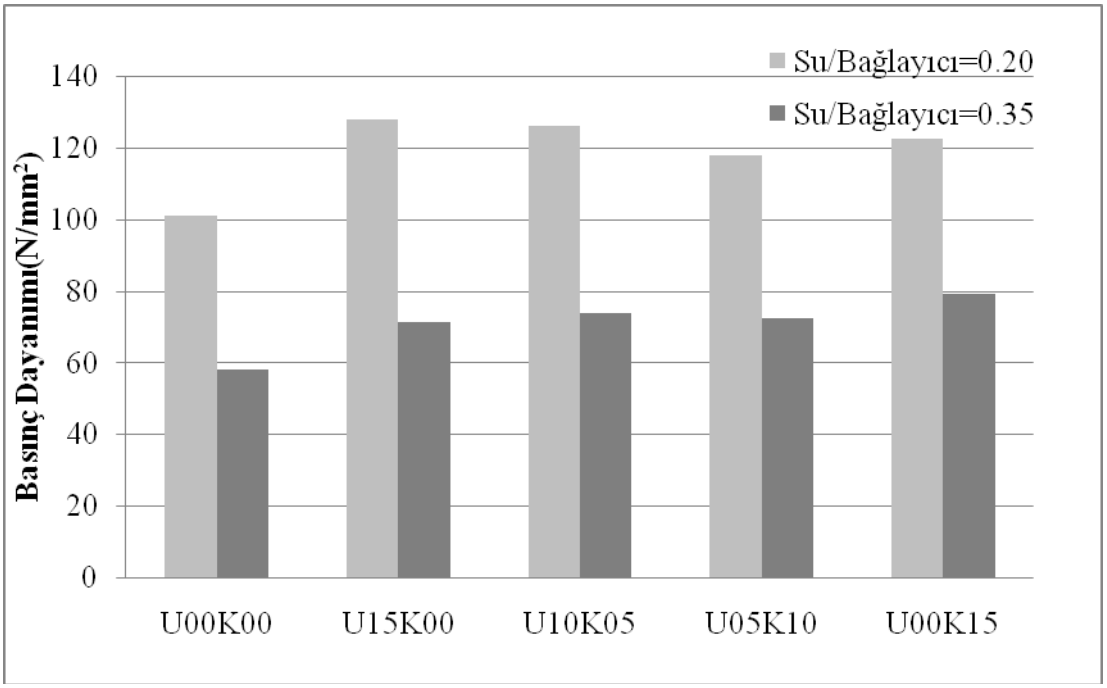
basınç dayanım değerinin doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Ancak, sadece %2,0 hacimsel kısa lif içeren 20U00K20 üretim serisinin basınç dayanım değerinin, yalın harca kıyasla %8,80 oranında düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi olarak, hacimsel %2,0 kısa lif oranının harcın işlenebilirliğini çok olumsuz etkilediği ve bunun neticesinde de kalıplara yerleştirme aşamasında yaşanan zorluklara bağlı olarak harçların boşluk oranın fazla olduğu düşünülebilir. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde de benzer durum görülmektedir, ancak, bu matriste yüksek lif hacim oranında dahi basınç dayanımları yalın harcın basınç dayanım değerinin üzerindedir. Bu durum, su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu harç karışımlarında PVA liflerin matris içinde daha iyi dağıldığını ve aynı zamanda üretilen harcın yüksek su içeriğine de bağlı olarak daha iyi bir yerleşme sağlandığını göstermektedir.

Su/bağlayıcı oranının 0,20 ve toplam lif oranının %2,0 olduğu karışımlar içinde, en yüksek basınç dayanımı değerini %0,5 uzun lif ve %1,5 kısa lif içeren 20U05K15 hibrit üretim serisinin verdiği görülmektedir. Bu üretim serisinde, basınç dayanımının yalın matrise kıyasla %63,1 oranında arttığı görülmektedir.

Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerin basınç dayanımının, su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrislerden daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum beklenen bir sonuç olup, azalan su/bağlayıcı oranı ile birlikte matris içindeki toplam kapiler boşluk miktarının da azalmasına ve daha yoğun bir içyapının oluşmasına bağlıdır.

Farklı tip PVA liflerin (uzun veya kısa) aynı oranlarda kullanımı durumunda basınç dayanımlarında meydana gelen değişikliklerin gözlenmesi amacıyla Şekil 5.1 sadece % 2,0 oranında uzun lif içeren U20K00 üretim serileri ve sadece kısa lif içeren U00K20 üretim serileri dikkate alınarak incelendiğinde, her iki matris türünde de uzun lif içeren üretim serilerinin basınç dayanımlarının kısa lif içeren üretim serilerinin basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, bu lif oranlarında taze harçların işlenebilme özelliklerinin düşük olması yerleştirme problemlerinin oluşmasına ve buna bağlı olarak da dayanımlarda düşüşe neden olmuştur. Ancak, uzun lifli karışımların her iki matris tipi için de kısa lif kullanımına göre daha yüksek değerler vermesi, eşit lif hacminde kısa liflerin uzun liflere göre çok daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olmasına bağlanabilir. Yüksek özgül yüzey alanı, daha fazla karışım suyunun lif yüzeyinde absorbe edilmesine neden olacağından, benzer matris özelliklerinde %2,0 kısa lifli

karışımların kıvam kayıpları daha fazla olmuştur. Bu da dayanıma olumsuz yönde etki etmiştir.



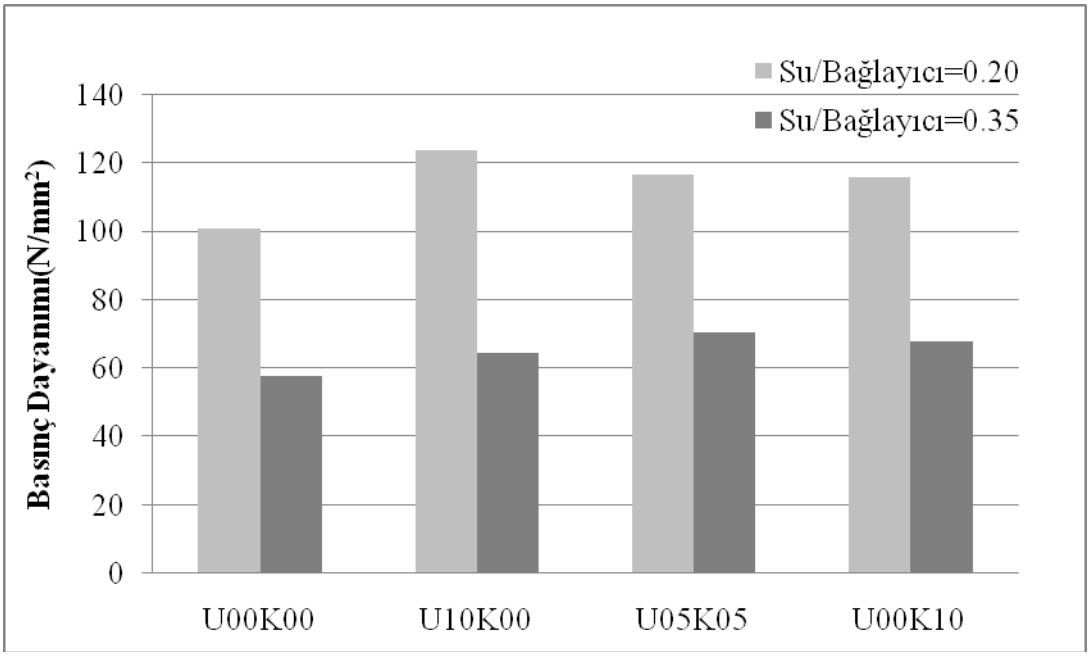
Şekil 5.2 : %1,5 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri.

Şekil 5.2'de, her iki su/bağlayıcı oranı için toplam %1,5 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın (lif içermeyen) matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri toplu olarak görülmektedir. Şekil 5.2'ye bakıldığında; %1,5 oranında PVA lif kullanılarak üretilen kompozit harçların basınç dayanımı değerlerinin, her iki su/bağlayıcı oranı için de geçerli olmak üzere, yalın (lifsiz) harçların basınç dayanım değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu üretim serilerinde, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrislerde en yüksek basınç dayanımını sadece uzun lif içeren 20U15K00 üretim serisinin verdiği ve basınç dayanımının yalın matrise kıyasla % 26,3 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu karışımlar içinde ise, en yüksek basınç dayanımını sadece kısa lif içeren 35U00K15 üretim serisi vermektedir. Bu seri için 28 günlük basınç dayanım değeri, yalın harca kıyasla %36,7 oranında artmıştır.

Şekil 5.2, %1,5 oranında sadece uzun lif (U15K00) ve sadece kısa lif (U00K15) içeren üretim serileri dikkate alınarak incelendiğinde, su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matriste, uzun lifli üretim serisinin (U15K00) basınç dayanımının kısa lifli üretim serisine (U00K15) kıyasla az bir miktar (%4,2) daha yüksek olduğu

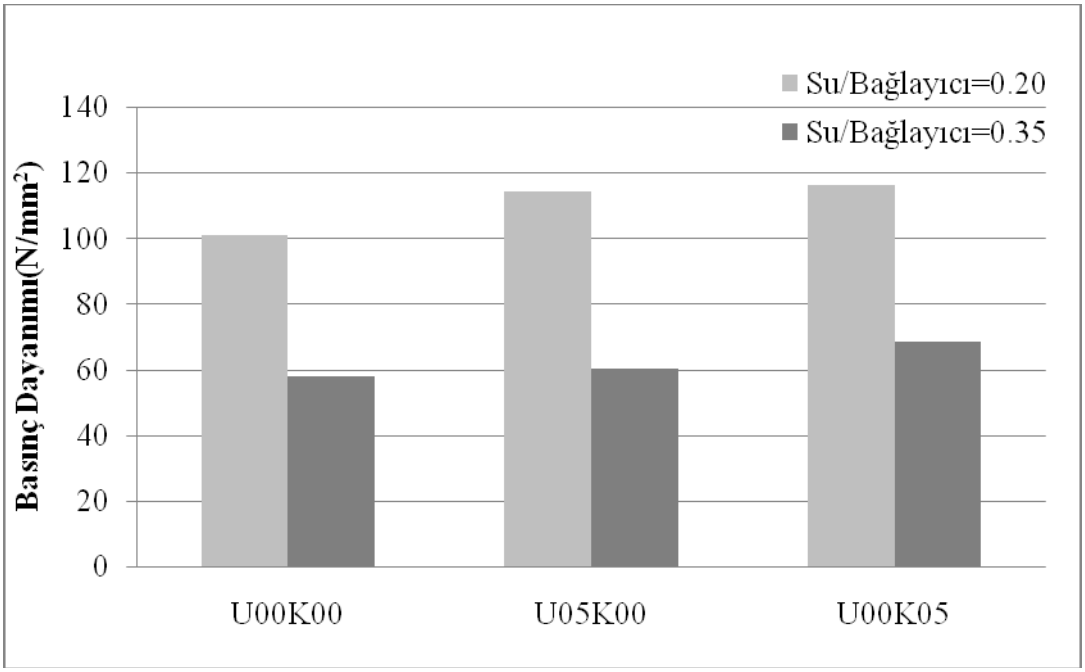
görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matris türünde ise kısa lifin basınç dayanımına katkısı uzun life göre %11,2 daha iyi olmuştur.

Benzer karşılaştırmalar, Şekil 5.3 ve 5.4'de, yine her iki matris tipi için de olmak üzere, %1,0 ve %0,5 lif oranları için görülmektedir. Şekil 5.3'e bakıldığında, %1,0 oranında aynı tip lif içeren üretim serilerinin (U10K00 ve U00K10), %1,5 oranında aynı tip lif içeren üretim serilerine paralel sonuçlar verdiği görülmektedir. Şekil 5.4'e göre ise, her iki matris türünde de %0,5 kısa lif içeren üretim serilerinin (U00K05) ve %0,5 uzun lif içeren üretim serilerinden (U05K00) daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğu görülmektedir.

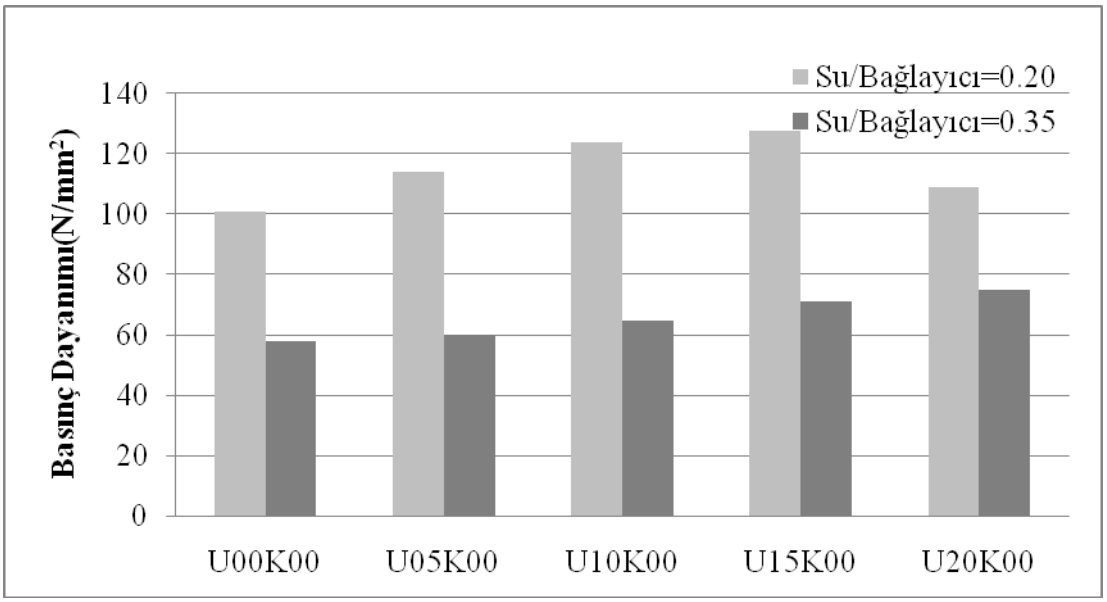


Şekil 5.3 : %1,0 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri.

Şekil 5.3'de, her iki su/bağlayıcı oranı için toplam %1,0 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın (lif içermeyen) matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri toplu olarak görülmektedir. Şekil 5.3'e göre, su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu karışımlar içinde en yüksek basınç dayanımı değerinin, yalın matrise kıyasla %21,7 artışla, sadece uzun lif içeren 20U10K00 üretim serisinde elde edildiği görüldü. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan karışımlarda ise en yüksek basınç dayanımını %0,5 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren 35U05K05 hibrit üretim serisinde elde edildiği ve yalın matrise kıyasla %21,6 oranında artış olduğu görüldü.



Şekil 5.4 : % 0,5 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri.

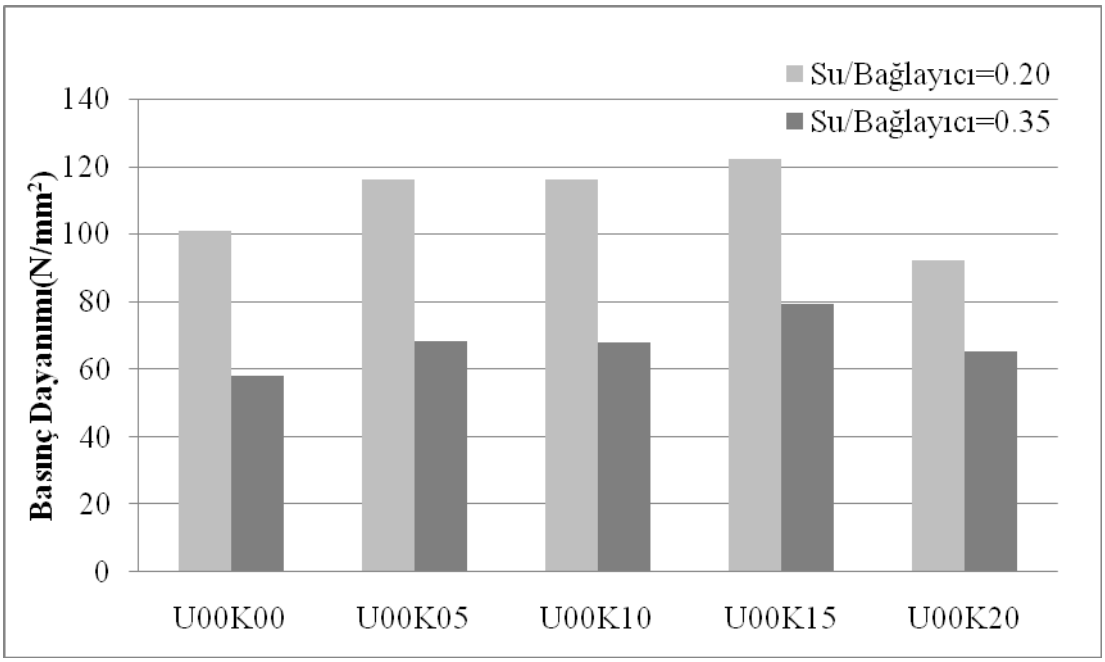


Şekil 5.5 : Sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri.

Şekil 5.5, sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın harçların 28 günlük basınç dayanım değerlerini göstermektedir. Farklı hacimsel karışım oranlarında sadece uzun lif içeren harç üretimleri dikkate alındığında, her iki matris türünde de uzun lif yüzdesinin artmasıyla basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Ancak, su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matriste, %2,0 oranında uzun lif içeren 20U20K00 üretim serisinin basınç dayanımında bir miktar düşüş olduğu görüldü. Bu durum

su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrisin su içeriğinin düşük ve vizkozitesinin yüksek olmasına bağlı olarak liflerin matris içinde homojen dağılımının güçleşmesine ve yüksek lif oranı ile birlikte işlenebilme kayıplarının oluşmasına bağlanmıştır. Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu karışımlardan %1,5 oranında uzun lif içeren 20U15K00 üretim serisine ait numunelerin basınç dayanımlarının yalın matrise kıyasla %26,3 oranında daha fazla olduğu görüldü.

Diğer taraftan, su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matriste ise en yüksek basınç dayanımı %2,0 uzun lif oranına sahip 35U20K00 üretim serinde elde edildi. Bu seride elde edilen dayanım değeri, yalın matrise kıyasla %29,5 daha fazla olarak belirlendi. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matriste %2,0 uzun lif kullanımında bile basınç dayanımı artışının devam etmesi, bu matris için uzun PVA liflerin homojen dağılımının ve aynı zamanda harcın yerleştirilebilme özelliklerinin sağlanabildiğinin göstergesi olarak kabul edilebilir. Her iki bağlayıcı tipi için de, uygun yerleştirme ve lif dağılımı sağlandığı sürece, artan lif oranının basınç dayanımını olumlu etkilediği görülmüştür.



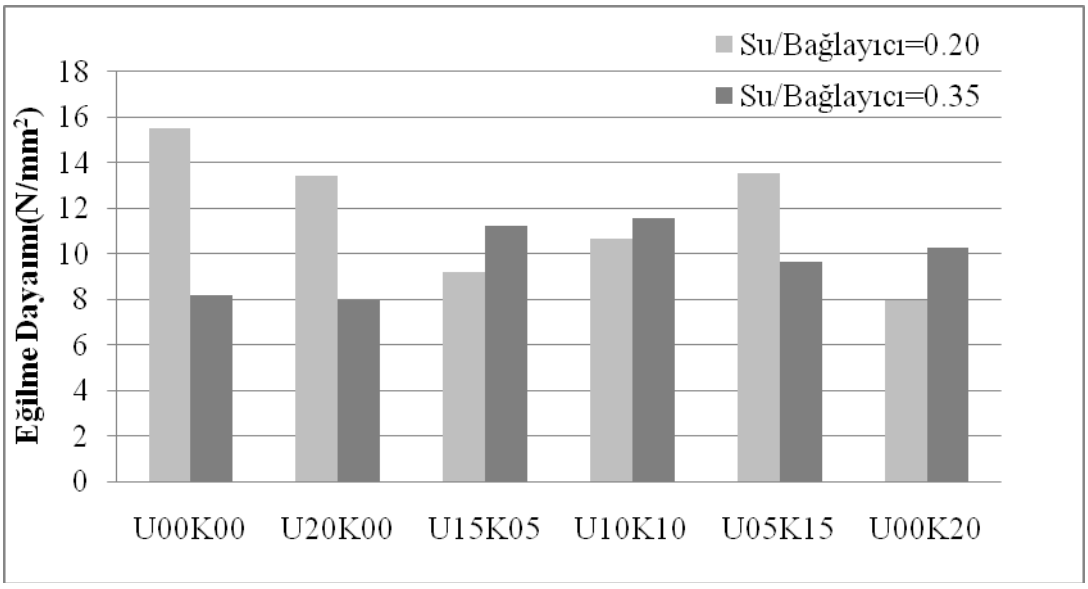
Şekil 5.6 : Sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin 28 günlük basınç dayanım değerleri.

Şekil 5.6, sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın harçların 28 günlük basınç dayanım değerlerini göstermektedir. Farklı hacimsel karışım oranlarında sadece kısa lif içeren harç üretimlerine ait sonuçlar değerlendirildiğinde, uzun liflerde de

gözlemlendiği şekilde, lif yüzdesinin artmasıyla birlikte basınç dayanımı değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, her iki matris türü için de geçerli olmak üzere, %2,0 oranında kısa lif içeren üretim serilerinin basınç dayanımlarının %1,5 oranında lif içeren üretim serilerine kıyasla düştüğü görüldü. Kısa lifin %1,5 oranında kullanılmasının basınç dayanımında optimum sonuç verdiğini söylenebilir. Lif oranının %1,5 değerinin üzerindeki değerlerde kullanılması, taze harcın kıvamını çok olumsuz etkilediğinden dayanım kayıplarına neden olmuştur. Benzer kayıplar, ileriki paragraflarda da bahsedileceği üzere, ince kesitli kiriş numunelerin eğilme performanslarını da etkilemiştir.

5.3 Eğilme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulan 50x15x350mm^3 boyutlarındaki numunelerden elde edilen veriler 4. bölümde tablolar halinde verildi. Bu bölümde elde edilen verilerden faydalanılarak çizilen grafikler üzerinde sonuçlar değerlendirildi.



Şekil 5.7 : %2,0 oranında PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri.

Şekil 5.7, %2,0 oranında PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerlerini göstermektedir. Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde, yalın matrisin en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu matrise hacimsel olarak %2,0 lif ilave edilmesiyle eğilme dayanımında düşüş olmaktadır. Bunun sebebi, yüksek lif oranı ve matrisin vizkozitesinin de yüksek olmasına bağlı olarak liflerin matris içersinde homojen dağılamaması şeklinde açıklanabilir. En

yüksek düşüş %2,0 oranında kısa lif içeren 20U00K20 üretim serisinde görülmektedir. %2,0 hacim oranında kısa lif içeren bu üretim serisinde eğilme dayanımının referans (lifsiz) numuneye göre %49,0 oranında düştüğü görülmüştür.

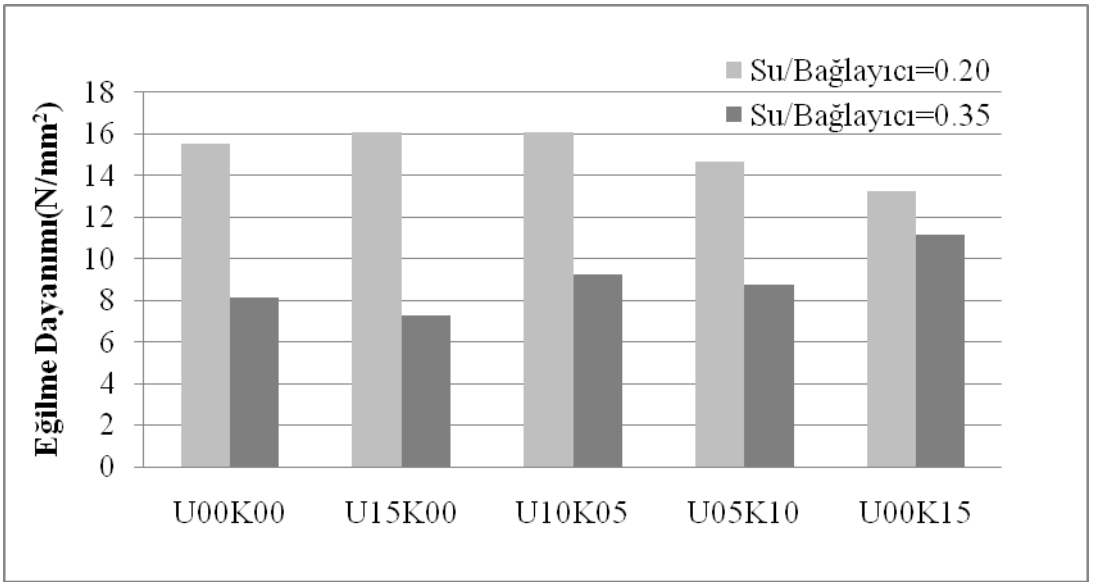
Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde lifli harcın yalın harca kıyasla eğilme dayanımlarının yüksek olduğu, ancak, sadece %2,0 oranında uzun lif içeren 35U20K00 üretim serisinin yalın harca kıyasla eğilme dayanımının %3,7 oranında düştüğü görüldü. Bu üretim serisinin işlenebilirliğinin çok düşük olması sonucu kalıplara zor yerleştirilmesinin eğilme dayanımında da olumsuz etkisi görülmektedir.

Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerden %1,0 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren 35U10K10 hibrit üretim serisinin yalın betona kıyasla eğilme dayanımının %41,5 oranında arttırdığı görülmektedir.

%2,0 lif içeren üretim serilerinde genel olarak, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan karışımların su/bağlayıcı oranı 0,35 olan karışımlara kıyasla eğilme dayanımlarının daha yüksek olduğu görüldü. Ancak 2 üretim serisinde bu durumun tersi gözlendi. %1,5 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren U15K05 hibrit üretim serilerinden su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrisin, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrise kıyasla eğilme dayanımlarının %21,7 oranında fazla olduğu görüldü. Ayrıca, %1,0 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren U10K10 hibrit üretim serilerinden su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrisin, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrise kıyasla eğilme dayanımının %8,4 oranında fazla olduğu görüldü. Daha önce de bahsedildiği gibi, %2,0 PVA lif oranındaki karışımlarda yaşanan işlenebilme ve yerleştirebilme problemleri, bu lif oranındaki karışımlara ait sonuçların değerlendirilmesinde engel yaratmaktadır.

Şekil 5.7'de her iki matris tipi için %2,0 oranında kısa (U00K20) veya %2,0 oranında uzun lif (U20K00) kullanılması durumunda elde edilen eğilme dayanım değerleri dikkate alındığında, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan yalın matrise %2,0 oranında lif ilave edilmesinin eğilme dayanımını düşürdüğü görülmektedir. Sadece kısa lif içeren 20U00K20 üretim serisinde bu düşüş %49,0 oranındadır. Bu üretim serisinin basınç dayanımında da benzer sonuç elde edildi. Bu durumun sebebi olarak, bu üretim serisinde yüksek lif hacim oranının işlenebilirliği olumsuz etkilediği buna bağlı olarak kalıba zor yerleştirilen harcın kusurlu olduğu ve hem basınç hem de eğilme dayanımlarının düşük olduğu görüldü. Ancak su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde bu üretim serisinin eğilme dayanımının yalın matrise kıyasla

%25,9 oranında yüksek olduğu görülmektedir. Benzer durum basınç dayanımını deneyi sonuçlarında da elde edildi. Bu lif oranında, su/bağlayıcı oranının 0,20 olması durumunda uzun lifli karışım daha etkili iken, su/bağlayıcı oranının 0,35 olması durumunda sadece kısa lifli karışım daha etkili olmuştur.



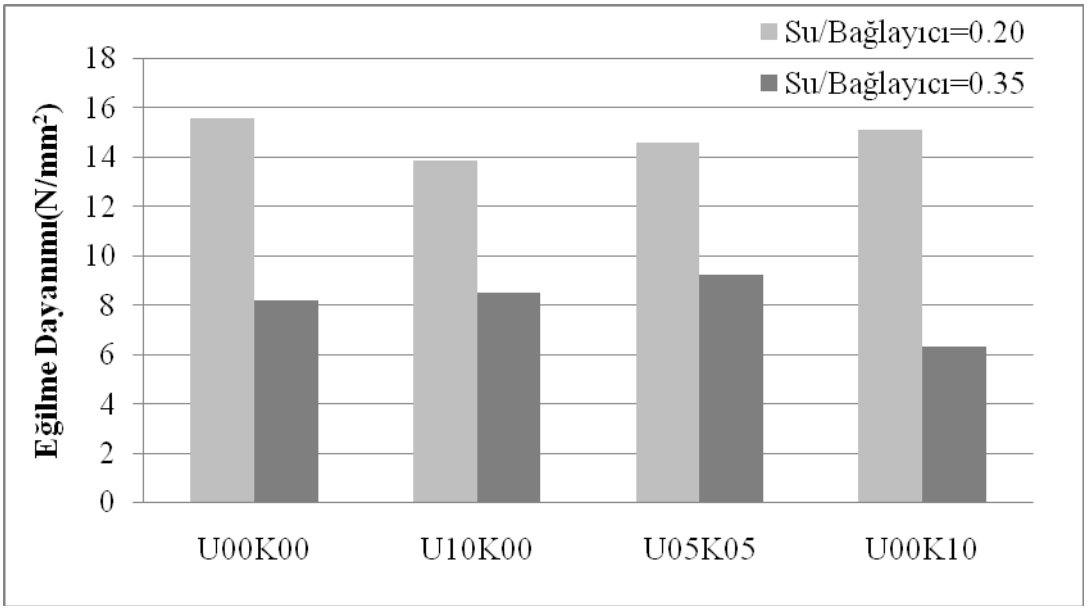
Şekil 5.8 : %1,5 oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri.

Şekil 5.8, %1,5 oranında PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerlerini göstermektedir. Bu şekle göre, su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde %1,0 uzun ve %0,5 kısa lif içeren 20U10K05 hibrit üretim serisinin eğilme dayanımının yalın betona kıyasla %3,9 oranında arttırdığı görülmektedir. Benzer artış %1,5 oranında sadece uzun lif içeren 20U15K00 üretim serisinde de görülmektedir. Ancak %0,5 kısa lif ve %1,0 uzun lif içeren 20U05K10 hibrit üretim serisinin ve %1,5 oranında sadece kısa lif içeren 20U00K15 üretim serisinin eğilme dayanımlarının yalın matrise kıyasla düştüğü gözlenmiştir. Bu duruma sebep olarak uzun lif miktarının matris içinde artmasıyla işlenebilirliğin düşmesine bağlı olarak matris homojenliğinin azalması gösterilebilir.

Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde %1,5 hacimsel lif içeren üretim serilerinin yalın betona kıyasla eğilme dayanımlarında kayda değer bir değişiklik olmadığı, ancak, %1,5 hacim oranında sadece kısa lif içeren 35U00K15 üretim serisinin yalın matrise kıyasla eğilme dayanımında %36,6 oranında artış olduğu görülmektedir.

%1,5 hacim oranında sadece kısa lif içeren su/bağlayıcı oranı 0,20 olan 20U00K15 üretim serisinin eğilme dayanımı yalın matrise kıyasla düşük bir değerdeyken, aynı lif içeriğinde su/bağlayıcı oranı 0,35 olan 35U00K15 üretim serisinde eğilme dayanımının yalın matrise kıyasla yüksek olduğu görülmektedir. Benzer durum, basınç dayanımı sonuçlarında da gözlendi ve nedenleri ilgili paragrafta tartışıldı.

Şekil 5,8'de %1,5 oranında sadece uzun lif ve %1,5 oranında sadece kısa lif içeren üretim serileri kıyaslandığında, yalın matrise %1,5 oranında lif ilave edilmesinin su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matriste (20U15K00) eğilme dayanımı üzerinde çok fazla değişikliğe sebep olmamaktadır. Ancak su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde %1,5 kısa lif içeren 35U00K15 üretim serisinin eğilme dayanımının yalın matrise kıyasla %36,6 oranında yüksek olduğu görüldü. Bu lif oranında da, su/bağlayıcı oranının 0,20 olması durumunda uzun lifli karışım daha etkili iken, su/bağlayıcı oranının 0,35 olması durumunda sadece kısa lifli karışım daha etkili olmuştur.



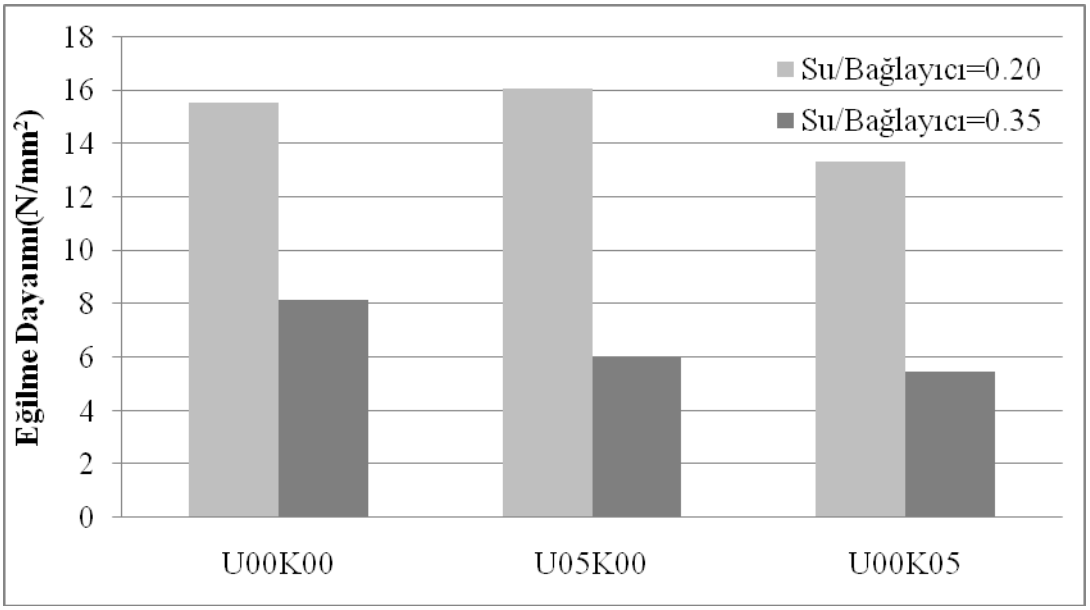
Şekil 5.9 : %1,0 oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrisin eğilme dayanım değerleri.

Şekil 5.9, %1,0 oranında PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerlerini göstermektedir. %1,0 hacimsel lif içeren üretim serilerinden su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrislerin eğilme dayanımlarının yalın harca kıyasla düşük olduğu en fazla düşüşün %1,0 oranında sadece uzun lif içeren 20U10K00 üretim serisinde olduğu görüldü. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde ise, 35U00K10 serisi hariç, yalın matrise lif katılmasının eğilme dayanımında bir miktar

artışa sebep olduğu görüldü. %1,0 oranında sadece kısa lif içeren 35U00K10 üretim serisinin eğilme dayanımının yalın matrise kıyasla %23,2 oranında düşük olduğu gözlendi.

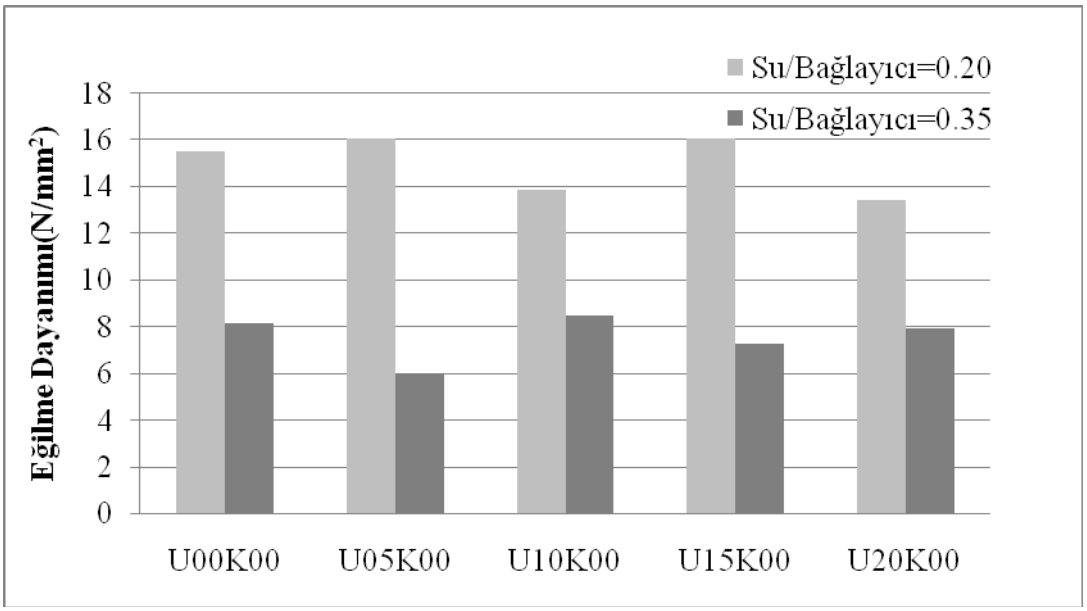
Şekil 5.9'a bakıldığında, yalın matrise %1,0 oranında aynı tip lif ilave edilmesiyle elde edilen lifli matrislerin (U10K00 ve U00K10) eğilme dayanımlarında belirgin bir değişiklik olmadığı ancak su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerden % 1,0 hacim oranında lif içeren 35U00K10 üretim serisinin eğilme dayanımının %9,5 oranında düşürdüğü görülmektedir.

Şekil 5.9'a genel olarak bakıldığında su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerin eğilme dayanımları su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrislere kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10 : %0,5 hacimsel lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri.

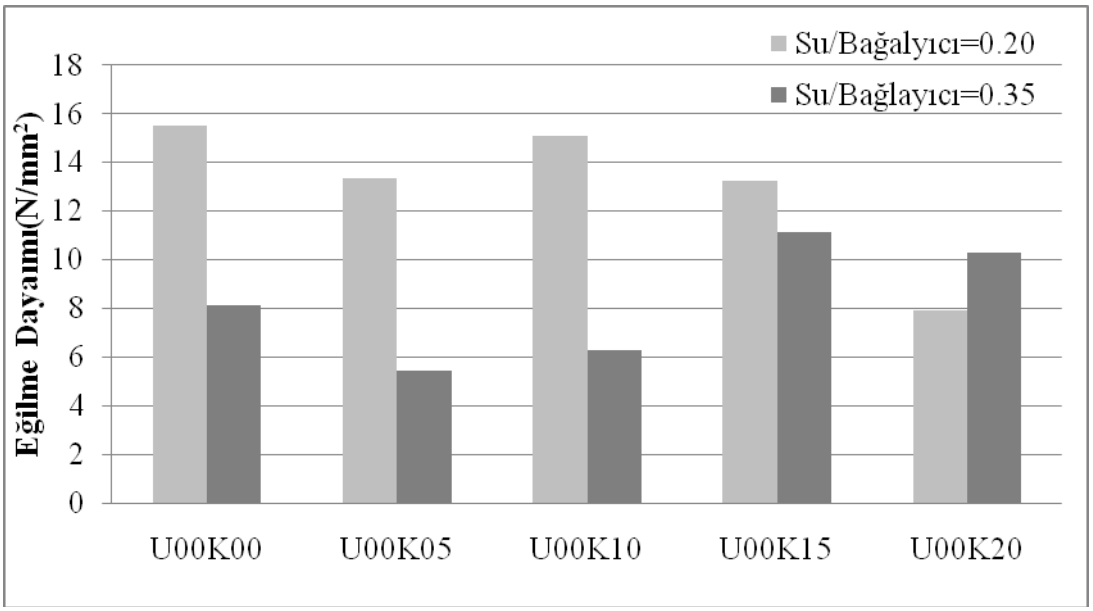
Şekil 5.10'da %0,5 oranında sadece uzun veya sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanımları kıyaslanmaktadır. Şekil 5.10 incelendiğinde, yalın matrisin %0,5 oranında hacimsel lif içerdiği üretim serilerinde, %2,0, %1,5 ve %1,0 oranlarında lif içeren üretim serilerinde olduğu gibi, eğilme dayanımında belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Ancak su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde %0,5 oranında lif içeren matrislerin eğilme dayanımlarının yalın matrise kıyasla düşük olduğu görüldü.



Şekil 5.11 : Sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri.

Şekil 5.11, sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın harçların eğilme dayanım değerlerini karşılaştırmaktadır. Farklı hacimsel karışım oranlarında sadece uzun lif içeren harç üretimlerine ait sonuçlar değerlendirildiğinde, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrislerde yalın harca uzun lif katılmasının eğilme dayanımına sistematik bir değişiklik yapmadığı görüldü. Örneğin yalın harca %1,5 oranında uzun lif ilave edilmesiyle eğilme dayanımında % 3,9 oranında artış elde edildi. Başka bir örnekte ise %1,0 oranında sadece uzun lif içeren üretim serisinin eğilme dayanımının yalın harca kıyasla % 10,9 oranında düşük olduğu görüldü. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu üretim serilerinde de benzer durum söz konusudur. Yani, yalın matrise uzun lif ilave edilmesinin eğilme dayanımına olumlu ve sistematik bir etkisi olmadığı görüldü. Üretim serilerinden %0,5 hacim oranında uzun lif içeren 35U05K00'ın eğilme dayanımını %26,9 oranında düşürdüğü sonucu elde edildi.

Sadece uzun lif içeren üretim serilerinde su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerin eğilme dayanımları, su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrislere kıyasla yüksek değerlere sahiptir.



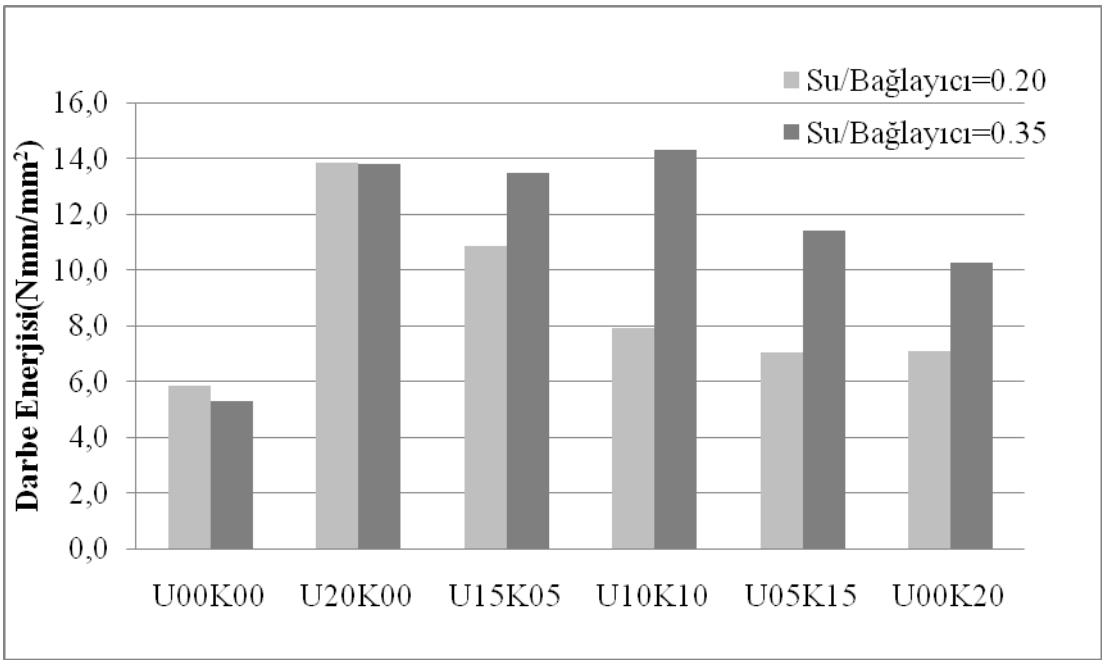
Şekil 5.12 : Sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin eğilme dayanım değerleri.

Şekil 5.12, sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın harçların eğilme dayanım değerlerini karşılaştırmaktadır. Farklı hacimsel karışım oranlarında sadece kısa lif içeren harç üretimlerine ait sonuçlar değerlendirildiğinde, yalın matrise kısa lif ilave edilmesinin her iki matris türünde de eğilme dayanımına olumlu bir etkisinin olmadığı ve bazı üretim serilerinin eğilme dayanımlarının yalın matrise kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Örneğin su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matriste sadece %0,5 oranında kısa lif içeren 35U00K05 üretim serisinin eğilme dayanımı yalın matrise kıyasla %34,1 oranında düşüktür. Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matriste ise %2,0 oranında sadece kısa lif içeren 20U00K20 üretim serisinin eğilme dayanımının yalın matrise kıyasla % 49,0 oranında düşük olduğu görülmektedir.

Kısa lif içeren üretim serilerinden su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrislerin eğilme dayanımları su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrislere kıyasla daha yüksek değerlere sahiptir (U00K20 hariç).

5.4 Charpy Impact (Darbe Enerji Yutma) Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Charpy impact deneyine tabi tutulan 40x30x300mm^3 boyutlarındaki numunelerden elde edilen veriler 4. bölümde tablolar halinde verildi. Bu bölümde elde edilen verilerden faydalanılarak çizilen grafikler üzerinde sonuçlar değerlendirildi.



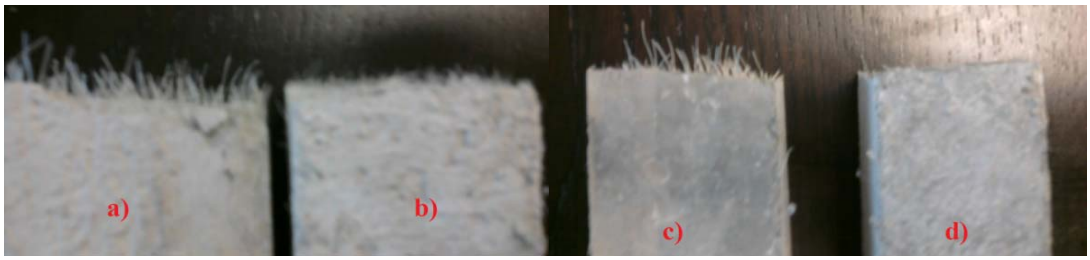
Şekil 5.13 : %2,0 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri.

Şekil 5.13'de, her iki su/bağlayıcı oranı için toplam %2,0 hacim oranında PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın (lif içermeyen) matrislerin darbe enerji yutma değerleri toplu olarak görülmektedir. Bu şekil incelendiğinde yalın matrise lif ilave edilmesinin her iki matris türünde de darbe enerji yutma değerlerini arttırdığı görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde %2,0 oranında sadece uzun lif içeren 20U20K00 üretim serisinin yalın matrise kıyasla darbe dayanımının %134,0 oranında arttığı görülmektedir.

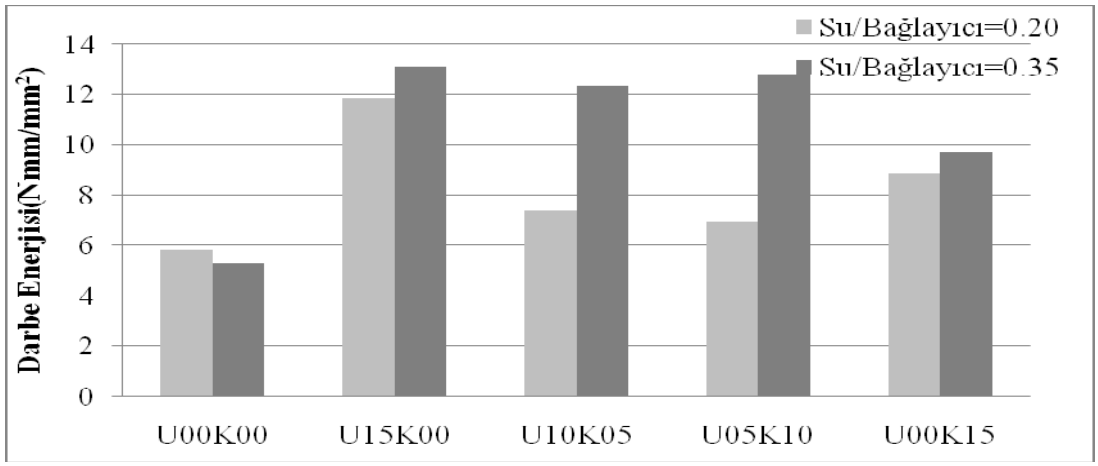
Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu hacimce %2,0 oranında lif içeren matrislerde matris içindeki uzun lif yüzdesinin azalmasıyla darbe enerji yutma değerlerinin doğru orantılı olarak düştüğü görülmektedir. Diğer bir deyişle, uzun liflerin kısa lifler ile ikame edilmesi, numunelerin darbe enerji yutma kapasitelerinin azalmasına neden olmuştur. Bu durum, darbe etkileri altında uzun liflerin daha etkili olduğunu göstermektedir. Sözkonusu matrislerde (su/bağlayıcı=0,20) sadece kısa lif kullanılması, numunelerin darbe enerji yutma kapasitelerini, şahit numuneye göre %83,0 arttırmıştır.

Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde darbe enerji yutma değerlerinin %1,0 oranında uzun lif ve %1,0 oranında kısa lif içeren 35U10K10 hibrit üretim serisinde en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Düşük su/bağlayıcı oranına sahip lifli matrislerde gözlenen uzun lif miktarının azalması ve kısa lif miktarının artmasıyla

darbe enerji yutma değerlerinin doğru orantılı olarak azaldığı durum, su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde görülmemektedir. %2,0 oranında lif içeren üretim serilerinde su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde darbe enerji yutma değerleri, su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrislere kıyasla daha düşük değerlerdedir. Bu durum, matris ile lifler arasındaki aderans ile ilgilidir. Su/bağlayıcı oranının yükselmesi matris dayanımını azaltmakta ve darbe etkileri altında liflerin matris içinden kısmen sıyrılabilmesine müsade etmektedir. Yutulan enerji, sıyrılabilen lif miktarı ve aynı zamanda lif uzunluğu ile ilgilidir. Öte yandan, düşük su/bağlayıcı oranlı karışımların darbe enerji yutma kapasitelerinin düşük çıkması lifler ile matris arasındaki aderansın güçlü olmasına ve buna bağlı olarak da liflerin sıyrılamadan kopmasına bağlanmıştır. Deney numunelerinde yapılan gözlemler de bu açıklamaları destekleyici yönde olmuştur. Numunelerin kırılma kesitleri incelendiğinde, yüksek enerji yutma kapasitesine sahip karışımların kesitlerinde sıyrılan liflerin varlığı rahatlıkla gözlemlenebilirken, düşük enerji yutma kapasitesine sahip karışımlara ait numunelerin kesitlerinde bu duruma rastlanmamıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 : Charpy impact darbe deneyi sonucu kırılan numuneler a)Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matriste uzun lif (sıyrılma) b) Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matriste kısa lif (sıyrılma) c) Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matriste uzun lif(sıyrılma) d)Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matriste kısa lif(kopma)

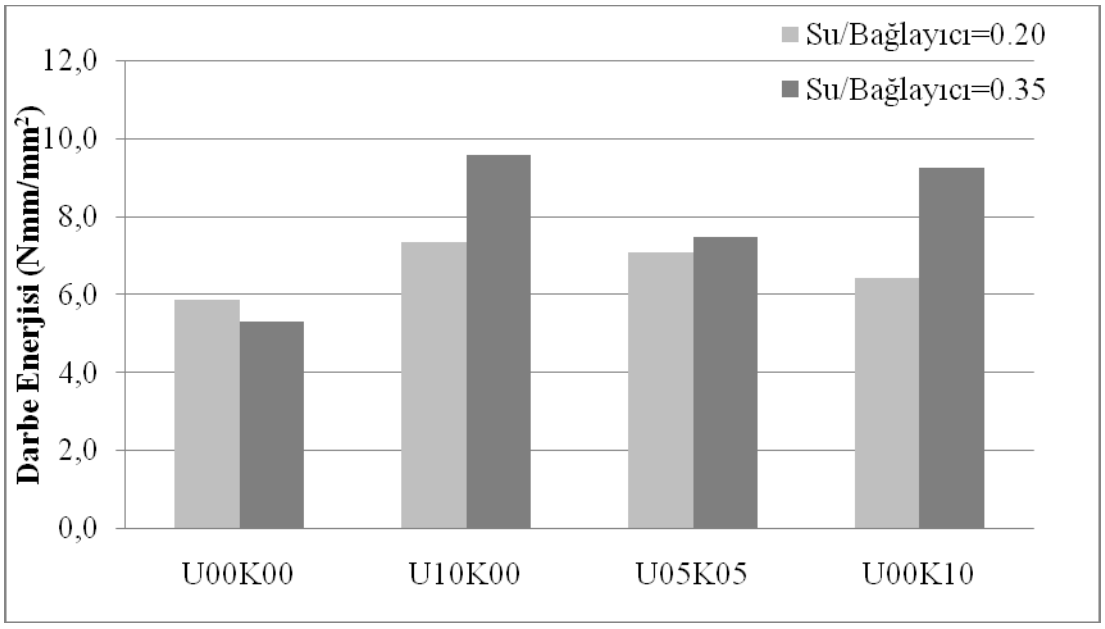


Şekil 5.15 : %1,5 lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri.

Şekil 5.15, %1,5 oranında lif içeren üretim serilerinin darbe enerji yutma değerlerini göstermektedir. Hacimce %1,5 oranında lif içeren üretim serilerinin darbe enerji yutma değerlerini yalın matrislere kıyasla daha fazla olduğu her iki matris türünde de görülmektedir.

Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde uzun lif miktarının azalmasıyla birlikte darbe enerji yutma değerlerinin sistematik olarak düştüğü görülmektedir. Ancak su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde benzer duruma rastlanmamıştır.

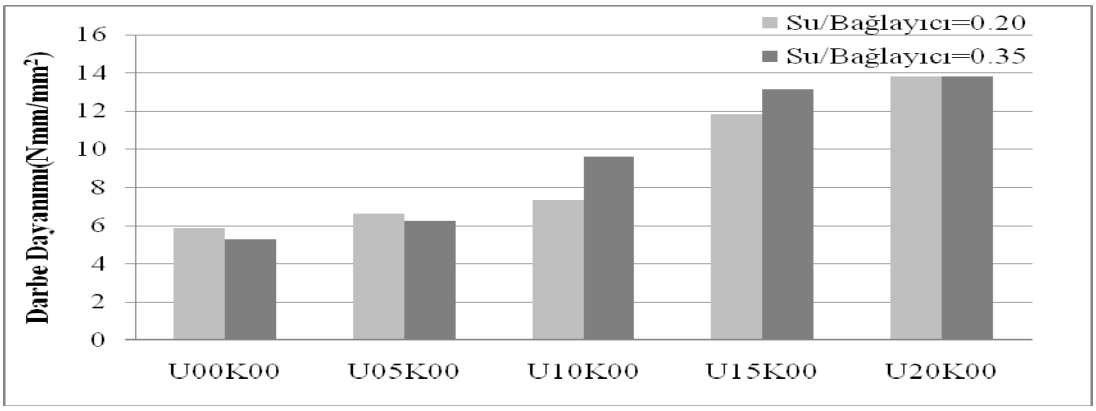
Her iki matris türünde de %1,5 oranında sadece uzun lif içeren üretim serilerinin darbe dayanımlarının en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Böylece, daha önce yapılan açıklamalar doğrultusunda, uzun liflerin matrisin darbe dayanımını kısa liften daha fazla arttırdığı söylenebilir.



Şekil 5.16 : %1,0 lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri.

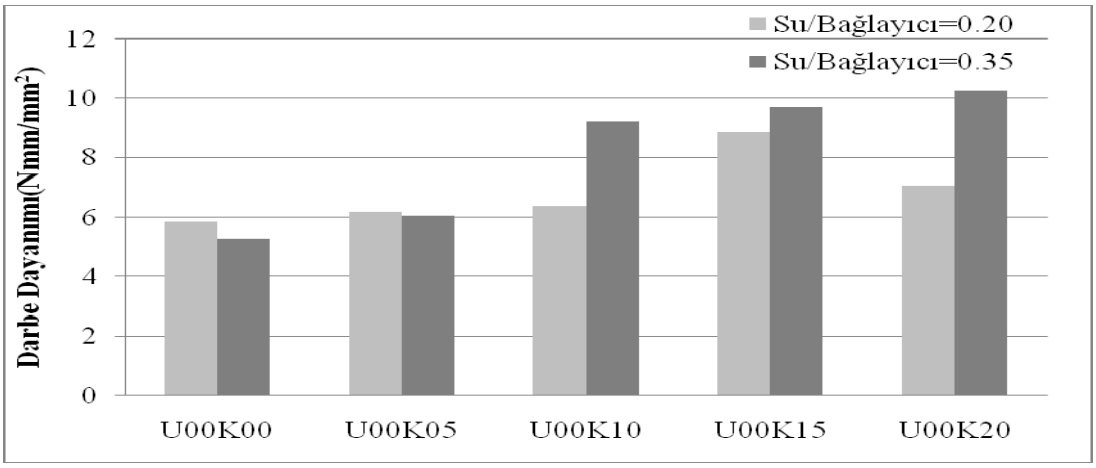
Şekil 5.16, %1,0 oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerlerini karşılaştırmaktadır. Şekil incelendiğinde, su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu lifli üretim serilerinin enerji yutma kapasitelerinin yalın matrise kıyasla arttığı görülmektedir. Darbe enerji yutma değerinin en fazla artış gösterdiği üretim serisi sadece %1,0 oranında kısa lif içeren 20U10K00 üretim serisidir (%23,7). Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu üretim serilerinde lifli matrislerin enerji yutma değerlerinin yalın matrise kıyasla arttığı gözlenmiştir. %1,0 oranında lif içeren

üretim serilerinde sadece uzun lif içeren 35U10K00 ve sadece kısa lif içeren 35U00K10 üretim serilenin enerji yutma değerlerinin %1,0 oranında lif içeren 35U05K05 hibrit üretim serisinden fazla olduğu görülmektedir.



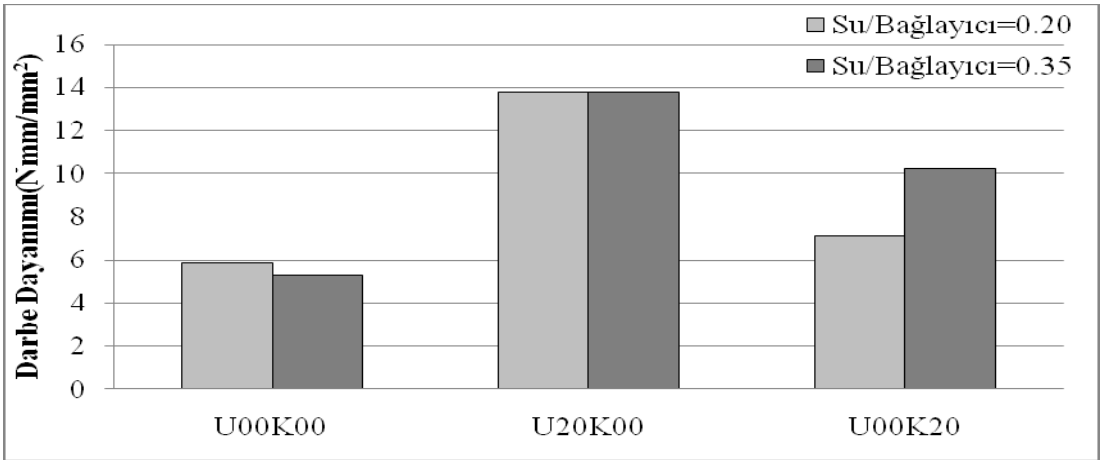
Şekil 5.17 : Sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri.

Şekil 5.17, sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın harçların darbe enerji yutma değerlerini karşılaştırmaktadır. Sadece uzun lif içeren üretim serilerinin enerji yutma değerlerinin her iki matriste de lif miktarının artmasıyla sistematik olarak artmaktadır. Yutulan enerjinin %2,0 lif oranında maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde %2,0 lif içeren matrisin enerji yutma kapasitesi yalın matrise kıyasla %134,0 oranında artmaktadır. Aynı lif içeriğinde su/bağlayıcı oranının 0,35 olması durumunda bu artış %160,0 tır. Sadece %0,5 oranında uzun lif içeren U05K00 üretim serilerinde su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrisin enerji yutma kapasitesi su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matristen bir miktar fazladır, ancak aradaki fark çok anlamlı değildir.



Şekil 5.18 : Sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri.

Her iki matris tipinde de sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma kapasiteleri Şekil 5.18'de verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde matristeki kısa lif miktarının artmasıyla darbe enerji yutma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde lif miktarının artmasıyla darbe enerji yutma kapasiteleri doğru orantılı olarak artmaktadır, ancak benzer durum su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu üretim serilerinde görülmemektedir. %2,0 oranında kısa lif içeren 20U00K20 üretim serisinin enerji yutma kapasitesi, %1,5 oranında lif içeren 20U15K00 üretim serisinin enerji yutma kapasitesi değerinden düşüktür. Bu durumun, daha önceki paragraflarda da açıklandığı gibi, numunelerin yeterince iyi yerleştirilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

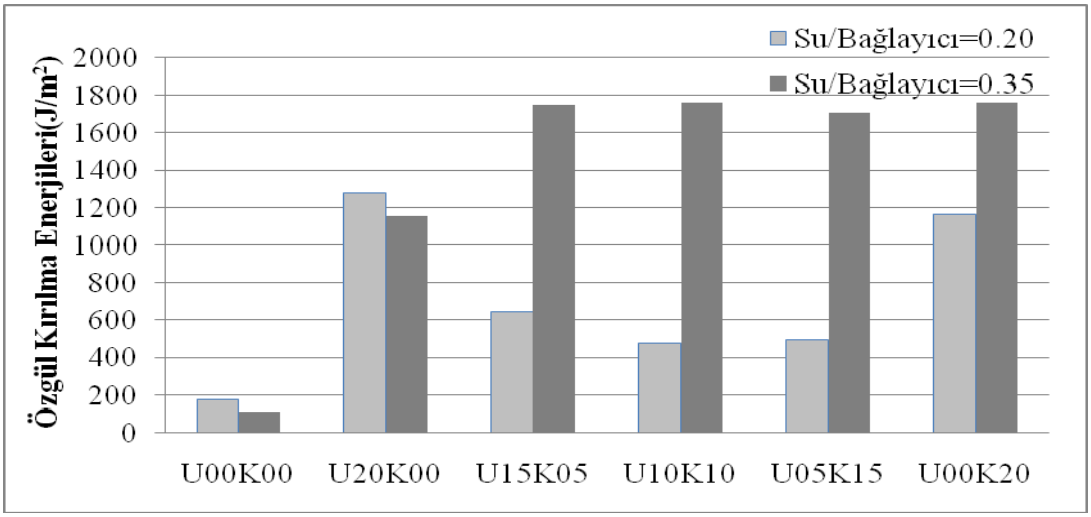


Şekil 5.19 : %2,0 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri.

%2,0 oranında aynı tip lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin darbe enerji yutma değerleri şekil 5.19'da karşılaştırılmaktadır. Bu şekil incelendiğinde, su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde %2,0 oranında uzun lif içeren U20K00 üretim serisinin darbe enerji yutma kapasitesinin sadece kısa lif içeren U00K20 üretim serisinden fazla olduğu görülmektedir. Benzer durum su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde de görülmektedir. Uzun lif içeren üretim serilerinde su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrisin, su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrislere yakın enerji yutma kapasitelerine sahip olduğu görülmektedir. Kısa lif içeren üretim serilerinde ise, su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrise ait değerlerin su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrise kıyasla %45,1 oranında yüksek olduğu görülmektedir. Benzer durum %1,5, %1,0 ve %0,5 oranlarında lif içeren (kısa veya uzun) üretim serilerinde de görülmektedir.

5.5 Özgül Kırılma Enerjilerinin Değerlendirilmesi

28. gün sonunda, numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyi sonucunda yük-sehim grafikleri çizildi. Özgül kırılma enerjisi, eğilme deneyi sonucu elde edilen yük-sehim grafiğinin altında kalan alanın numune kesit alanına bölünmesiyle hesaplandı. Numunelere ait yük-sehim grafikleri Ekler bölümünde verildi.



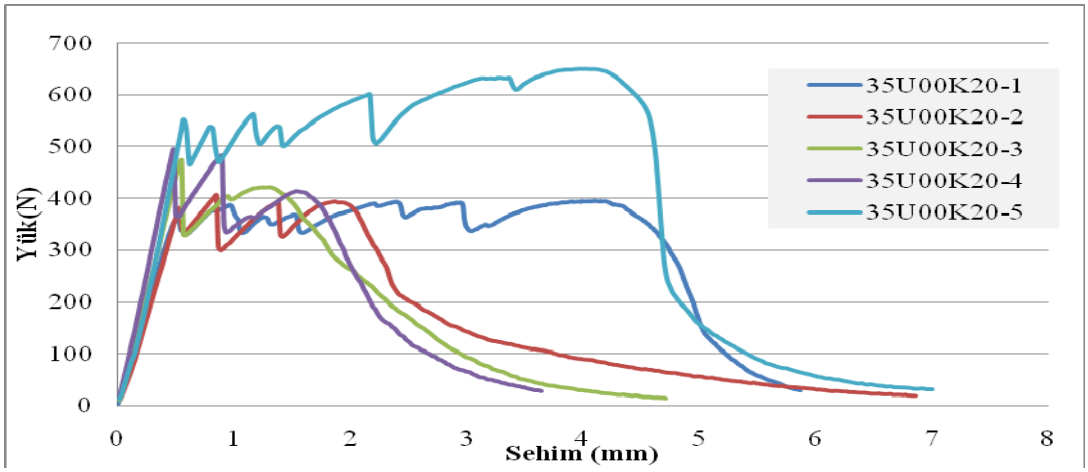
Şekil 5.20 : %2,0 lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri.

%2,0 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri Şekil 5.20'de görülmektedir. Şekil 5.20 incelendiğinde, yalın matrise %2,0 PVA lif katılmasıyla özgül kırılma enerjilerinin, lif içermeyen numunelere göre, her iki matriste de arttığı görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu matrislerde en yüksek kırılma enerjisi değeri %2,0 uzun lif içeren 20U20K00 üretim serisinde gözlendi.

Şekil 5.20, %2,0 oranında aynı tip lif (sadece uzun veya sadece kısa) içeren üretim serileri dikkate alınarak incelendiğinde, sadece uzun lif içeren U20K00 üretim serilerinde her iki matris tipi içinde kırılma enerjilerin benzer değerlere sahip olduğu görülmektedir. Sadece kısa lif içeren U00K20 üretim serilerinde su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrisin su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrise kıyasla özgül kırılma enerjisi %51,7 oranında yüksek bir değere sahiptir. Bu durum kısa lifin su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matriste yoğun kıvam nedeniyle homojen dağılamamasından ve bu üretim serisinin kalıba kusurlu yerleşmesinden dolayı meydana gelmiştir.

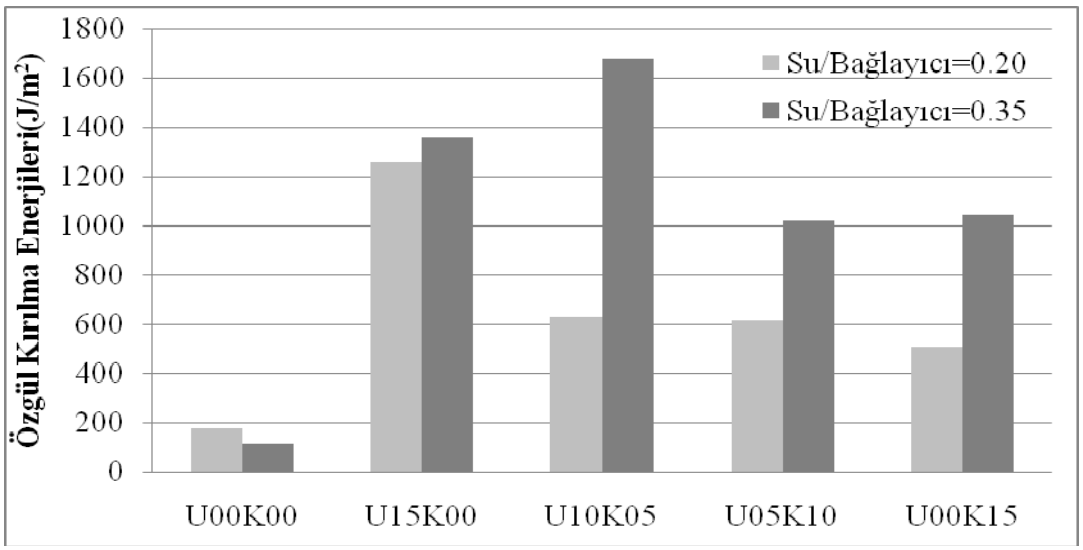
Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde karışımdaki kısa lifin artmasıyla özgül kırılma enerjilerinin arttığı görülmektedir. %2,0 sadece kısa lif içeren 35U00K20

üretim serisinin kırılma enerjisi yalın matrise kıyasla %1449,2 oranında arttığı gözlendi. Bu durum, darbe enerji yutma değerlerinin yorumlanmasında yapılan açıklamalara benzer şekilde değerlendirilebilir. Bu üretim serisine ait yük-sehim grafikleri her 5 numune için ayrı ayrı şekil 5.30'da görülmektedir.



Şekil 5.21 : %2,0 kısa lif içeren su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu 35U00K20 üretim serilerinin gerilme-sehim grafikleri.

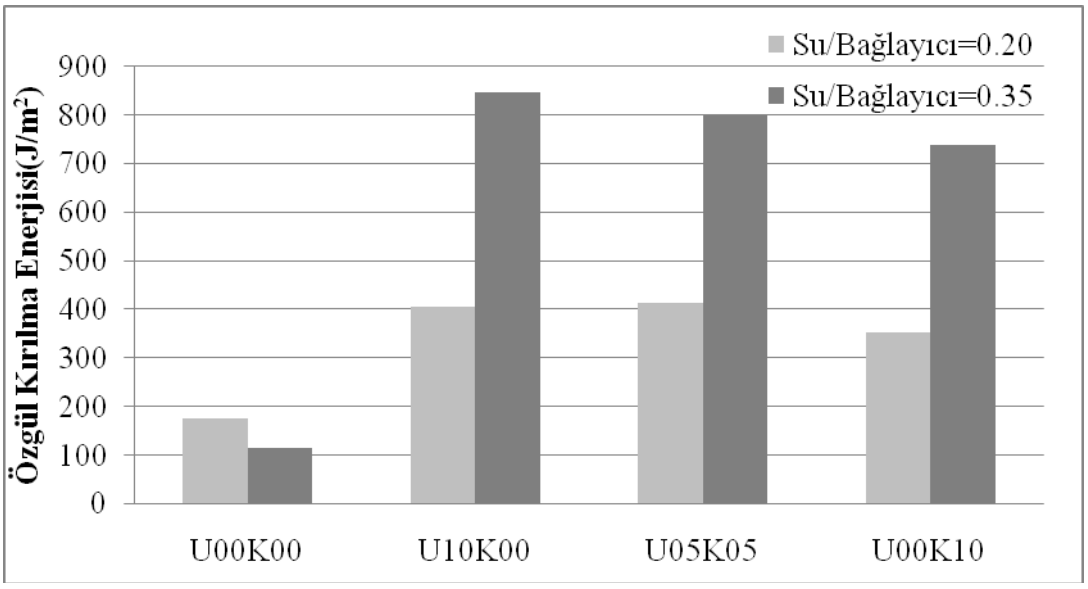
Şekil 5.21 incelendiğinde, eğilme deneyine tabi tutulan numunelerde matriste ilk çatlağın oluşmasından sonra matrisin yük taşımaya devam ettiği görülmektedir. Matris içerisinde rastgele dağılmış olan kısa lifler ilk çatlak oluşmasından sonra yük taşımaya devam etmekte ve çatlağın büyümesini engellemektedir. Deney sonrasında yapılan gözlemlerde numunelerde çoklu çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu durum, Şekil 5.27'de görülen şekil değiştirme sertleşmesinin oluşmasını sağlamıştır.



Şekil 5.22 : %1,5 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri.

%1,5 oranında PVA lif içeren matrislerin ve yalın(lif içermeyen) matrislerin özgül kırılma enerjileri Şekil 5.22'de karşılaştırılmaktadır. Şekil 5.22 incelendiğinde, her iki matriste de lifli üretim serilerinin yalın matrislere kıyasla özgül kırılma enerjilerinin daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrislerde özgül kırılma enerjisi %1,5 oranında sadece uzun lif içeren 20U15K00 üretim serisinde en büyük değere sahip olduğu gözlenmiştir (%623,5 artış). Aynı matriste karışımdaki uzun lif miktarının azalmasıyla (kısa lif miktarının artmasıyla) özgül kırılma enerjileri azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde %1,0 uzun ve %0,5 kısa lif içeren 35U10K05 hibrit üretim serisinin yalın matrise kıyasla kırılma enerjisinin % 1378,0 oranında arttığı görülmektedir.

Şekil 5.22 incelendiğinde, %1,5 oranında uzun lif içeren U15K00 üretim serilerinin her iki matris türünde de benzer değerlere sahip olduğu görülmektedir. Sadece kısa lif içeren U00K15 üretim serilerinde özgül kırılma enerjisi su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrisin, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrise kıyasla %106,6 oranında fazla olduğu gözlendi.

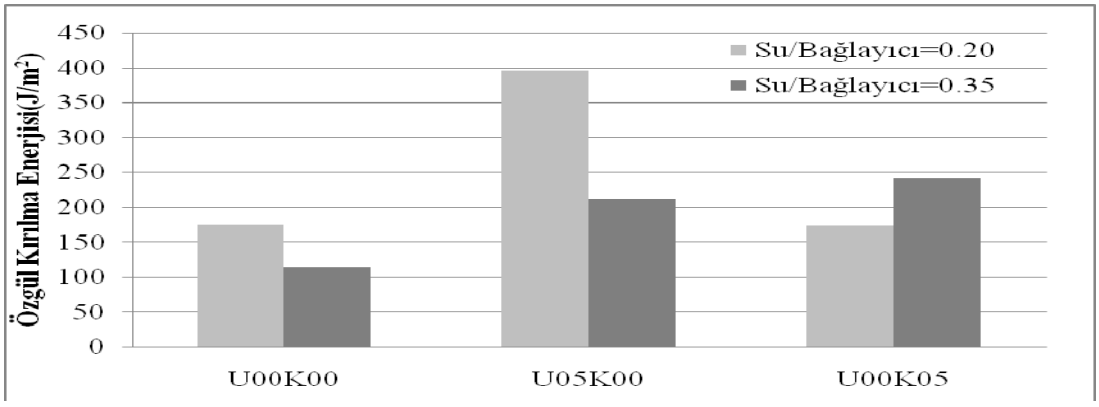


Şekil 5.23 : %1,0 PVA lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri.

Şekil 5.23'de, her iki su/bağlayıcı oranı için toplam %1,0 hacim oranında lif içeren üretim serilerinin ve yalın (lif içermeyen) matrislerin özgül kırılma enerjisi değerleri toplu olarak görülmektedir. Buna göre, yalın matrise %1,0 oranında lif ilave edilmesiyle kırılma enerjisinin arttığı görülmektedir. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matriste özgül kırılma enerjisindeki en büyük artışın %1,0 oranında sadece uzun lif

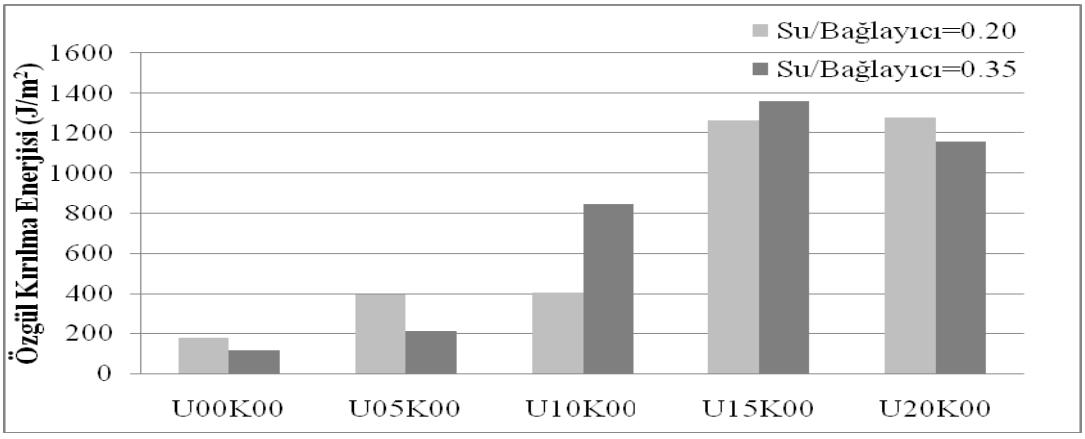
içeren U10K00 üretim sersinde olduğu görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu üretim serilerinde, lifli matrislerin, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrislere kıyasla daha fazla özgül kırılma enerjisi değerlerine sahip oldukları görülmektedir.

Şekil 5.23 incelendiğinde, sadece kısa ve sadece uzun lif içeren üretim serilerinde su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrisler su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrislere kıyasla daha fazla kırılma enerjisi değerlerine sahiptirler.



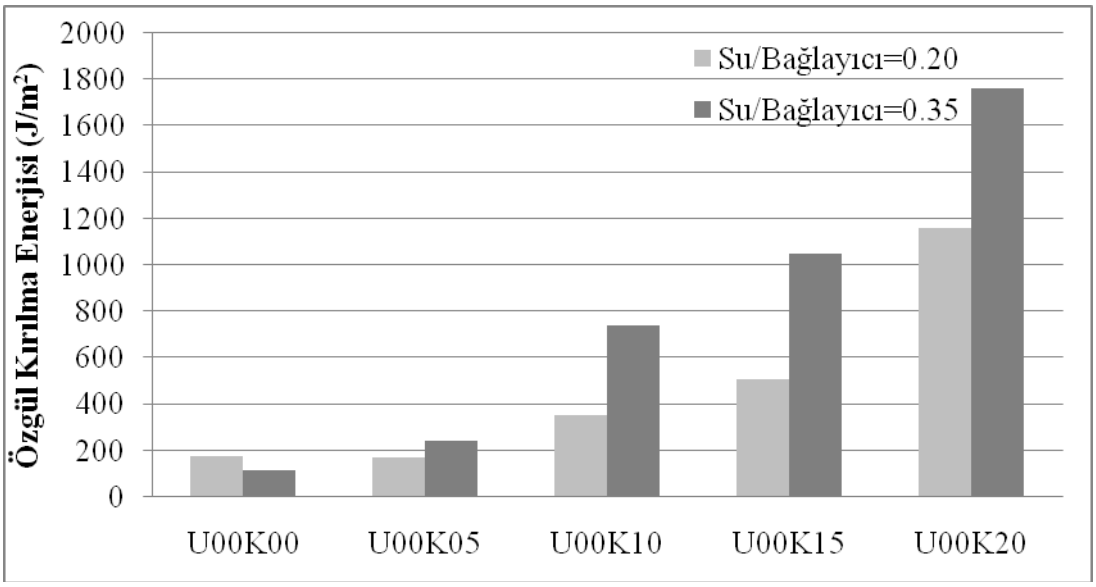
Şekil 5.24 : %0,5 lif(sadece uzun veya sadece kısa) içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri.

%0,5 oranında lif içeren (sadece uzun veya sadece kısa) üretim serilerinin ve yalın(lif içeremeyen) matrislerin özgül kırılma enerjileri şekil 5.24'de verilmektedir. Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrislerde %0,5 oranında uzun lif içeren U05K00 üretim serisinin, su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matrise kıyasla daha fazla özgül kırılma enerjisi değerine sahip olduğu görülmektedir. %0,5 oranında kısa lif içeren üretim serilerinde su/bağlayıcı oranı 0,35 olan matris su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matrise kıyasla yüksek özgül kırılma enerjisi değerine sahiptir.



Şekil 5.25 : Sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri.

Şekil 5.25'de sadece uzun lif içeren üretim serilerinin ve yalın harçların özgül kırılma enerjileri karşılaştırılmaktadır. Her iki matris türünde de karışımdaki uzun lif oranının artmasıyla kırılma enerjileri artmaktadır. Ancak, su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu %2,0 oranında lif içeren üretim serilerine ait değerlerde bir miktar düşüş gözlenmiştir. %0,5 oranında uzun lif içeren üretim serilerinden su/bağlayıcı oranı 0,20 olan 20U05K00 numunelerinin kırılma enerjisinin su/bağlayıcı oranı 0,35 olan üretim serisi 35U05K00'a kıyasla %46,7 oranında fazla olduğu gözlendi. Lif oranının %1,0 ve %1,5 olduğu üretim serilerinde su/bağlayıcı oranı 0,35 olan üretim serilerinin su/bağlayıcı oranı 0,20 olan üretim serilerine kıyasla daha fazla kırılma enerjilerine sahip olduğu görülmektedir. %2,0 uzun lif içeren üretim serilerinde her iki matris tipinde de benzer özgül kırılma enerjisi değerleri elde edildi.



Şekil 5.26 : Sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjileri.

Sadece kısa lif içeren üretim serilerinin ve yalın matrislerin özgül kırılma enerjisi değerleri Şekil 5.26'da verilmektedir. Her iki matris tipinde de kısa lif miktarının artmasıyla özgül kırılma enerjileri doğru orantılı olarak artmaktadır.En yüksek artış %2,0 oranında kısa lif içeren 35U00K20 üretim serisinin kırılma enerjisi yalın matrise kıyasla %1520,7 oranında artmıştır.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve genel çıkarımlar bir önceki bölümde detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu bölümde ise sonuçlar genel olarak özetlenmiştir.

- Yapılan üretimler sırasında yalın matrise PVA lif ilave edilmesinin harcın işlenebilirliğini olumsuz etkilediği gözlendi. Özellikle, %2,0 oranında sadece kısa lif içeren çimento esaslı kompozitlerin işlenebilirliğin oldukça fazla oranda düştüğü görüldü Kısa PVA liflerin daha fazla özgül yüzey alanına sahip olması nedeniyle uzun PVA liflere kıyasla çimento esaslı kompozitin işlenebilirlik değerini daha fazla düşürdüğü görüldü..
- PVA lif donatılı çimento esaslı kompozitler ve yalın harçlar kıyaslandığında PVA liflerin basınç dayanımını yüksek oranlarda arttırmaktadır. Donatısız matrisin basınç dayanımı su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu üretimde 101,1 MPa iken, %0,5 uzun ve %1,5 kısa lif içeren 20U05K15 hibrit üretim serisinin basınç dayanımı %63,1 oranında artarak 164,9 MPa değerine ulaşmıştır. Kısa lifin %2,0 oranında karışıma ilave edildiği su/bağlayıcı oranı 0,20 olan matriste işlenebilirlik değerinin çok düşük olması dolayısıyla kalıba zor yerleştirilen numunelerin basınç dayanım değerlerinin yalın harca kıyasla düşük olduğu sonucu elde edildi.
- Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu çimento esaslı kompozitlerde karışıma lif ilave edilmesiyle eğilme dayanımlarının düştüğü sonucu elde edildi. En fazla düşüş %2,0 kısa lif içeren 20U00K20 üretim serisinde gözlendi. Bunun sebebi, yüksek lif oranı ve matrisin vizkozitesinin de yüksek olmasına bağlı olarak liflerin matris içerisinde homojen dağılamamasının sonucudur.
- Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde lifli harcın yalın harca kıyasla eğilme dayanımlarının yüksek olduğu, ancak, sadece %2,0 oranında uzun lif içeren 35U20K00 üretim serisinin yalın harca kıyasla eğilme dayanımının %3,7 oranında düştüğü görüldü. Bu üretim serisinin işlenebilirliğinin çok

düşük olması sonucu kalıplara zor yerleştirilmesinin eğilme dayanımında da olumsuz etkisi görülmektedir.

- Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan üretim serilerinde lifli harçların darbe enerji yutma kapasitelerini yalın harca kıyasla arttığı sonucuna varıldı. En fazla artış %2,0 oranında sadece uzun lif içeren üretim serilerinde elde edilmiştir. Çalışmalar neticesinde karışımdaki uzun lif oranının azalmasıyla darbe enerji yurma kapasitesinin azaldığı sonucu elde edildi. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu üretim serilerinin darbe enerji yutma kapasiteleri, su/bağlayıcı oranı 0,20 olan üretim serilerine kıyasla genel olarak yüksek olduğu gözlendi.
- Özgül kırılma enerjilerinin yalın matrise PVA lif ilave edilmesiyle arttığı sonucu eldeedildi. Su/bağlayıcı oranının 0,20 olduğu üretim serilerinde %2,0 sadece uzun lif içeren U20K00 ve %2,0 sadece kısa lif içeren üretim serilerinde özgül kırılma enerjilerinin yalın matrise kıyasla oldukça yüksek oranlarda arttığı gözlendi. Su/bağlayıcı oranının 0,35 olduğu matrislerde hibrit üretim serilerinin özgül kırılma enerjilerinin yakın değerlerde olduğu ve %2,0 sadece uzun lif içeren U20K00 üretim serisinden yüksek değerlerde olduğu gözlendi.

Bu çalışma süresince elde edilen deney sonuçlarına ve gözlemlere dayanılarak, gelecek çalışmalar için aşağıdaki bazı öneriler yapılabilir.

- PVA lifli çimento esaslı kompozitlerin donma çözünme çevrimlerine karşı performanslarının değerlendirilmesi için çalışmalar,
- Lif donatılı harçlarda numune boyutunun çimento esaslı kompozitin özellikleri üzerine etkilerinin belirlenebilmesi için çalışmalar,
- PVA liflerin diğer liflerle (cam elyaf, polipropilen vb.) hibrit kullanılması ile elde edilecek çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması.

KAYNAKLAR

[1] **Erdoğan, T. Y.,** Beton, Mayıs 2003, ODTÜ Yayıncılık, Ankara.

[2] **Kurt, G.,** Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, 2006, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

[3] **Avar, D.,** Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi, 2006, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

[4] **Yeğinboğalı, Asım., Ertün, Tomris., 2007.** " Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar", Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

[5] **Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M. Ve Uyan, M.,** 2004. " Her Yönüyle Beton" İstanbul, s.1-48

[6] **Şahan, M.A., 2006.** " CEM I 42.5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliği", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[7] **Maes P.,** "Université catholique de Louvain Département d'électricité" http://www.engineeringcivil.com/cuore-concrete-nano-silica.html

[8] **Acun S.,** 2000. Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[9] **Bunsell, A.R.,** 1988. Fiber Reinforcement for Composite Materials, Vol:2 *Composite Materials Series*, *Elseiver Science*, The Netherlands.

[10] **Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T., Hoshiro, H.,** Properties of PolyvinylalcoholFiber as Reinforcing Materials for Cementitious Composites, InternationalWorkshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Compositesin Structural Applications, 2005,Honolulu, HI, USA.

[11] **Bartos, P.,** 1992. French Concrete-Properties and Tests, *Elseiver Science Publishers B.V.,* Amsterdam.

[12] **TS 10513,** 1992. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[13] **Chawla K.K.,** 1998. Fibrous Materials, Cambridge University Pres, Cambridge.

[14] **Ekincioglu, Ö. ,** 2003. Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı-bir optimum tasarım, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

[15] **Yıldırım, H., Sertbaş, B. ve Berbergil, V.,** Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda ve Çelik Lif Kullanılmasının İşlenebilirliğe Etkisi, 7.Ulusal beton kongresi, İTÜ, İstanbul, Kasım 2007, s.65-75.

[16] **Shuxin, W. and Victor, C. L.,** Polyvinly Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites: Material Design and Performances, Department ofCivil and Environmental Engineering, University of Michigan, USA.

[17] **Shilang, X., and Qianghua, L,.** An Experimental Study on Bending Behaviour of Cementitious Composites Reinforced in Combination with Carbon Textile and Short-Cut PVA Fiber, Department of Civil Engineering, Dailan University of Technology, China.

[18] **Arısoy, B.,** Lifli Hafif Betonların Optimum Karışım Tasarımı, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 23-25 Mart 2005, s.912-916.

[19] **Soroushian, P. And Bayasi, Z.,** 1991. Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, V.88, No.2, MarchApril.

[20] **Betterman, L.R., Quyang C., and Shah S.P.,** 1995. Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Adv. Cem. Bas*., **2**,s:53-61.

[21] **Zollo, R. F.,** 1997. Fiber-Reinforced Concrete: An Overview after 30 years of Development, Cement and Concrete Composites, 19, s:107-122.

[22] **Bayasi, Z. and Soroushian P.,** 1991. Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 88, 129-134.

[23] **Özyurt, N.,** 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranısı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[24] **Ersoy, H. Y.,** 2001. Kompozit Mazleme, Literatür Yayınları: 66, İstanbul, Türkiye.

[25] **ASTM C 1116,** 1997. Standart Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete, *The American Society for Testing and Materials*, U.S.A.

[26] **Balaguru, P. B. and Shah, S. P.,** Fiber-Reinforced Cement Composites, 1992, McGraw-Hill, Inc.

[27] **Url-1** <http://www.archprecast.org/documents/GFRC_handbook.pdf>, alındığı tarih15.05.2010

[28] **Uğur, A.,** Lif Donatılarının Yüksek Dayanımlı Betonlarda Yarma Dayanımı BasınçDayanımı İlişkisine Etkisi, 2007, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan GüzelSanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

[29] **Rafalco, S. D., Brandon, T. L., Filz, G. M., and Mitchell, J. K.**, 2008,FiberReinforcement For Rapid Stabilization of Soft Clay Soils, vol.2026, pp.21-29,Transportation Research Board of the National Academies.

[30] **Songa, P.S., Hwangb, S. And Sheub, B,C.,** 2005, Strength Properties of Nylon and Polypropylene Fiber Reinforced Concretes, vol.35, pp.1546-1550, Cement and Concrete Research.

[31] **TS EN 12350-6, 2010** Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk, Ankara.

[32] **TS EN 12350-2, 2010** Beton - Taze Beton Deneyleri -Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi, Ankara.

[33] **TS EN 12350-5,** Beton – Taze Beton Deneyleri - Bölüm 5- Yayılma Deneyi, Ankara.

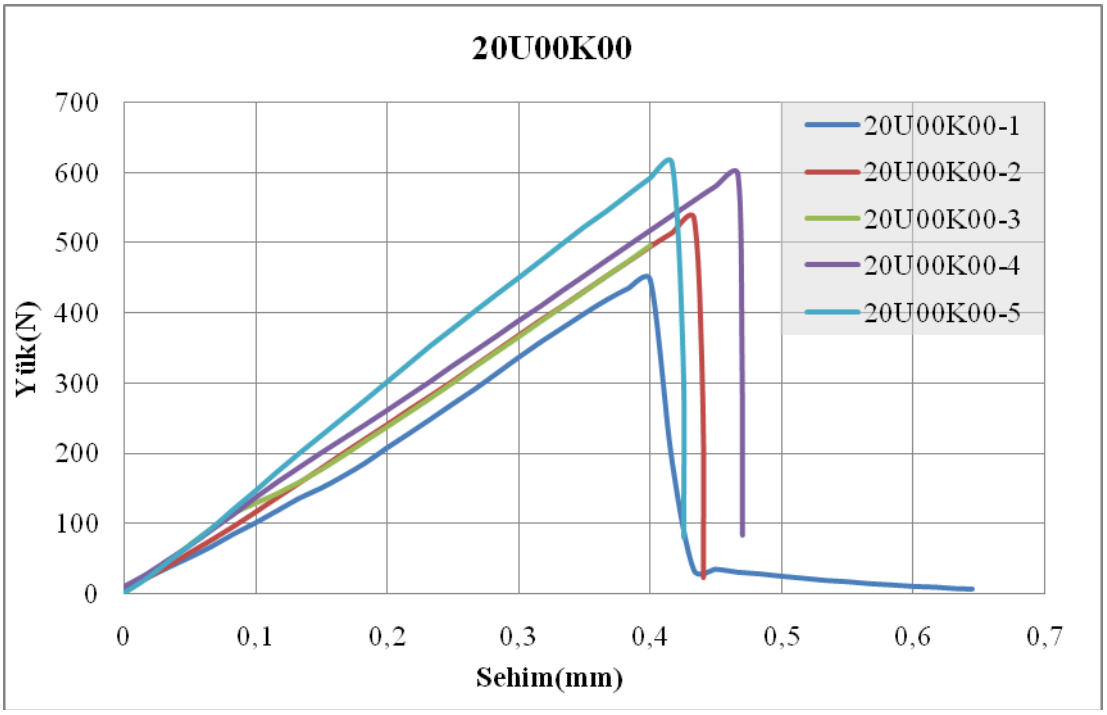
[34] **TS EN 12390-3, 2010,** Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, Ankara.

[35] **TS EN 12390-5, 2010,** Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Ankara.

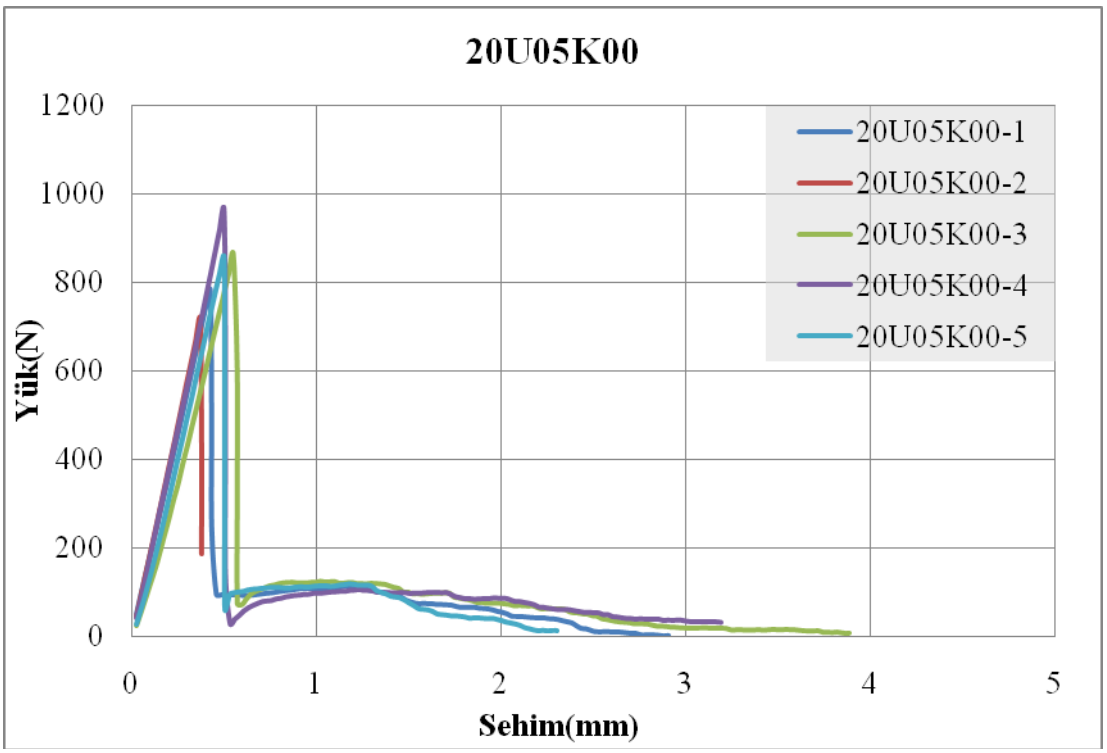
EKLER

EK A : Yük - sehim grafiklerleri.

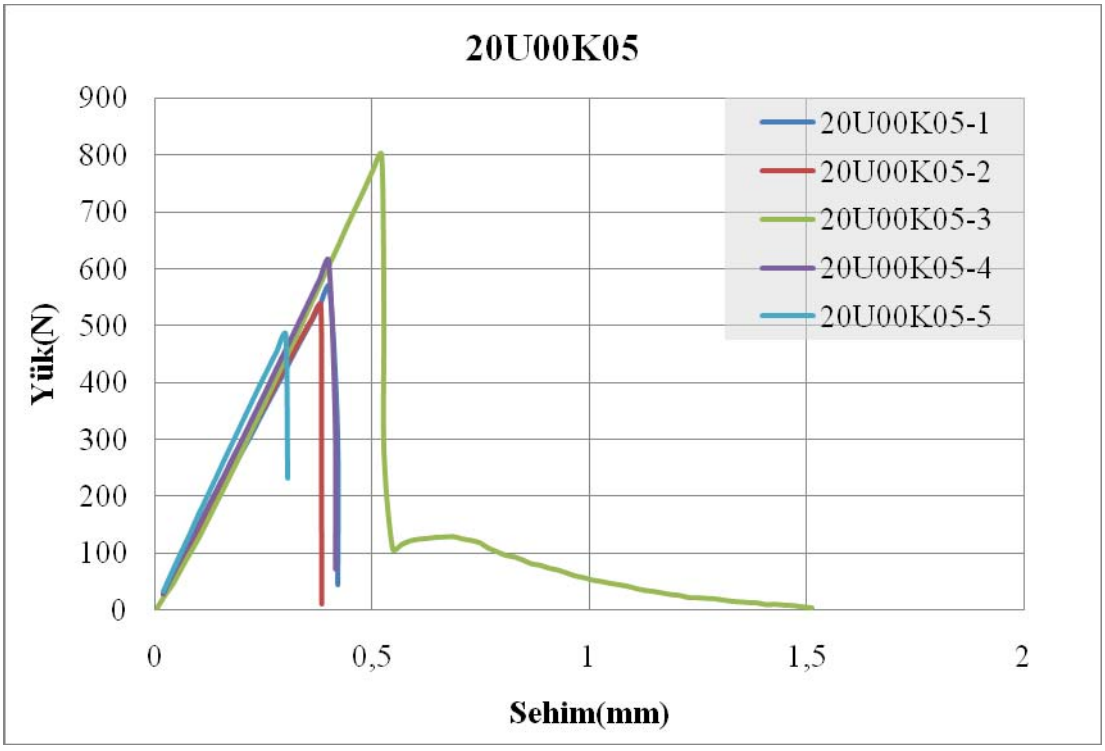
EK A



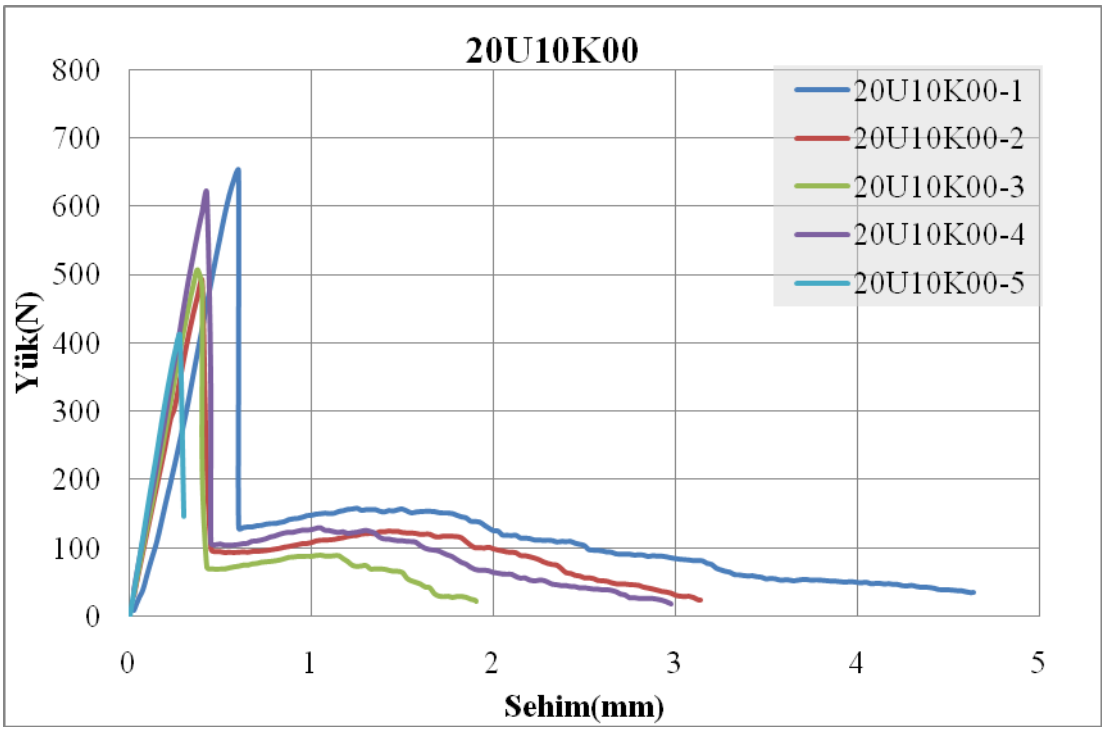
Şekil A.1 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan yalın matrislerin (lif içermeyen) yük-sehim eğrileri.



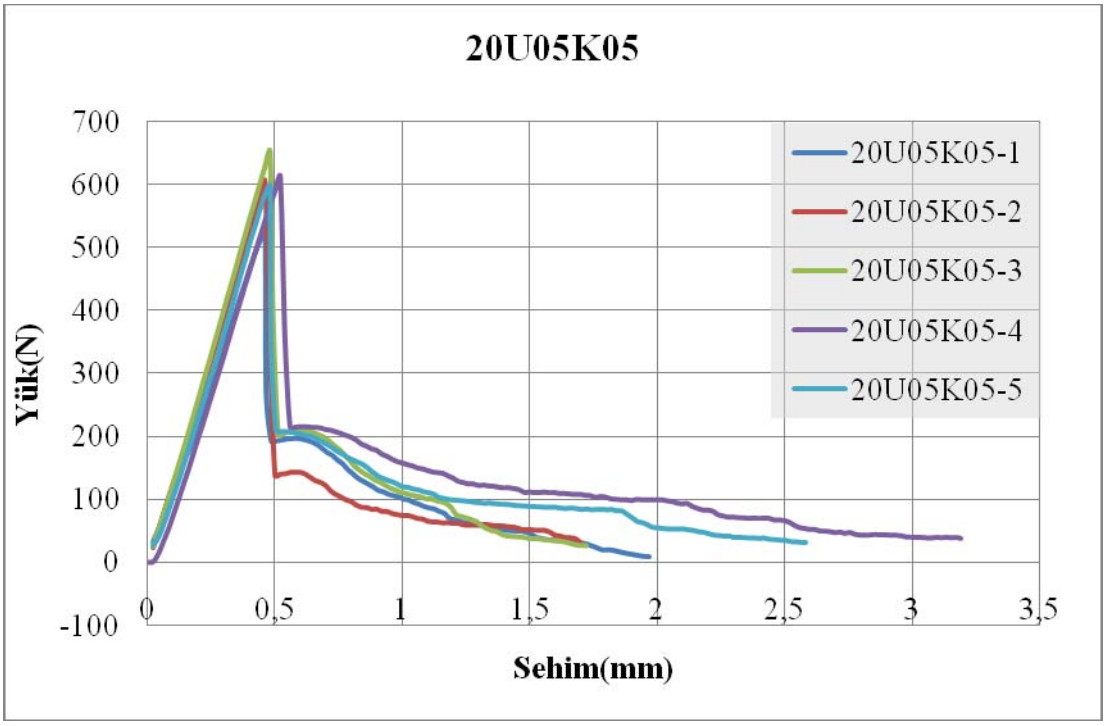
Şekil A.2 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %0,5 oranında uzun lif içeren 20U05K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



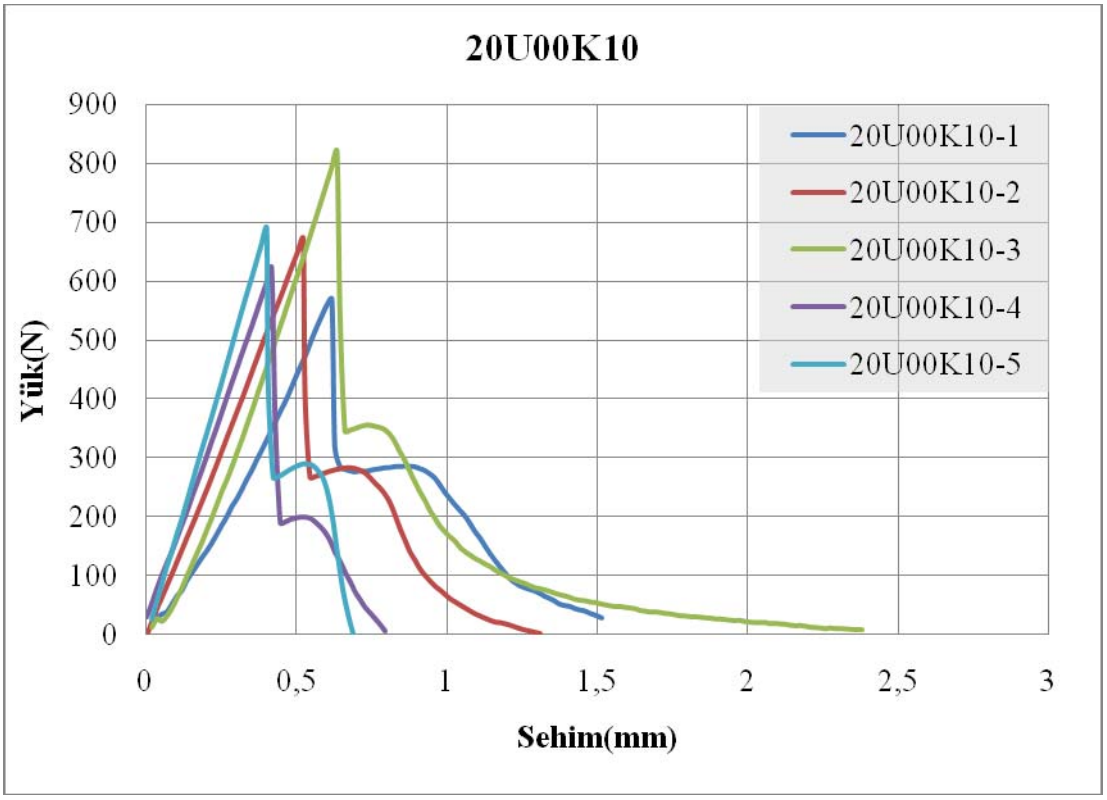
Şekil A.3 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %0,5 oranında kısa lif içeren 20U00K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



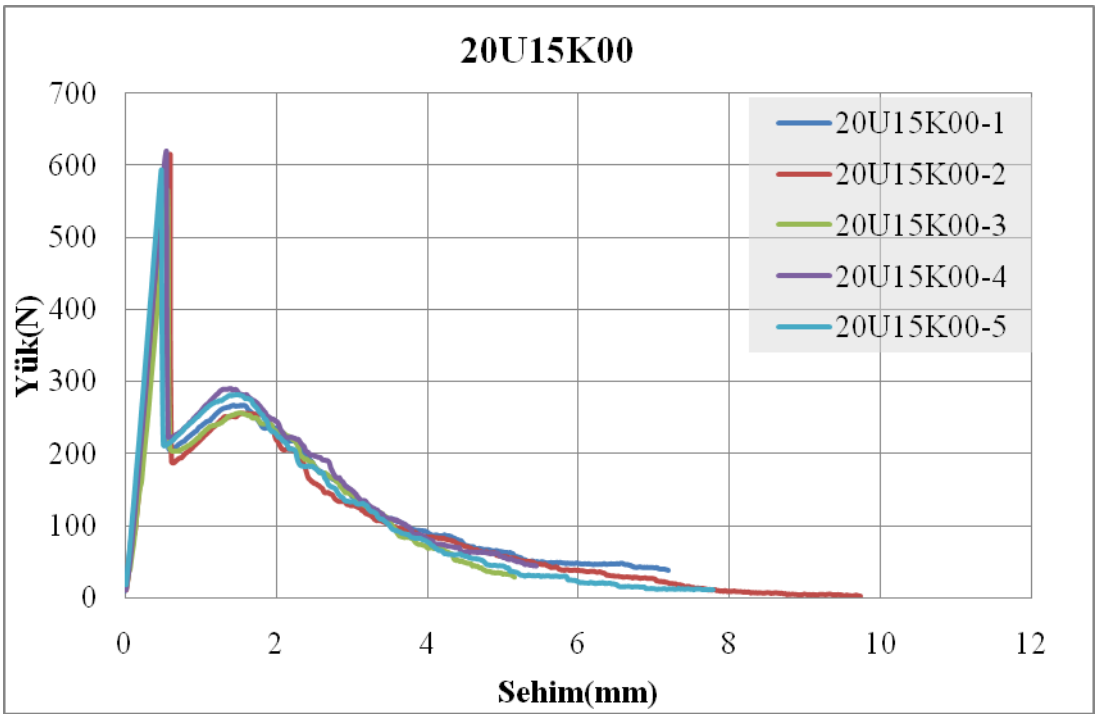
Şekil A.4 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %1,0 oranında uzun lif içeren 20U10K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



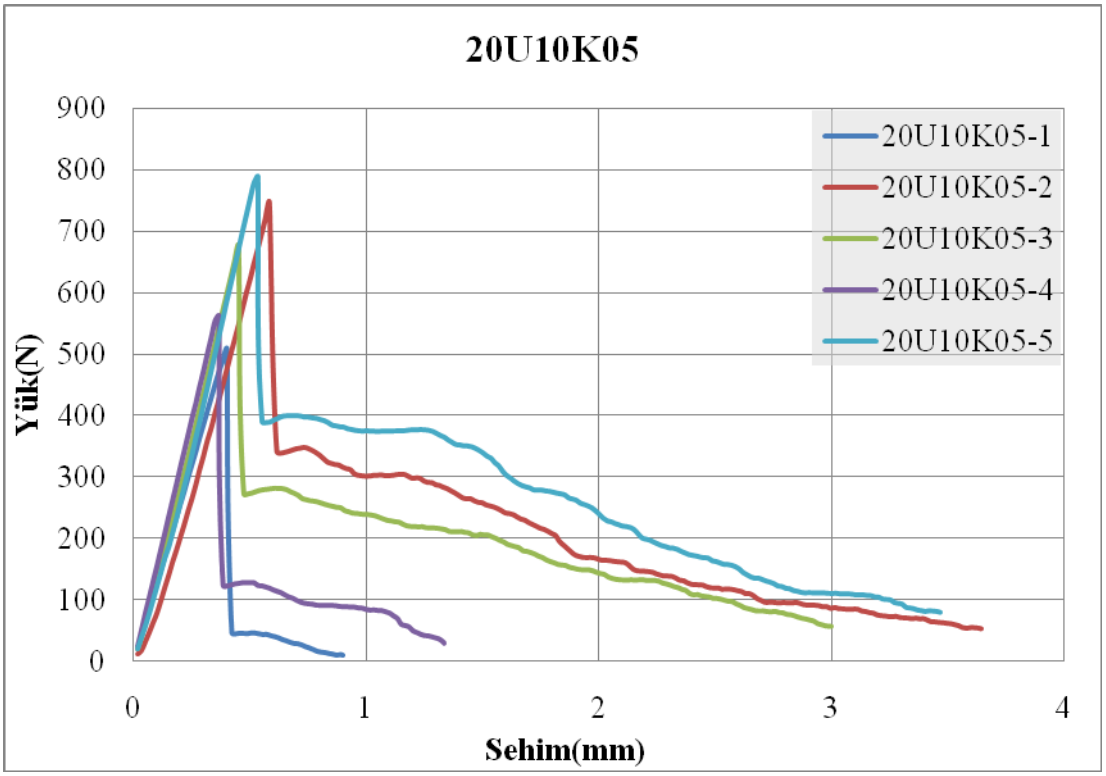
Şekil A.5 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %0,5 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren 20U05K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



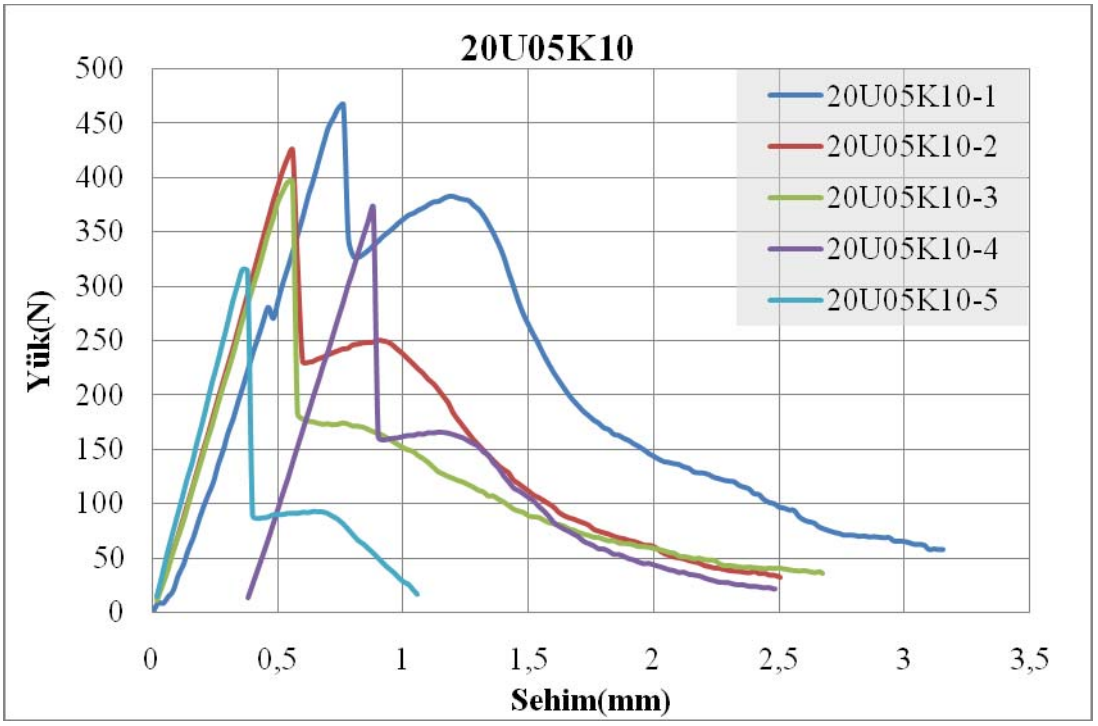
Şekil A.6 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %1,0 kısa lif içeren 20U00K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



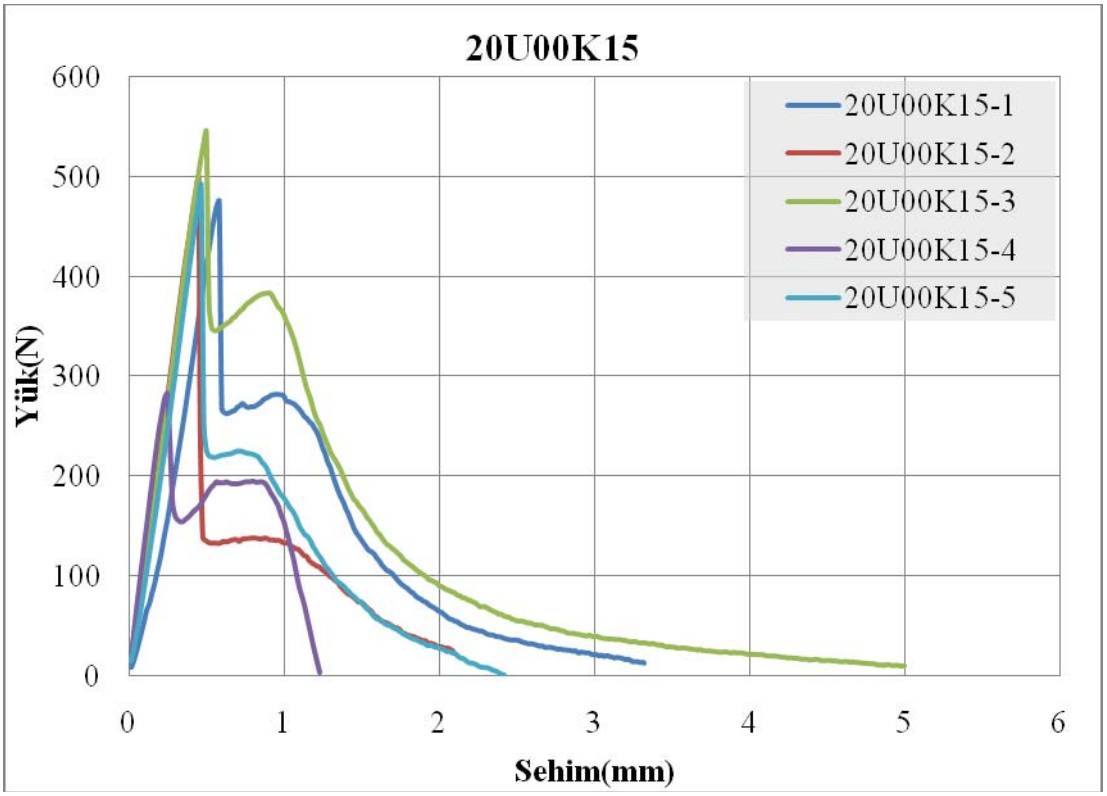
Şekil A.7 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %1,5 uzun lif içeren 20U15K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



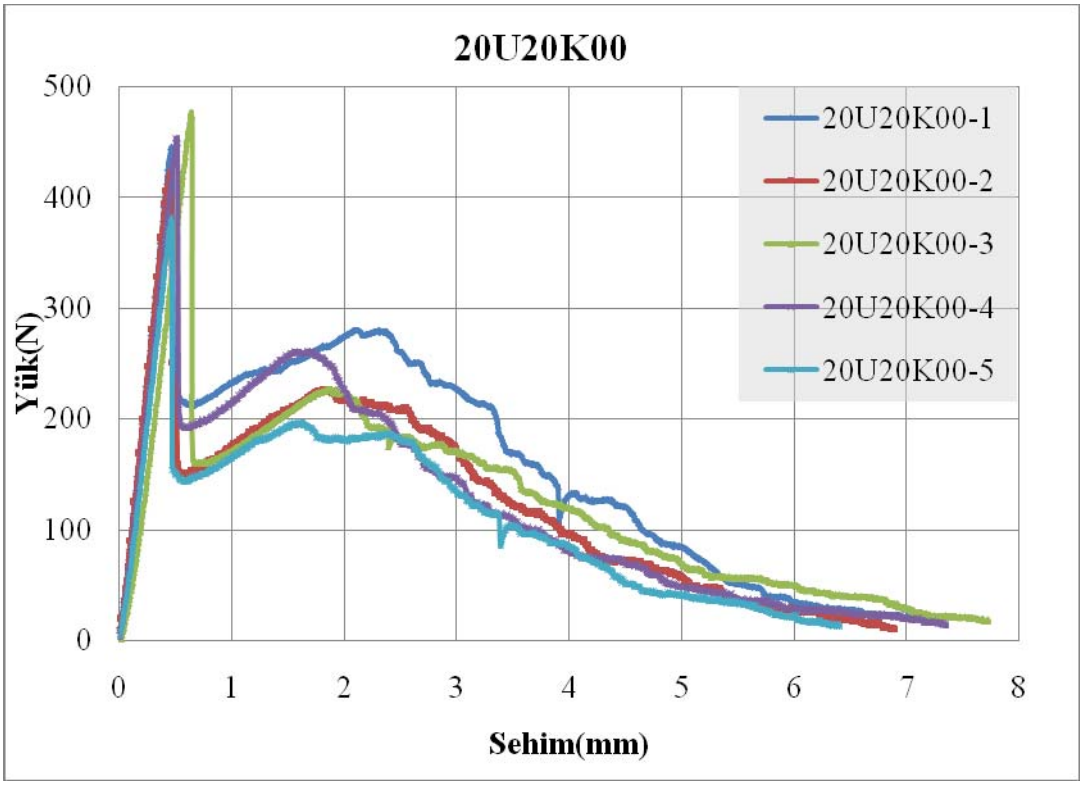
Şekil A.8 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %1,0 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren 20U10K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



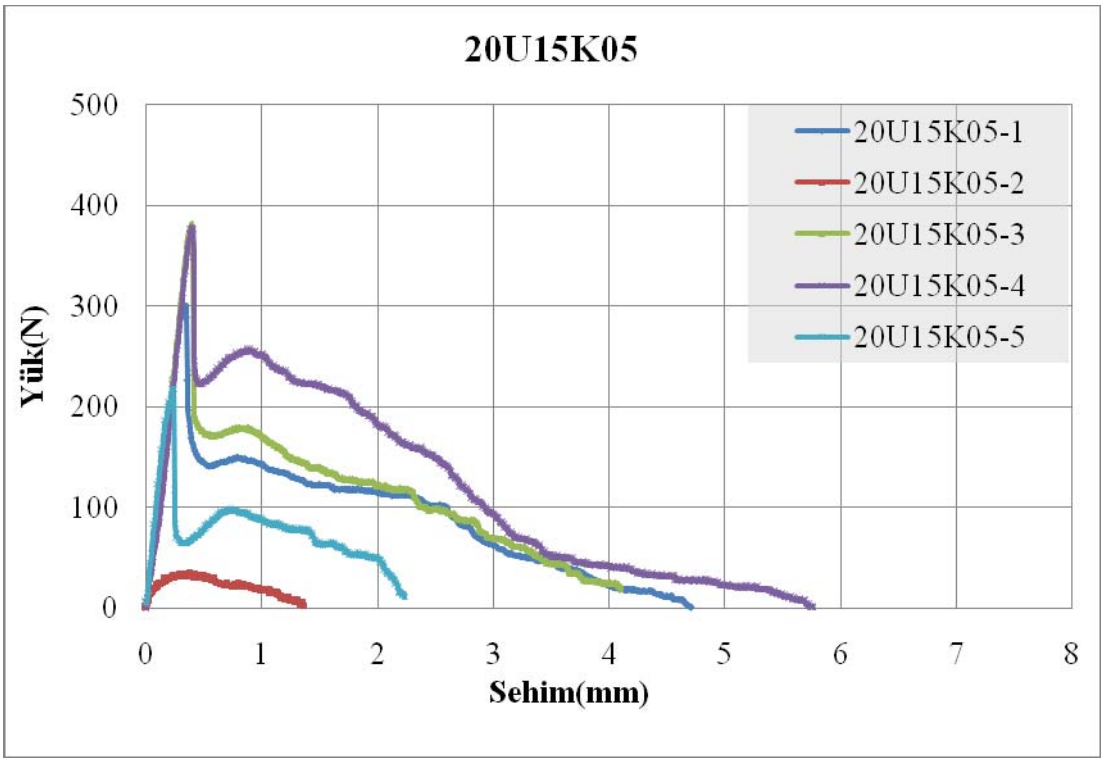
Şekil A.9 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %0,5 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren 20U05K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



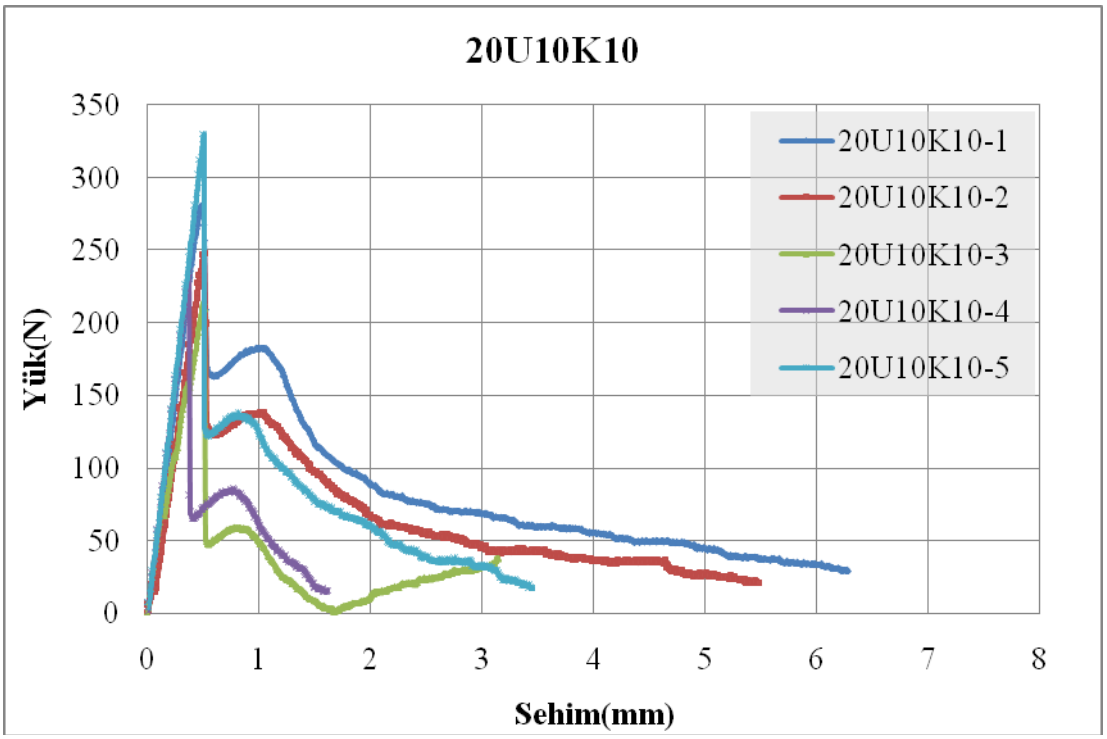
Şekil A.10 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %1,5 kısa lif içeren 20U00K15 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



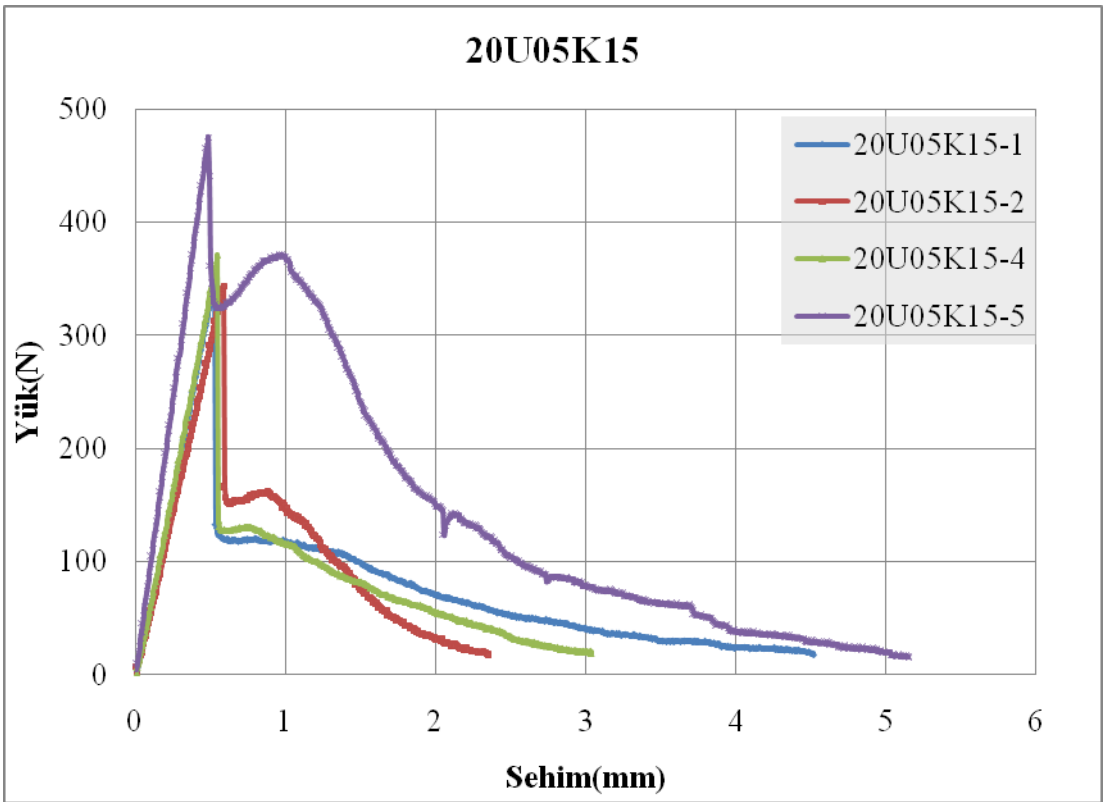
Şekil A.11 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %2,0 uzun lif içeren 20U20K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



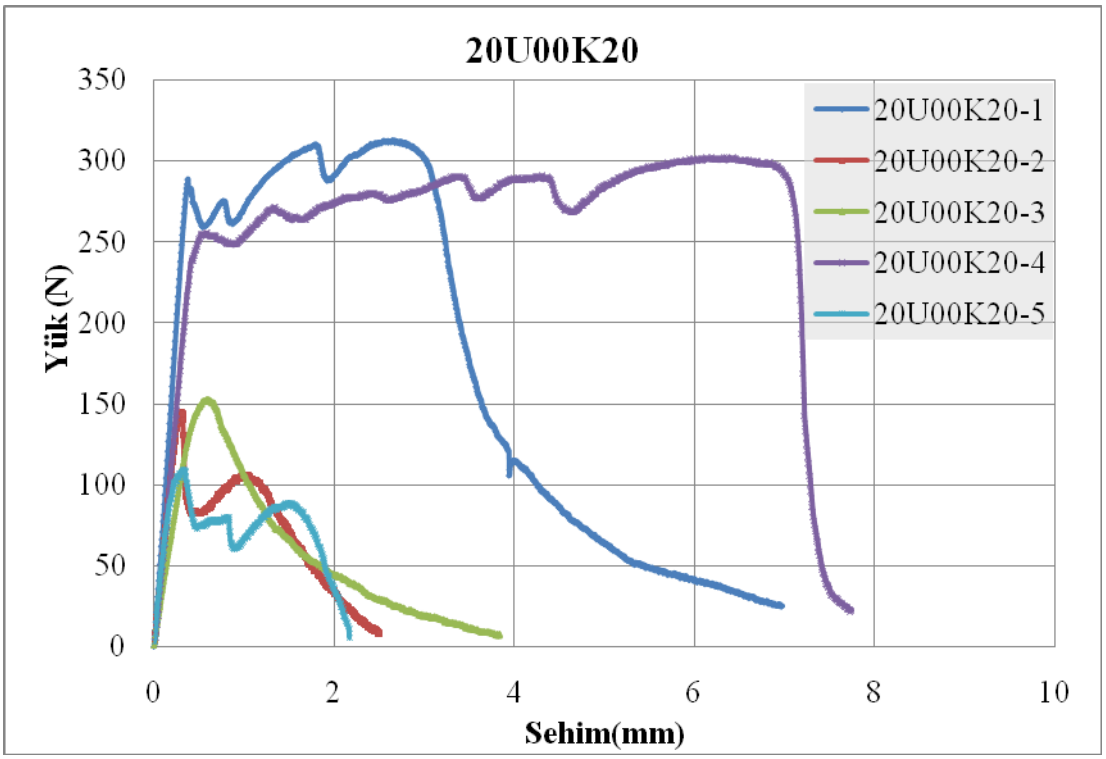
Şekil A.12 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %2,0 uzun lif içeren 20U20K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



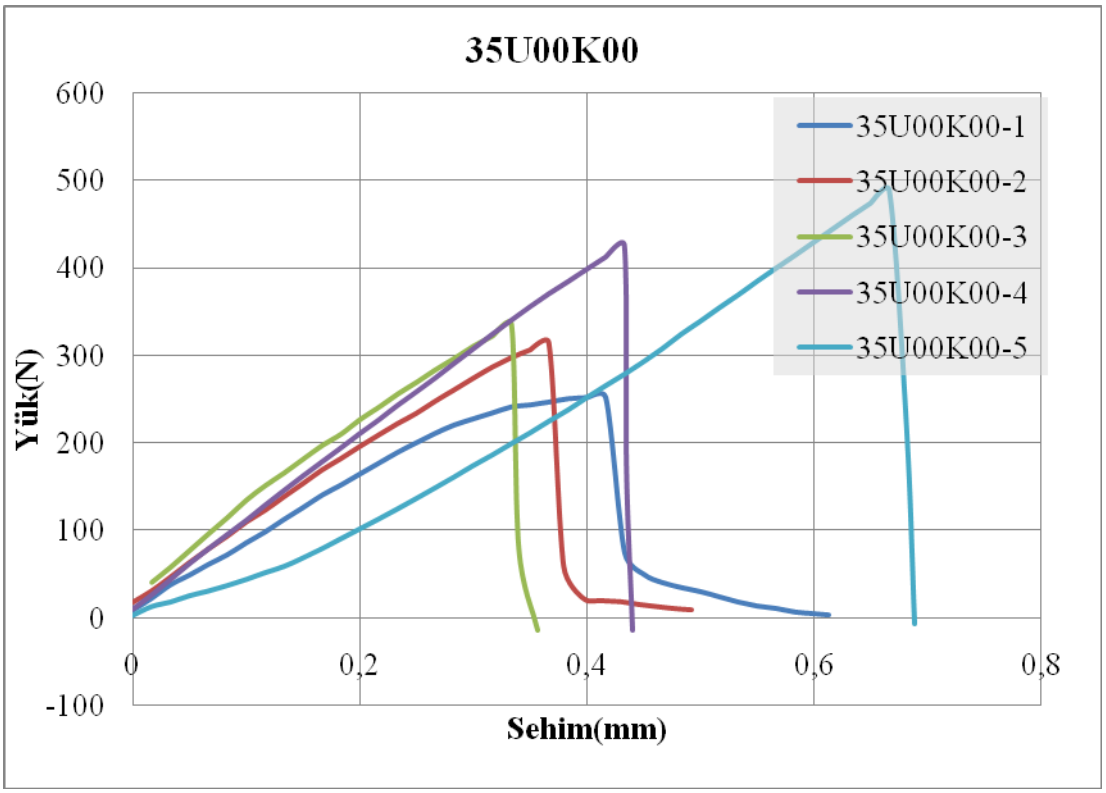
Şekil A.13 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %1,0 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren 20U10K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



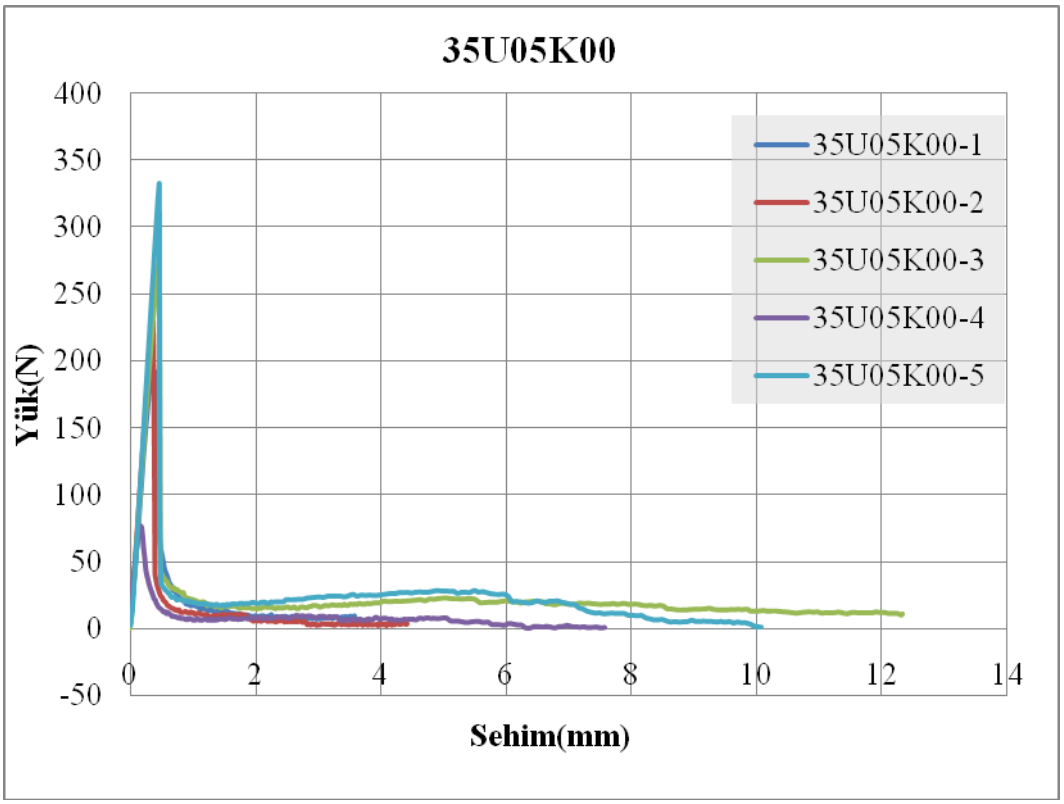
Şekil A.14 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, %0,5 uzun lif ve %1,5 kısa lif içeren 20U05K15 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



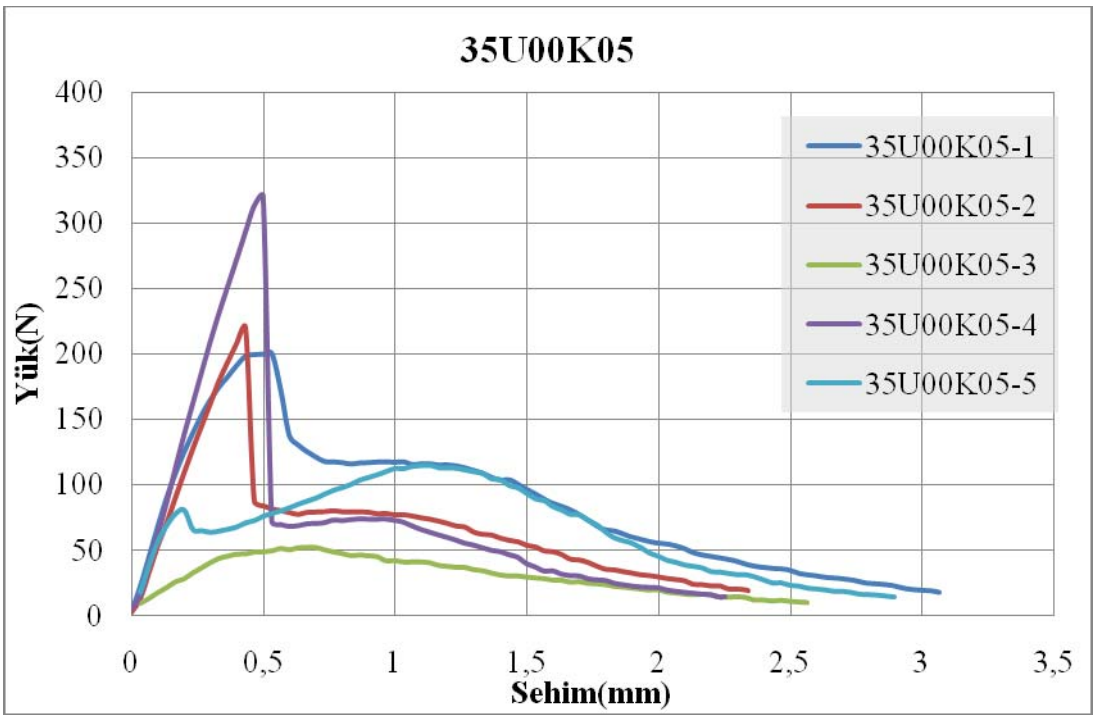
Şekil A.15 : Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan, sadece %2,0 sadece kısa lif içeren 20U00K20 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



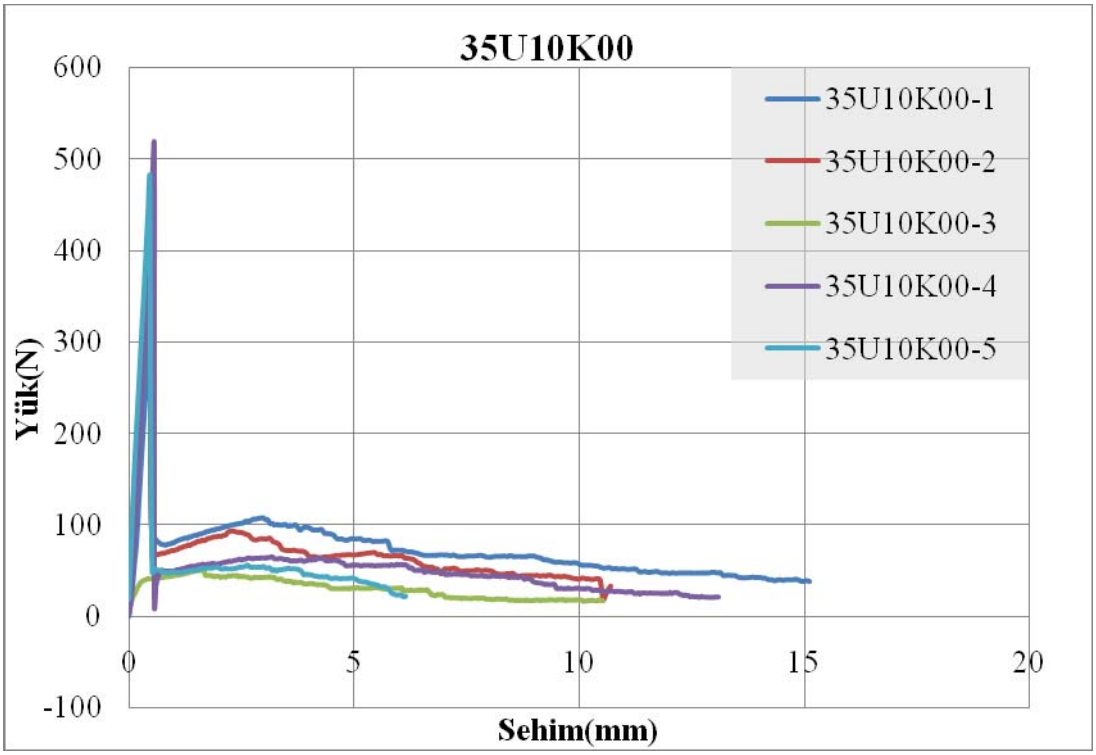
Şekil A.16 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan yalın matrislerin(35U00K00) yük-sehim eğrileri.



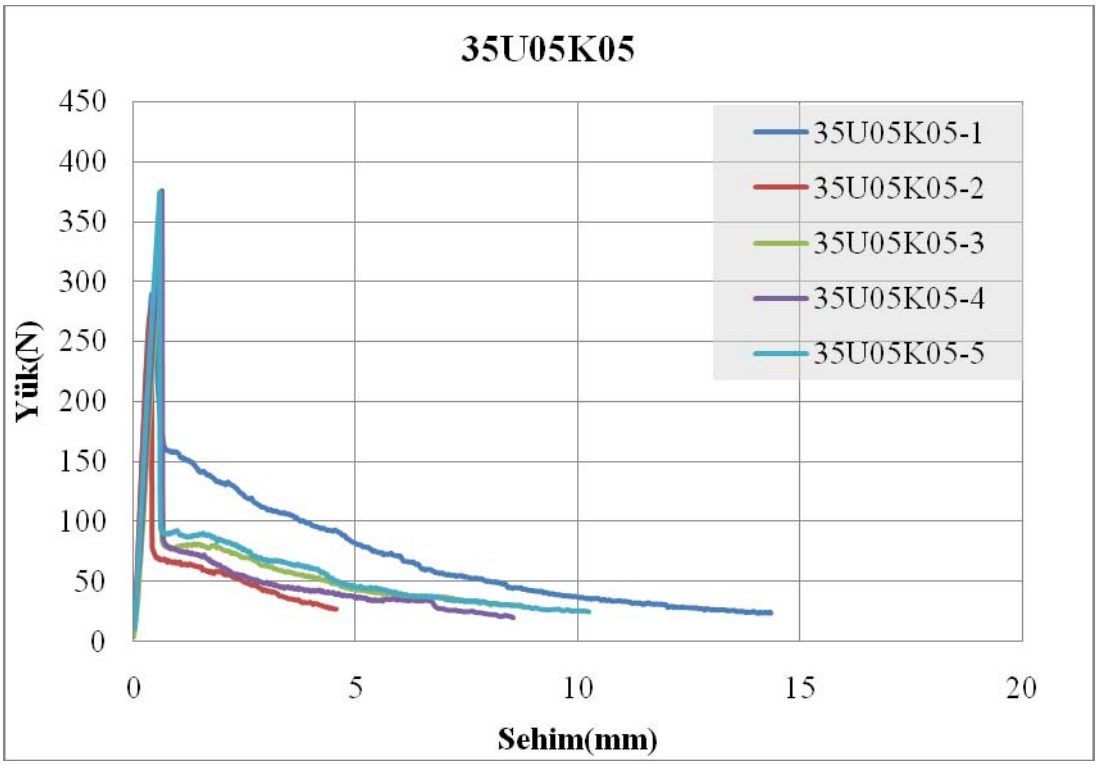
Şekil A.17 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %0,5 oranında uzun lif içeren 35U05K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



Şekil A.18 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %0,5 oranında kısa lif içeren 35U00K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.

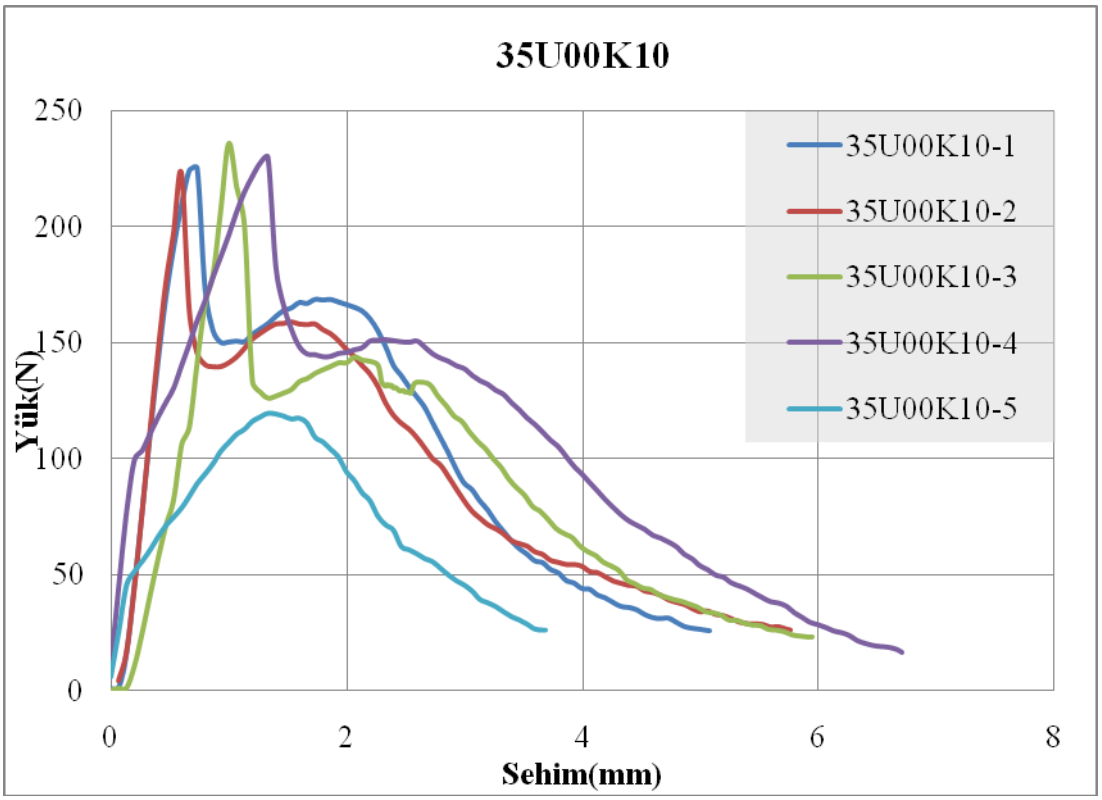


Şekil A.19 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %1,0 oranında uzun lif içeren 35U10K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.

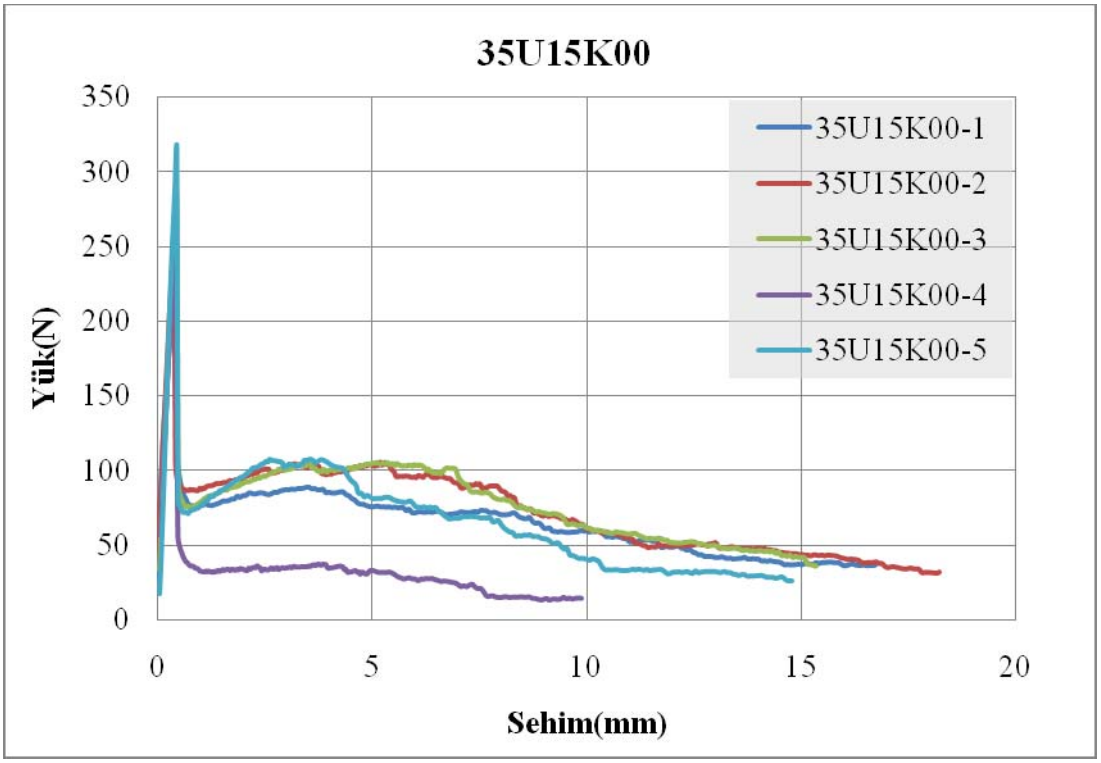


Şekil A.20 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %0,5 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren 35U05K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.

.

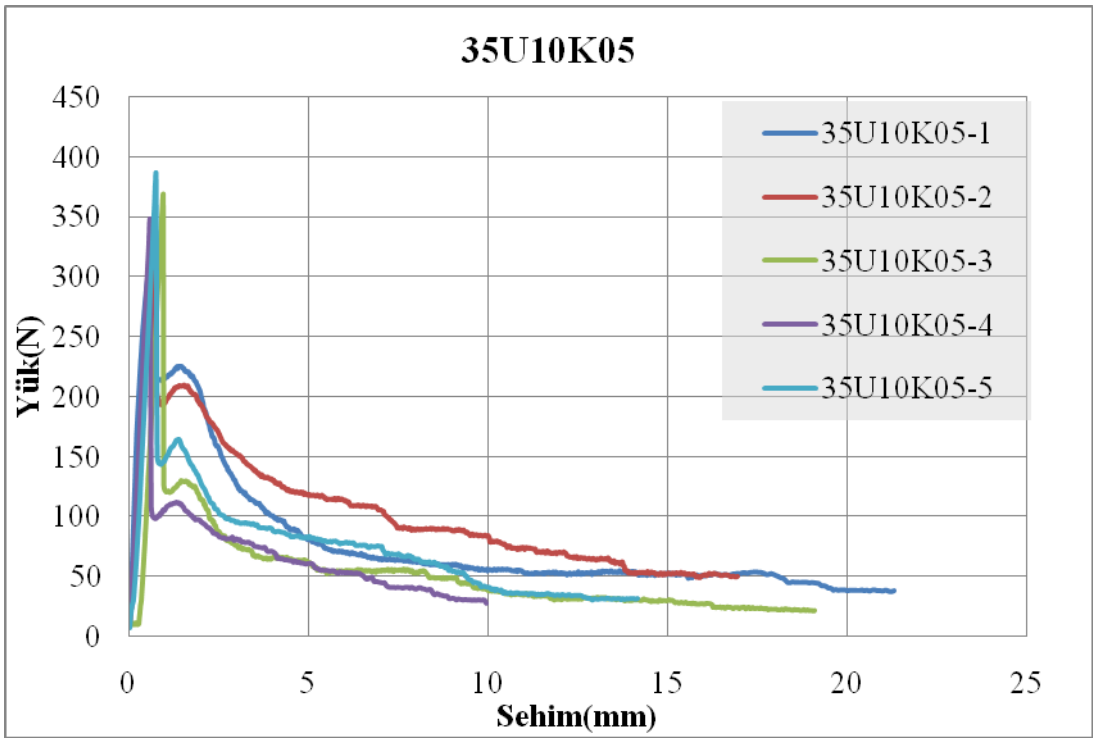


Şekil A.21 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %1,0 kısa lif içeren 35U00K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.

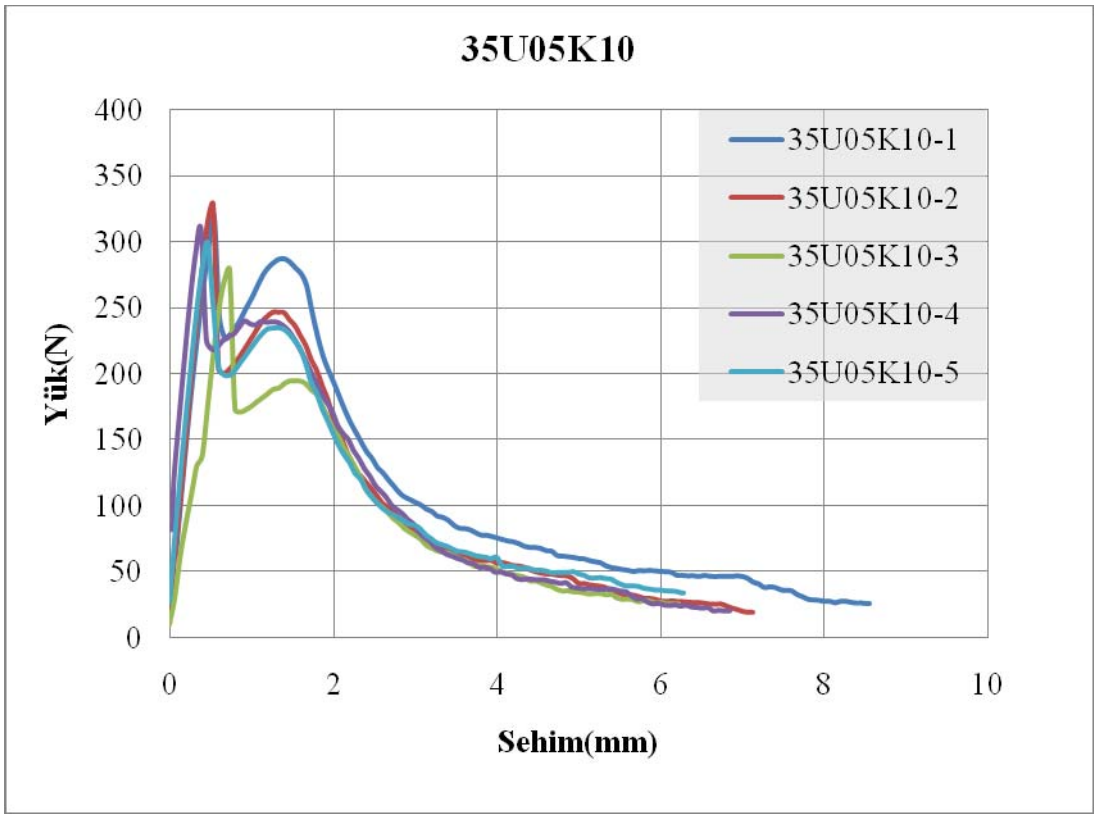


Şekil A.22 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %1,5 uzun lif içeren 35U15K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.

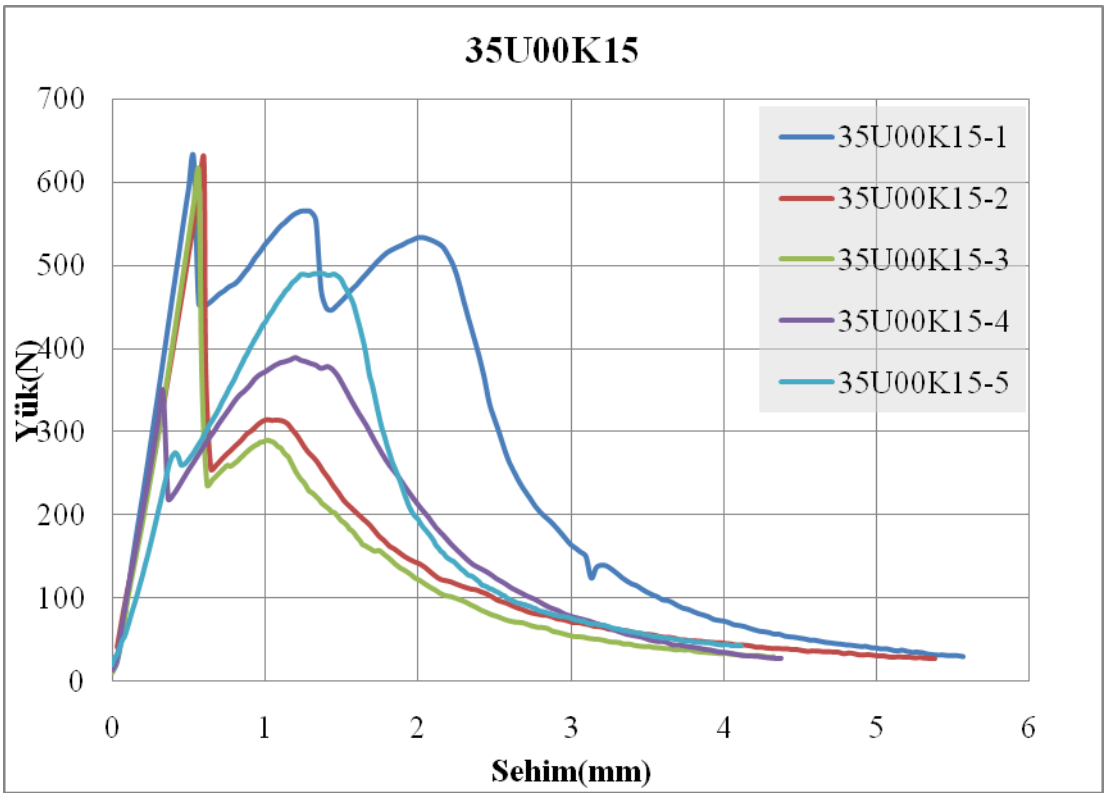
.



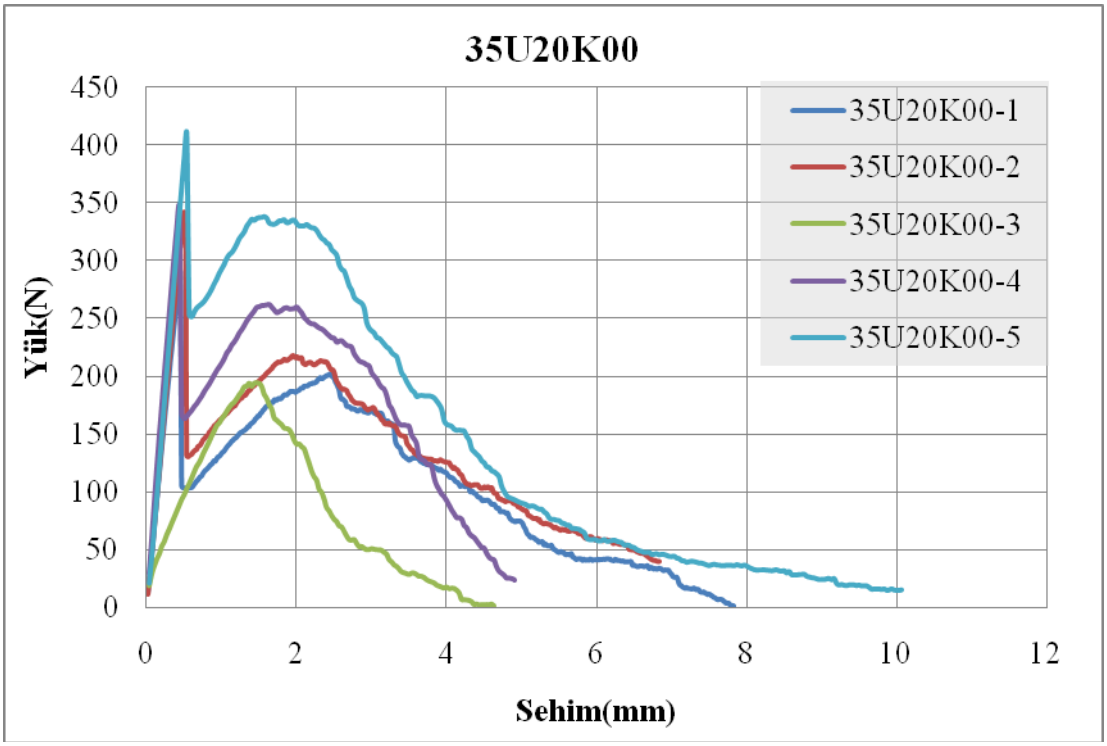
Şekil A.23 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %1,0 uzun lif ve %0,5 kısa lif içeren 35U10K05 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



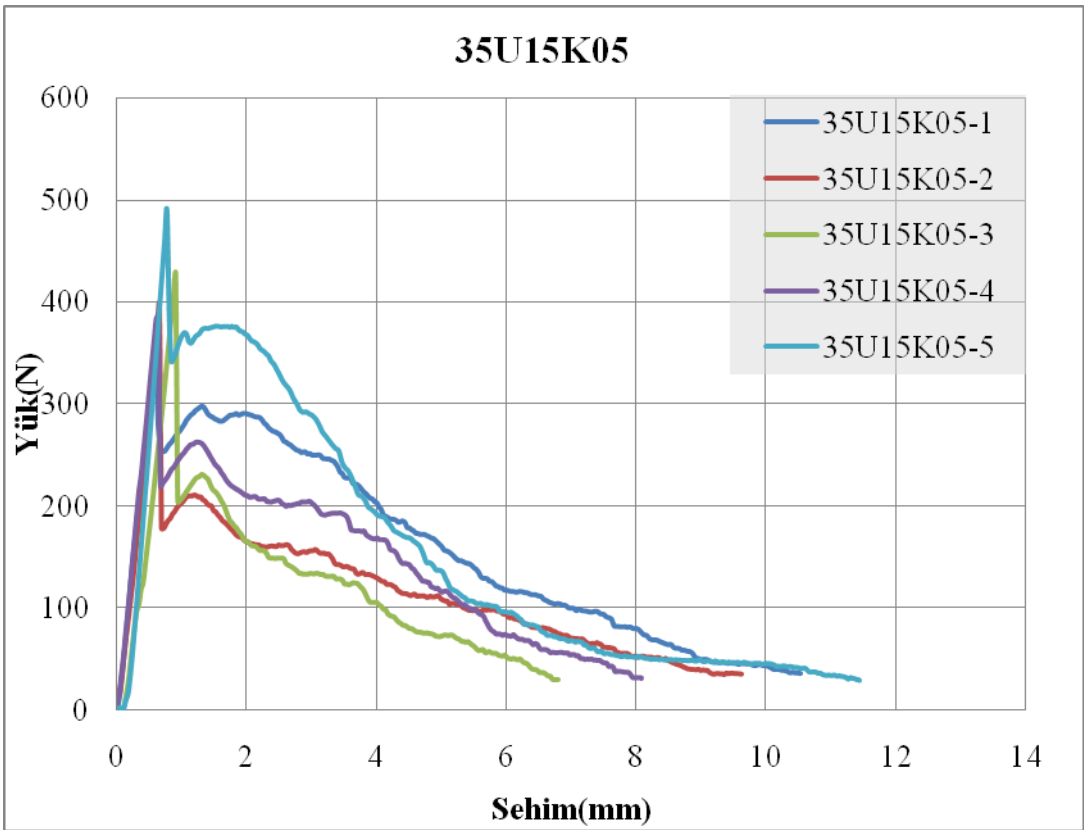
Şekil A.24 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %0,5 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren 35U05K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



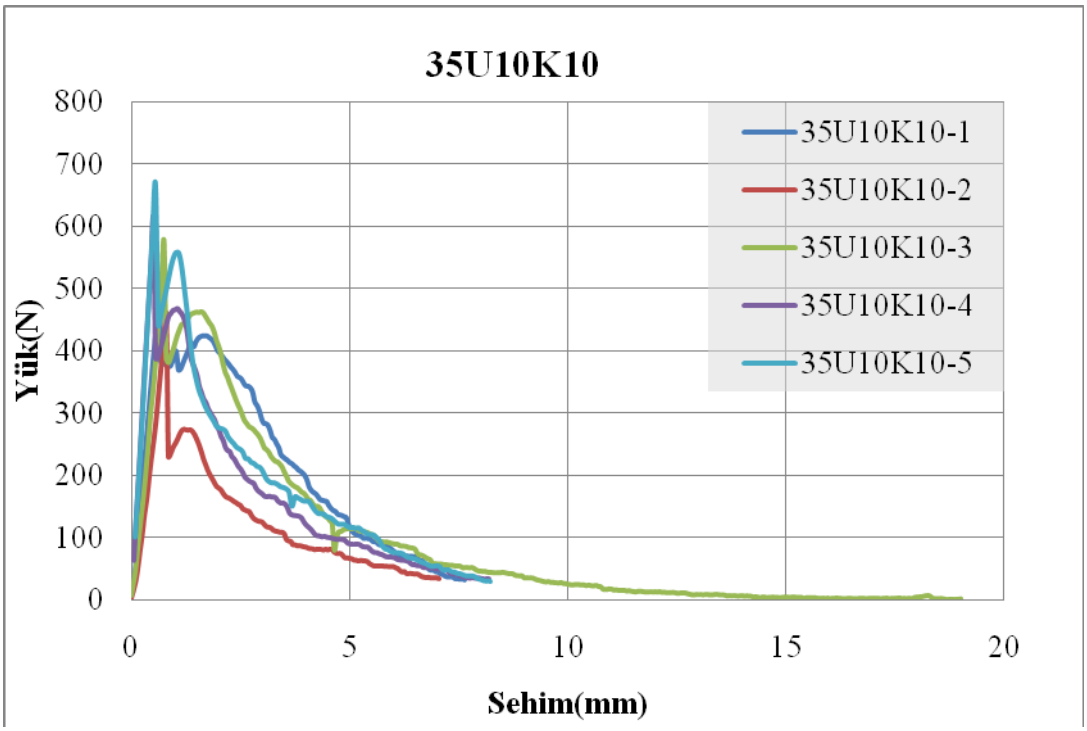
Şekil A.25 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %1,5 kısa lif içeren 35U00K15 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



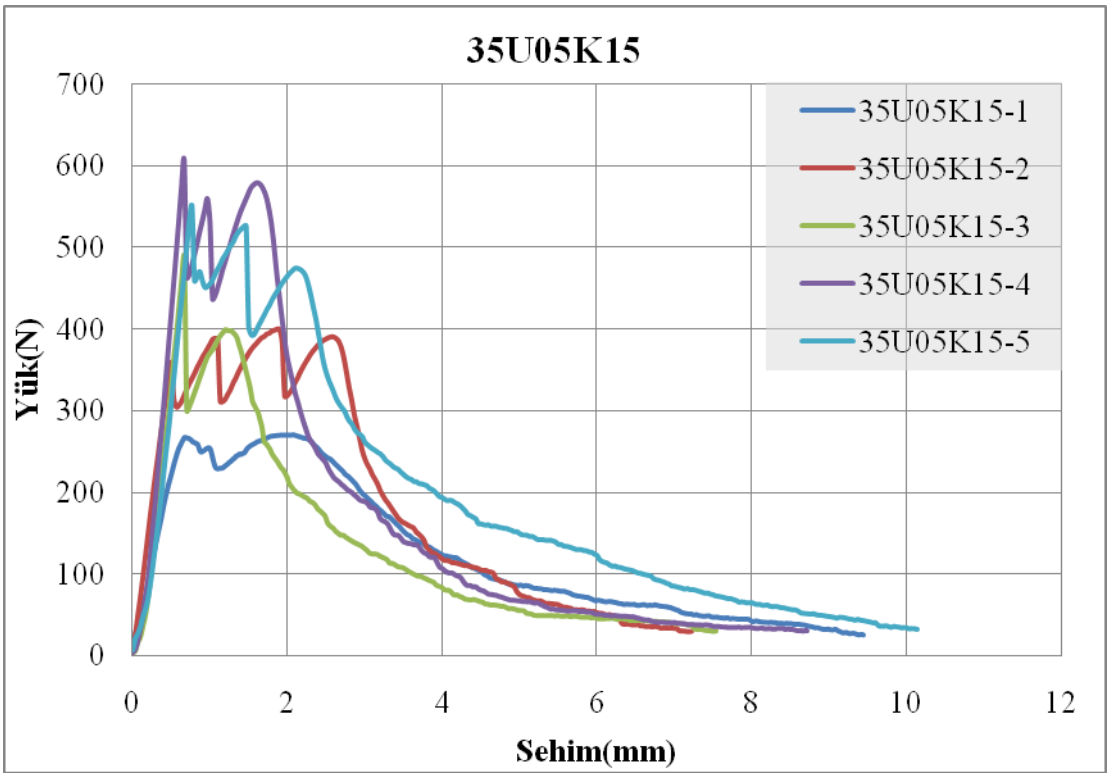
Şekil A.26 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %2,0 uzun lif içeren 35U20K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



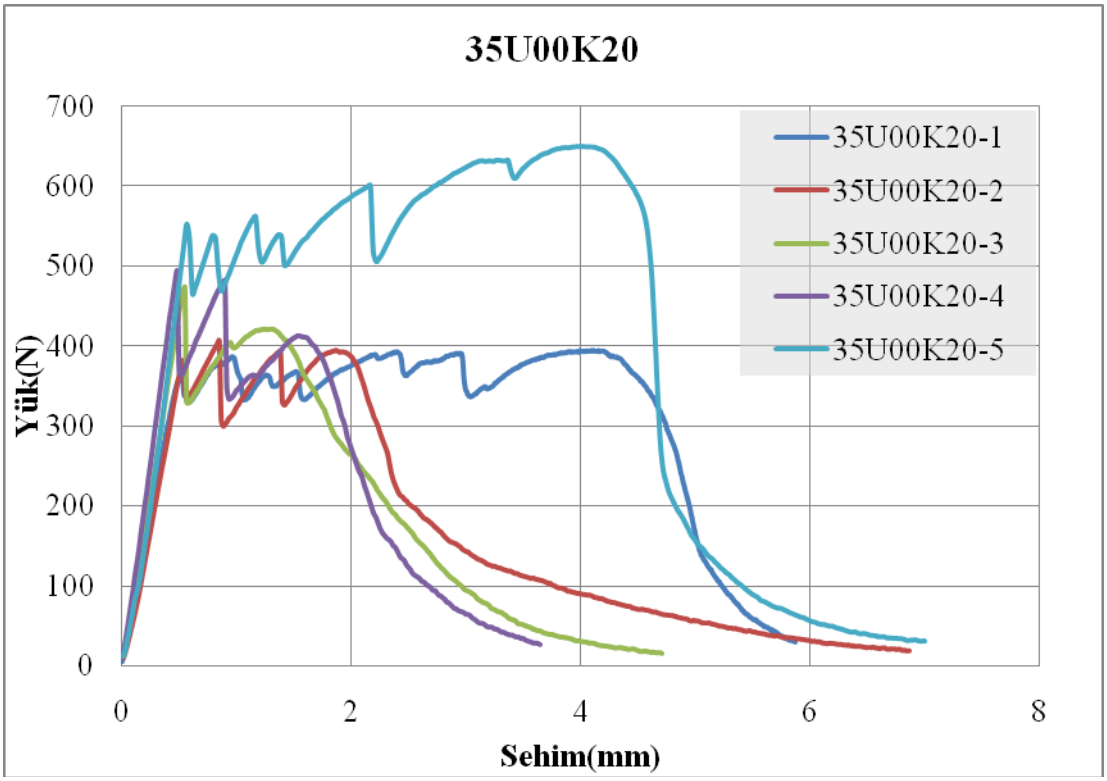
Şekil A.27 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %2,0 uzun lif içeren 35U20K00 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



Şekil A.28 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %1,0 uzun lif ve %1,0 kısa lif içeren 35U10K10 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



Şekil A.29 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, %0,5 uzun lif ve %1,5 kısa lif içeren 35U05K15 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.



Şekil A.30 : Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan, sadece %2,0 kısa lif içeren 35U00K20 üretim serilerinin yük-sehim eğrileri.

.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Kemal Kılıç BOĞAZKESEN

Doğum Yeri ve Tarihi: Sivas 19/11/1986

Adres : kemalkilicbogazkesen@gmail.com

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi -2009