

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NAYLON LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN
MEKANİK DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Didem YAŞAR

501091102

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR

TEMMUZ 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NAYLON LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN
MEKANİK DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Didem YAŞAR

(501091102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Temmuz 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Temmuz 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Yılmaz AKKAYA (İTÜ)

Doç. Dr. Nabi YÜZER (YTÜ)

TEMMUZ 2011

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım boyunca bana her konuda yardımcı olan çok değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR 'e

Çalışmalarında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Cengiz ŞENGÜL'e, Arş. Gör. Adile Aslı ÖZBORA'ya, Arş. Gör. Can Arda KİREMİTÇİ'ye ve Yrd. Doç. Dr. Muhsin YALÇIN'a, deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımları dolayısıyla İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına,

Bu çalışmaya verdikleri destek dolayısıyla Kordsa Global Teknoloji Merkezi'nden Erhan KOP'a,

Tüm eğitimim boyunca her zaman her konuda büyük desteklerini gördüğüm sevgili anneme, ablalarım ve varlığını her zaman yanımda hissettiğim babama, yüksek lisans çalışmam boyunca bana her konuda destek olan ve sevgisini esirgemeyen nişanlım Ahmet Burak OKTAY'a, çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan arkadaşlarım Bilgisayar Mühendisi Ercan ÇINAR ve İnşaat Yüksek Mühendisi Kemal Kılıç BOĞAZKESEN'e teşekkür ederim.

Temmuz 2011

Didem YAŞAR
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
2.1 Çimento Esaslı Kompozitler.....	3
2.1.1 Normal betonlar.....	3
2.1.2 Yüksek dayanımlı / yüksek performanslı betonlar.....	3
2.1.3 Lif donatılı çimento esaslı kompozitler.....	4
2.1.4 Karma lif donatılı çimento esaslı kompozitler.....	4
2.1.5 Sentetik lifli yüksek performanslı betonlar.....	6
2.2 Sentetik Lifler.....	7
2.2.1 Naylon liflerin özellikleri.....	8
2.2.2 Naylonun diğer özellikleri.....	9
2.2.3 Naylon lifli betonların genel özellikleri.....	9
2.3 Çelik Lifler.....	10
2.3.1 Çelik liflerin özellikleri.....	10
2.3.2 Çelik liflerin beton özelliklerine etkileri.....	11
2.4 Silis Dumanı.....	11
2.4.1 Silis dumanının beton özelliklerine etkisi.....	13
2.4.2 Silis dumanının betonun dayanımı ve dürabilitesi üzerindeki etkisi.....	14
2.5 Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkisi.....	14
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	17
3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	17
3.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	18
3.2.1 Çimento.....	18
3.2.2 Silis dumanı.....	18
3.2.3 Agregalar.....	18
3.2.4 Naylon lif.....	19
3.2.5 Kancalı uçlu çelik tel.....	20
3.2.6 Düz çelik tel.....	20
3.2.7 Süperakışkanlaştırıcı.....	20
3.3 Beton Üretimi.....	21
3.4 Beton Karışımları ve Numune Kodları.....	21
3.5 Numune Boyutları ve Şekilleri.....	22
3.6 Numunelerin Deneylere Hazırlanması.....	23
3.7 Taze Beton Deneyleri.....	23

3.7.1 Taze birim ağırlık deneyi.....	23
3.7.2 Çökme deneyi.....	23
3.8 Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	25
3.8.1 Silindir basınç deneyi.....	26
3.8.2 Üç noktalı eğilme deneyi ve kırılma enerjisinin belirlenmesi.....	26
3.8.3 Yarma-çekme deneyi.....	28
3.8.4 Sertleşmiş numuneler üzerinde elde edilen sonuçlar.....	29
3.9 Sentetik Lif ve Çelik Tel Donatılı Betonlar.....	29
3.9.1 Çimento.....	29
3.9.2 Agregalar.....	30
3.9.3 Sentetik lif.....	30
3.9.4 Kancalı uçlu çelik tel.....	30
3.9.5 Kimyasal katkı.....	30
3.9.6 Beton karışımları ve numune kodları.....	31
3.9.7 Numune boyutları ve şekilleri.....	31
3.9.8 Taze beton özellikleri.....	31
3.9.9 Sertleşmiş numuneler üzerinde elde edilen sonuçlar.....	32
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELEME VE DEĞERLENDİRMESİ.....	33
4.1 Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	33
4.2 Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi...	38
4.3 Yarma-Çekme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	48
4.4 Sentetik Lif ve Çelik Tel Donatılı Betonların Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	50
4.4.1 Silindir basınç deneyinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi.....	50
4.4.2 Üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi..	53
5. DENEY SONUÇLARININ MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU....	55
5.1 Optimizasyonun Amacı ve Kapsamı.....	55
5.2 Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYT).....	55
5.3 Çok Amaçlı Optimizasyon.....	58
5.3.1 Arzu edirlilik (desirability) yöntemi.....	58
5.4 Regresyon Analizi ve Sonuçları.....	60
5.5 Naylon Lifli Betonların Optimum Karışım Tasarımı ve Sonuçları.....	64
6. GENEL SONUÇLAR.....	69
KAYNAKLAR.....	71
EKLER.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	94

KISALTMALAR

YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
YPB	: Yüksek Performanslı Beton
FRC	: Fiber Reinforced Composites (Lif Donatılı Kompozitler)
TS	: Türk Standardı
SD	: Silis Dumanı
LVDT	: Lineer Voltage Direct Transducer
RILEM	: Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Rechercheurs sur les Matériaux et les Constructions (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures)
ACI	: American Concrete Institute
TYY	: Tepki Yüzeyi Yöntemi
RB	: Referans Beton
SLDB	: Sentetik Lif Donatılı Beton
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	: Sentetik liflerin özellikleri.....	8
Çizelge 2.2	: Tipik silis dumanı kimyasal bileşimi.....	12
Çizelge 3.1	: Üretimlerde kullanılan çimentonun özellikleri.....	18
Çizelge 3.2	: Üretimlerde kullanılan silis dumanının özellikleri.....	18
Çizelge 3.3	: Üretimde kullanılan agreganın özellikleri.....	19
Çizelge 3.4	: Naylon liflerin özellikleri.	19
Çizelge 3.5	: Naylon liflerin 1m ³ betondaki miktarları	20
Çizelge 3.6	: Kancalı uçlu çelik tellerin özellikleri.	20
Çizelge 3.7	: Kısa tellerin teknik özellikleri	20
Çizelge 3.8	: Karışımların kodları, karışımlardaki naylon ve çelik lif oranları.....	22
Çizelge 3.9	: Su/bağlayıcı oranı 0.70 olan, naylon lifli serilerin gerçek beton bileşimleri	24
Çizelge 3.10	: Su/bağlayıcı oranı 0.45 olan, naylon lifli serilerin gerçek beton bileşimleri.....	24
Çizelge 3.11	: Su/bağlayıcı oranı 0.25 olan, naylon lifli serilerin gerçek beton bileşimleri	25
Çizelge 3.12	: Karma lifli olarak üretilen naylon ve çelik lifli serilerin gerçek beton bileşimleri	25
Çizelge 3.13	: Mekanik özellikler.....	29
Çizelge 3.14	: Üretimde kullanılan agregaların özellikleri.....	30
Çizelge 3.15	: Sentetik liflerin özellikleri.....	30
Çizelge 3.16	: Karışımların kodları, karışımlardaki sentetik ve çelik lif oranları	31
Çizelge 3.17	: Gerçek beton bileşimleri	31
Çizelge 3.18	: Mekanik özellikler.....	32
Çizelge 5.1	: Naylon lifli karışımlara ait değişkenler ve deney noktaları	57
Çizelge 5.2	: Regresyon modelleri.....	61
Çizelge 5.3	: Korelasyon katsayıları.	61
Çizelge 5.4	: Faktörler ve tepkilere ait alt ve üst sınır değerleri.....	65
Çizelge 5.5	: Naylon lifli karışımlara ait optimum karışım çözümleri.	66
Çizelge A.1	: Silindir numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerleri	75
Çizelge A.2	: Silindir numunelerden elde edilen elastisite modülü değerleri	77
Çizelge B.1	: Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjisi değerleri.....	78
Çizelge B.2	: Prizma numunelerden elde edilen eğilme dayanımı değerleri	80
Çizelge C.1	: Disk numunelerden elde edilen yarma-çekme dayanımı değerleri	90
Çizelge D.1	: Silindir basınç dayanımı değerleri.....	92
Çizelge D.2	: Elastisite modülü değerleri.	92
Çizelge D.3	: Net eğilme dayanımı değerleri	92
Çizelge D.4	: Özgül kırılma enerjisi değerleri.....	92

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutu etkisi.	6
Şekil 2.2	: Yüksek performanlı sentetik lif katkılı betonda üretim yönteminin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi	7
Şekil 2.3	: Yüksek performanslı sentetik lif katkılı ekstrüzyon yöntemiyle üretilen bir eleman	7
Şekil 2.4	: Çelik lif tipleri ve kesitleri	10
Şekil 2.5	: Silis dumanı tane boyut dağılımı.....	12
Şekil 2.6	: Çimento hamurunda silis dumanının doldurma etkisi.....	13
Şekil 3.1	: Deneysel programın şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.2	: Üretimde kullanılan agregaların granülometri eğrisi	19
Şekil 3.3	: Numunelerin şekilleri ve boyutları.....	22
Şekil 3.4	: Üç noktalı eğilme deney düzeneği.	27
Şekil 3.5	: Yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi.....	27
Şekil 4.1	: Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi.	33
Şekil 4.2	: Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi.	34
Şekil 4.3	: Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi.	34
Şekil 4.4	: Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin silindir basınç deney değerleri	35
Şekil 4.5	: Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin silindir basınç deney değerleri	35
Şekil 4.6	: Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin silindir basınç deney değerleri	36
Şekil 4.7	: Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin elastisite modülü değerleri	37
Şekil 4.8	: Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin elastisite modülü değerleri.	37
Şekil 4.9	: Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin elastisite modülü değerleri	38
Şekil 4.10	: Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin yük-sehim ilişkisi.	39
Şekil 4.11	: Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin yük-sehim ilişkisi.	39
Şekil 4.12	: Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin yük-sehim ilişkisi.	40
Şekil 4.13	: Naylon lif içeriği 0,6 kg/m ³ numunelerin yük-sehim ilişkisi	40
Şekil 4.14	: Naylon lif içeriği 1,5 kg/m ³ numunelerin yük-sehim ilişkisi	41
Şekil 4.15	: Naylon lif içeriği 2,4 kg/m ³ numunelerin yük-sehim ilişkisi	41
Şekil 4.16	: Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan hibrit numunelerin yük-sehim ilişkisi.....	42
Şekil 4.17	: Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan karma lifli numunelerin yük-sehim ilişkisi.....	43

Şekil 4.18 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan karma lifli numunelerin yük-sehim ilişkisi	43
Şekil 4.19 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri	44
Şekil 4.20 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri	45
Şekil 4.21 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri	45
Şekil 4.22 : Naylon ve çelik lifin birlikte kullanılması durumunda kırılma enerjisi değerleri.....	46
Şekil 4.23 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin eğilme dayanımı değerleri	47
Şekil 4.24 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin eğilme dayanımı değerleri	47
Şekil 4.25 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin eğilme dayanımı değerleri	48
Şekil 4.26 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin yarma-çekme dayanımı değerleri	49
Şekil 4.27 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin yarma-çekme dayanımı değerleri	49
Şekil 4.28 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin yarma-çekme dayanımı değerleri	50
Şekil 4.29 : Gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi.....	51
Şekil 4.30 : Silindir basınç deneyi sonuçları.....	52
Şekil 4.31 : Elastisite modülü değerleri	52
Şekil 4.32 : Yük-sehim ilişkisi.....	53
Şekil 4.33 : Kırılma enerjisi sonuçları.	54
Şekil 4.34 : Eğilme dayanımı sonuçları	54
Şekil 5.1 : Deney veri noktaları	54
Şekil 5.2 : Naylon lifli betonların silindir basınç dayanımlarına ait tepki yüzeyleri.....	62
Şekil 5.3 : Naylon lifli betonların yarma-çekme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri.....	62
Şekil 5.4 : Naylon lifli betonların elastisite modüllerine ait tepki yüzeyleri.	63
Şekil 5.5 : Naylon lifli betonların özgül kırılma enerjilerine ait tepki yüzeyleri.....	63
Şekil 5.6 : Naylon lifli betonların net eğilme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri.....	64
Şekil 5.7 : Naylon lifli karışımlar için çok amaçlı optimizasyona ait tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü.	67
Şekil B.1 : Su/çimento oranı 0,70 olan yalın numunelerine ait yük sehim grafikleri	83
Şekil B.2 : Su/çimento oranı 0,70 olan 0,6 kg/m ³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	83
Şekil B.3 : Su/çimento oranı 0,70 olan 1,5 kg/m ³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	84
Şekil B.4 : Su/çimento oranı 0,70 olan 2,4 kg/m ³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	84
Şekil B.5 : Su/çimento oranı 0,70 olan karma lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	85

Şekil B.6 : Su/çimento oranı 0,45 olan yalın numunelerine ait yük sehim grafikleri.....	85
Şekil B.7 : Su/çimento oranı 0,45 olan 0,6 kg/m ³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	86
Şekil B.8 : Su/çimento oranı 0,45 olan 1,5 kg/m ³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	86
Şekil B.9 : Su/çimento oranı 0,45 olan 2,4 kg/m ³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	87
Şekil B.10 : Su/çimento oranı 0,45 olan karma lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	87
Şekil B.11 : Su/çimento oranı 0,25 olan yalın numunelerine ait yük sehim grafikleri.....	88
Şekil B.12 : Su/çimento oranı 0,25 olan 0,6 kg/m ³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	88
Şekil B.13 : Su/çimento oranı 0,25 olan 1,5 kg/m ³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	88
Şekil B.14 : Su/çimento oranı 0,25 olan 2,4 kg/m ³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	88
Şekil B.15 : Su/çimento oranı 0,25 olan karma lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri	89

SEMBOL LİSTESİ

I/d	:	Narinlik
G_f	:	Kırılma enerjisi
P_{max}	:	Maksimum yük
W_0	:	Yük-sehim eğrisi altında kalan alan
m	:	Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı
g	:	Yerçekimi ivmesi
δ_0	:	Kirişin göçme sırasındaki deformasyonu
A_{lig}	:	Etkin kesit alanı
F_{fnet}	:	Net eğilme dayanımı
L	:	Mesnetler arası uzaklık
B	:	Numune kesitinin genişliği
D	:	Numune kesitinin yüksekliği
ε	:	Şekil değiştirme
C18, ..., C100	:	Beton basınç dayanım sınıfları
E	:	Elastisite modülü
σ	:	Gerilme
V_f	:	Lif hacmi
S/ζ	:	Su/çimento oranı
f_s	:	Silindir basınç dayanımı
f_y	:	Yarma-çekme dayanımı
f_n	:	Net eğilme dayanımı
e	:	İstatistiksel hata
Y	:	Tepki
f	:	Tepkinin fonksiyonu
X_k	:	Faktörler ($X_1, X_2, \dots, X_k$)
k	:	Faktör sayısı
n	:	Tepki sayısı
d_i	:	Her bir tepkinin arzu edilirlilik değeri
D	:	Çok amaçlı arzu edilirlilik değeri
R	:	Korelasyon katsayısı
r_i	:	Her bir tepki için önem seviyesi
Y_i	:	Tepki yüzeyi yöntemi ile belirlenen değer
$\min f_i$	:	Deneysel olarak elde edilen en küçük değer
$\max f_i$	:	Deneysel olarak elde edilen en büyük değer
T_i	:	Optimizasyonda aranan hedef değer
W_{ti}	:	Etki ağırlık düzeyi

NAYLON LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞI

ÖZET

Çimento esaslı malzemelerin çekme dayanımları ve toklukları düşüktür. Görevi, gerilme uygulanan çimento matrisindeki çatlak gelişimini engellemek veya geciktirmek, çatlağın hızlı ve kontrolsüz ilerleyişini yavaş ve kontrollü bir hale getirmektir olan lifler kullanıldığında çimento esaslı malzemelerin bu özellikleri iyileştirilebilir.

Sentetik bir lif türü olan naylon lif donatılar beton içinde kullanıldığında, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisini yalın betona kıyasla artırdığı, basınç ve yarma dayanımında önemli bir fayda sağlamadığı bilinmektedir.

Bu tez çalışması, naylon liflerin betona kazandırdığı özelliklerin belirlenmesi, bazı mekanik özellikler ve performans parametrelerine göre bilgisayar destekli optimizasyon teknikleri kullanılarak en düşük maliyet ve en yüksek performans koşullarında optimum karışım çözümlerinin belirlenmesini içermektedir.

Bu amaç doğrultusunda, su/bağlayıcı oranı 0,25, 0,45 ve 0,70 olan, lif içermeyen 3 farklı referans beton üretilmiştir. Daha sonra bu betonlara 1m³ bileşim için sırasıyla 0,6 kg, 1,5 kg ve 2,4 kg naylon lif, 6 mm, 19 mm ve 32 mm olarak 3 farklı uzunlukta eklenerek 9 adet lifli beton karışımı üretilmiştir. Son olarak naylon liflerin çelik liflerle birlikte kullanıldığında sahip olacağı performansı incelemek amacı ile 1m³ bileşim için 1,5 kg naylon lif, 20 kg kanca uçlu çelik tel ve 18 kg kısa kesilmiş düz çelik tel birlikte kullanılarak 3 adet karma lifli beton üretilerek toplamda 15 adet farklı karışıma sahip beton bileşimleri elde edilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan karışımlarda 1m³ bileşim için 490 kg çimento ve 60 kg silis dumanı kullanılırken, su/bağlayıcı oranı 0,45 olan karışımlarda bağlayıcı olarak yalnızca çimento kullanılmış ve dozaj olarak 400 kg/m³ değerinde sabit tutulmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan karışımlarda da bağlayıcı olarak yalnızca çimento kullanılmış ve çimento içeriği 275 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Bütün karışımlarda polikarboksilat esaslı yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar farklı oranlarda kullanılarak çökme değerinin S3 kıvamında olması sağlanmıştır.

Kırılma enerjisinin ve eğilme dayanımının belirlenmesi için uzunluğu 500 mm, en kesiti 100x100 mm olan kiriş numuneler üretilmiştir ve RILEM TC 50-FMC Teknik Komitesinin önerisine göre çentikli kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. Basınç dayanımı ve elastisite modülünü belirlemek için 150 mm çap ve 300 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler üretilmiş, kapalı çevrim şekil değiştirme kontrollü 500 ton kapasiteli basınç aletinde basınç deneyleri yapılmıştır. Betonun çekme dayanımının belirlenmesi için de çapı 150 mm, yüksekliği 60 mm olan disk numuneler kullanılmış ve yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Bu şekilde betonun, kırılma enerjisi, net eğilme dayanımı, basınç dayanımı, elastisite modülü ve çekme dayanımı gibi, kırılma parametreleri incelenmiştir.

Yalın betonla karşılaştırıldığında, naylon lif donatılı kompozitlerin kırılma enerjileri ve süneklikleri artmıştır. Net eğilme dayanımları, basınç ve yarma-çekme dayanımlarında önemli bir artış gözlenmemiştir. Çelik ve naylon lif kullanılarak üretilen karma lifli serilerin net eğilme dayanımları, kırılma enerjileri ve süneklikleri yalın betonlara kıyasla önemli derecede artmıştır. Böylece lifli betonlar yalın betonlara göre arttırılmış tokluk ve sünekliğe sahip bir davranış sergilemiştir.

Elde edilen deney sonuçlarına bağlı olarak optimizasyon, Tepki Yüzeyi Yöntemi Faktöriyel Tasarım Metodu ile Design-Expert 6.0.7 programı kullanılarak yapılmıştır. Su/bağlayıcı oranı ve lif hacim oranı gibi bağımsız değişkenler ‘faktör’ ve silindir basınç dayanımı, elastisite modülü, net eğilme dayanımı, özgül kırılma enerjisi ve yarma çekme dayanımı gibi bağımlı değişkenler ‘tepki’ olarak tanımlanarak çok amaçlı optimizasyon tekniklerinden olan Arzu Edilirlik Metodu ile optimum çözümler belirlendi. Mekanik (silindir basınç, yarma çekme ve net eğilme dayanımı) ve performans (özgül kırılma enerjisi) özelliklerini S/Ç oranı ve lif hacim oranına bağlı olarak tahmin edebilen regresyon modelleri verildi. Naylon liflerin eklenmesi ile artan karışım maliyeti en yüksek performans koşullarında faktörler için minimum ve tepkiler için maksimum amaç fonksiyonları seçilerek naylon lifli betonlar için optimum ekonomik karışım çözümleri elde edildi. Optimum çözüm, $S/Ç=0,32$, $V_f=0,78 \text{ kg/m}^3$ ve optimum maliyet 1,28br olarak elde edilmiştir. Bu optimum çözüme karşılık gelen silindir basınç dayanımı, elastisite modülü, yarma çekme dayanımı, özgül kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı değerleri sırasıyla; 71,82 MPa, 37,53 GPa, 5,82 MPa, 162,36 Joule/m² ve 6,37 MPa’dır.

MECHANICAL BEHAVIOUR OF NYLON FIBER REINFORCED CEMENT BASED COMPOSITES

SUMMARY

The tensile strength and toughness of cement based composites are considerably low. These characteristics of cement based composites may be improved by using fibers which are able to prevent or retard the development of crack in the cement matrix, and cause the unrestrained and fast progression of the crack to be restrained and slow.

Use of nylon fiber reinforcement in concrete increases bending strength and fracture energy compared to plain concrete, however compressive and tensile strengths are not affected in considerable manner.

This study focused on the properties of concrete achieved by nylon fibers. The study also includes the determination of optimum mixtures based on minimum cost and maximum performance by using relevant softwares that considers the performance parameters and some mechanical properties.

In this study, three different reference concretes were prepared by using water/cement ratios are 0.25, 0.45 and 0.70 and no fibers were used in these mixtures. In the next step, for 1m³ of concrete 0.6 kg, 1.5 kg and 2.4 kg nylon fibers, with three different lengths of 6 mm, 19 mm and 32 mm, were added to these concretes, as a result nine concretes were obtained. Finally, for the purpose of examining the performance of nylon fibers when used with steel fibers, 1.5 kg of nylon fibers, 20 kg of hooked end steel fiber and 18 kg of short cut steel fibers (for 1m³ of concrete mixtures) were used together to create three hybrid concretes, thus a total of 15 different mixtures were obtained. For 1m³ of concrete mixtures with 0.25 water/cement ratio 490 kg cement and 60 kg silica fume were used, and in mixtures with 0.45 water/cement ratio, only cement was used at a constant 400 kg value. In mixtures with 0.70 water/cement ratio only cement was used, but the cement content was 275 kg. In all mixtures, a new generation polycarboxylic ether hyperplasticiser was used with different ratios to provide S3 consistency slump class.

For the determination of the fracture energy and net bending strength, three-point bending test was performed on notched beams with 500 mm length and 100x100mm cross section according to the recommendation of the RILEM 50-FMC Technical Committee. Cylindrical samples with 150 mm diameter and 300 mm height were prepared and compression tests of these samples were made by using a closed loop displacement controlled testing equipment with 500 ton capacity to determine the compressive strength and modulus of elasticity. For the determination of tensile strength of the concrete, disc samples with 150 mm diameter and 60 mm height were used and splitting tensile tests were conducted. Thus, the fracture and mechanical parameters like fracture energy, net bending strength, compressive strength, modulus of elasticity and tensile strength of the concrete were obtained from the experiments.

When plain concrete is compared to nylon fiber reinforced composites, it can be concluded that the fracture energy and ductility of fiber reinforced composites are enhanced. However, net bending strength, compressive and splitting tensile strength are not affected in a considerable manner. By using steel and nylon fibers together net bending strength, fracture energy and ductility are also increased significantly in hybrid mixtures. Thus, fiber reinforced composites presented a behavior of enhanced toughness and ductility when compared to plain concrete.

Optimization was performed according to Response Surface Method Factorial Design Technique by using a Design-Expert 6.0.7. software. Water/cement ratio and volumetric fraction of fibers were independent variables and they were used as 'factors'. Compression strength, modulus of elasticity, net bending strength, specific rupture energy and splitting tensile strength were dependent variables and they were as 'responses'. The optimum solutions were investigated by using multi-purpose optimization technique. The regression models predicting the mechanics and performance properties according to the water/cement ratio and fiber volumetric ratio were developed. As the content of the nylon fibers are increased in the mixtures, their costs are also increased. Overall desirability functions were based on the conditions of minimum cost and maximum performance. For responses, maximum purpose functions were selected and optimum economical mixture designs were determined for nylon fiber reinforced concretes. Optimal solution was obtained as $W/C=0.32$, $V_f=0.78 \text{ kg/m}^3$ and the optimal cost was 1.28 unit price.

1. GİRİŞ

Beton, kullanımı en yaygın olan yapı malzemesidir. Geleneksel anlamda beton; agrega, çimento ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla üretilir. Betona değişik özellikler kazandırmak için çeşitli katkı maddeleri de eklenir.

Betonun düşük maliyet, kolay bulunabilirlik ve yüksek basınç dayanımı gibi üstünlüklere sahip olmasına karşın, oldukça düşük çekme dayanımına ve gevrek bir yapıya sahip olması gibi bazı önemli sakıncaları da vardır.

Özellikle son kırk yılda beton konusunda yapılan yoğun araştırmalar sonucunda, yüksek basınç dayanımının yanında, çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve sünekliğini artırmak için bünyesine lif katılması fikri geliştirilmiştir. Betona metalik lifler, cam elyafı gibi sentetik veya şeker kamışı posası gibi doğal kaynaklı lifler de katılmaktadır. Bu farklı lif türlerinin birbirine kıyasla bazı üstünlükleri ya da sakıncaları olmakla birlikte, ilgili yayınlar incelendiğinde, liflerin özellikle eğilme dayanımı, çarpma dayanımı, enerji yutma kapasitesi ve süneklik gibi mekanik özelliklerine kayda değer 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.

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan naylon lifli betonlar, Amerikan Ordu Mühendisleri tarafından 1960'lı yıllarda, patlama etkilerine dayanıklı askeri yapıların inşasında kullanılması amacıyla geliştirilmiş bir lif donatılı beton türüdür [1]. Naylon lifler, betonda dayanımı, sünekliği, dürabiliteyi ve tokluğu artırmak için takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır [2].

Bu tezde, dört gruptan oluşan bir deney programı hazırlanmış ve naylon lifli betonların davranışları incelenmiştir. Her bir grubun karışım özellikler aşağıda verilmektedir.

1.Grup: Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan bu grupta, bağlayıcı olarak 1m^3 bileşim için 490 kg çimento ve 60 kg silis dumanı kullanılmıştır. İlk olarak referans olması amacıyla

lifsiz beton üretilmiştir. Daha sonra 1m³ bileşim için, sırasıyla 0,6 kg, 1,5 kg ve 2,4 kg naylon lif içeren 3 adet lifli karışım üretilmiştir. Çalışmada kullanılan naylon lifler 6 mm, 19 mm ve 32 mm olarak 3 farklı uzunlukta ve her karışımda aynı oranda karışıma eklenmiştir.

2.Grup: Bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan, su/çimento oranı 0,45 olan bu grupta 1m³ bileşim için 400 kg çimento kullanılmıştır. İlk gruptakine benzer biçimde bir referans ve üç adet naylon lifli karışım üretilmiştir.

3.Grup: Su/çimento oranı 0,70 olan ve 1m³'ünde 275 kg çimento bulunan bu seride de aynı üretimler yapılmıştır. Bütün karışımlarda kullanılan agregaların granülometrisi aynıdır.

4.Grup: Karma lifli olan bu grupta, naylon liflerin çelik liflerle birlikte kullanıldığında sahip olacağı performansı incelemek amacı ile 1m³ bileşim için 1,5 kg naylon lif (uzunluk 6 mm), 20 kg kancalı uçlu çelik tel ve 18 kg kısa kesilmiş çelik tel birlikte kullanılarak her bir su/çimento oranı için bir üretim yapılmış ve toplam 15 adet farklı beton bileşimleri elde edilmiştir.

Yalın betonla karşılaştırıldığında, naylon lif donatılı kompozitlerin kırılma enerjileri ve süneklikleri artmıştır. Net eğilme, basınç ve yarma-çekme dayanımlarında önemli bir artış gözlenmemiştir. Çelik ve naylon kullanılarak üretilen karma lifli serilerin net eğilme dayanımları, kırılma enerjileri ve süneklikleri yalın betonlara kıyasla önemli derecede artmıştır. Böylece lifli betonlar yalın betonlara göre arttırılmış tokluk ve sünekliğe sahip bir davranış sergilemiştir.

Bu çalışmada, naylon lifli betonların mekanik ve performans (süneklik) özelliklerini belirlemek için basınç, elastisite modülü, yarma-çekme ve kiriş eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre karışımların mekanik ve performans özelliklerinin S/Ç oranı ve lif hacim oranı ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri verilmiştir.

Naylon lifli betonların optimizasyonu, Design-Expert 6.0.7 programı kullanılarak en yüksek mekanik ve performans özelliklerini sağlayan en düşük lif hacim oranını amaçlayan Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY) Faktöriyel Tasarım Tekniği'ne göre yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda mekanik performans özeliği en yüksek ve daha ekonomik olan naylon lifli beton tasarımları belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Çimento Esaslı Kompozitler

2.1.1 Normal betonlar

Normal betonlar, basınç dayanımları 20MPa - 60MPa, kırılma enerjileri 100 J/m²- 120 J/m² civarında olan, agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesi kullanılarak üretilen taşıyıcı yapı malzemeleridir [3]. Normal betonlar, günümüzde yaygın olarak kullanılan genel amaçlı betonlardır. En önemli özellikleri, bileşenlerine kolaylıkla ulaşılabilmesi, özel nitelikler gerektirmeyen ve kolay elde edilebilen işgücü ile ekonomik ve standartlara göre seri üretim yapılabilmesidir. Bu sebeple normal betonlar inşaat sektöründe bina, köprü, yol, tünel, baraj ve prefabrik yapılar gibi birçok alanda sıklıkla kullanılırlar [4].

2.1.2 Yüksek dayanımlı / yüksek performanslı betonlar

Yüksek Performanslı Beton (YPB) dürabilite koşulunu da sağlayan yüksek dayanımlı betondur. Bununla birlikte değişik tanımlar da yapılmaktadır. ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programına göre Yüksek Performanslı Beton, dayanımı, durabilitesi ve su/bağlayıcı oranı bakımından aşağıdaki gibi tanımlanabilir [5]:

- i. Aşağıdaki dayanım özelliklerinden birine sahip olmalıdır:
 - 4 saatlik basınç dayanımı $\geq 17,5$ MPa (çok erken dayanımlı beton)
 - 24 saatlik basınç dayanımı ≥ 35 MPa (çok yüksek erken dayanımlı beton)
 - 28 günlük basınç dayanımı ≥ 70 MPa (çok yüksek dayanımlı beton)
- ii. Durabilite çarpanı $\geq \%80$ (donma-çözülmenin 300 tekrarından sonra)
- iii. Su/bağlayıcı oranı $\leq 0,35$ olmalıdır [6].

Yüksek dayanımlı betonlarda dayanım, çimento hamurunun boşluk yapısına, agreganın özelliklerine, agrega-çimento hamuru arayüzeyi geçiş bölgesine bağlıdır. Çimento hamuru ve ara yüzey geçiş bölgesinin özellikleri, su/çimento oranı düşürülerek ve maksimum agrega çapı küçültülerek iyileştirilebilir [7,8].

Yüksek dayanımlı betonlarda, normal dayanımlı betonlara göre gerilme-şekil

değiştirme diyagramının doğrusal bölümü daha fazladır. Bu durum, agrega-çimento hamuru ara yüzeyinin kuvvetli olmasının, dolayısıyla mikro çatlakların fazla olmamasının bir nedenidir. YDB’lerde maksimum gerilmedeki şekil değiştirme, normal dayanımlı betona göre daha fazladır. Buna karşılık, gerilme–şekil değiştirme diyagramının alçalan kısmının eğimi, normal betona göre daha diktir. Bu durum, yüksek dayanımlı betonların normal dayanımlı olanlara kıyasla daha gevrek olduğunun bir göstergesidir [7,8].

Yüksek dayanımlı betonların en önemli kusurları gevrek kırılma, yüksek otojen deformasyon ve yangına karşı dayanıksızlıktır. Günümüzde bu kusurlar çeşitli önlemlerle giderilerek yüksek performanslı betonlar üretilmektedir [5].

2.1.3 Lif donatılı çimento esaslı kompozitler

Çimento esaslı malzemelerin çekme dayanımları ve toklukları düşüktür. Bu özellikleri iyileştirmek için çimento matrisini liflerle güçlendirmek günümüzde çok kullanılan yaygın bir yöntemdir. Liflerin görevi, gerilme uygulanan çimento matrisindeki çatlak gelişimini engellemek veya geciktirmek, çatlağın hızlı ve kontrolsüz ilerleyişini yavaş ve kontrollü bir hale getirmektir [9].

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. Lif donatılı beton üretiminde, gerek araştırma bazında gerekse uygulama bazında çelik lif gibi metalik olanların haricinde; birçok farklı lif türünden faydalanılmaktadır. Bunlara örnek olarak, asbest, cam ve karbon lifleri ile selüloz lifleri gibi doğal lifler; akrilik, aramid, naylon ve polipropilen gibi yapay lifler gösterilebilir [1,10].

2.1.4 Karma lif donatılı çimento esaslı kompozitler

Karma lifli betonlar, betonda tek tip ve boyutta lif kullanımı yerine birden fazla tip ve boyutta lif kullanılarak üretilen yeni çimento esaslı kompozit malzeme olarak tanımlanabilir. Liflerin farklı tipleri, kompozit performansını iyileştirmek ve özel uygulamalar kazandırmak için bir kompozite karma lif formunda eklenmektedir. Karma lif formu, aynı veya farklı tür ve geometride liflerin betonda birlikte kullanılmasıyla oluşmaktadır [11].

Karma lifli beton üretiminde amaç, farklı kür yaşlarında ve yük aşamalarında

betonun farklı bölgelerinde veya ara yüzey bölgelerinde farklı boyutlarda oluşan çatlakların mikro düzeyden başlayarak kontrol edilebilmesidir. Bu amaç doğrultusunda mikro, mezo ve makro düzeydeki çatlakların kontrolü için yine mikro, mezo ve makro düzeyde lifler kullanılmaktadır. Mikro, çatlak; uzunluğu bir numune veya yapının boyutlarına göre küçük olan çatlak, mezo çatlak ise uzunluğu bir numune veya yapının boyutlarına göre fazla küçük olmayan çatlaktır [11]. Yüksek dayanımlı makro lifler (çelik) büyük çatlakları, zayıf mikro lifler (polipropilen v.b.) ise mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol etmektedir. Mikro ve makro liflerin kullanılmasının betonda meydana getirdiği iyileştirmeler şunlardır.

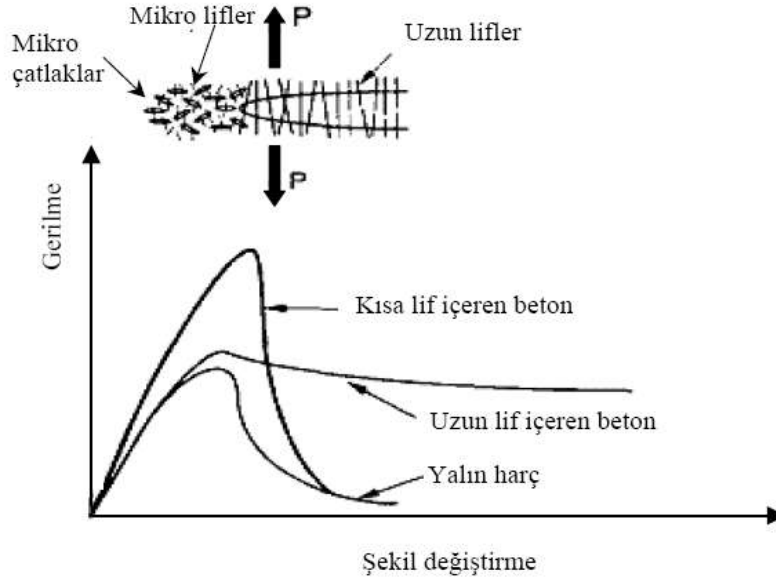
Mikro lifler;

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

Makro lifler;

- Elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını arttırırlar.
- Makro düzeydeki çatlakları kontrol ederler.
- Maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirirler [12].

Farklı lif boyutlarının lif köprülenmesine etkisi Şekil 2.1’de görülmektedir. Mikro lifler mikro çatlakları köprü görevi görerek durdururken, makro lifler çatlak başlangıcında etkili olmayıp, maksimum yük sonrası davranışı iyileştirirler. Bu durumda mikro lifler çimento hamurunun, makro lifler ise betonun güçlenmesinde etkili rol oynarlar [12].

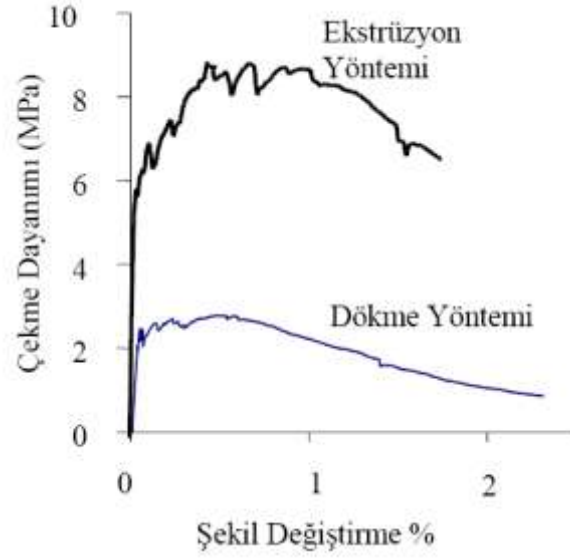


Şekil 2.1 : Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutu etkisi [12].

2.1.5 Sentetik lifli yüksek performanslı betonlar

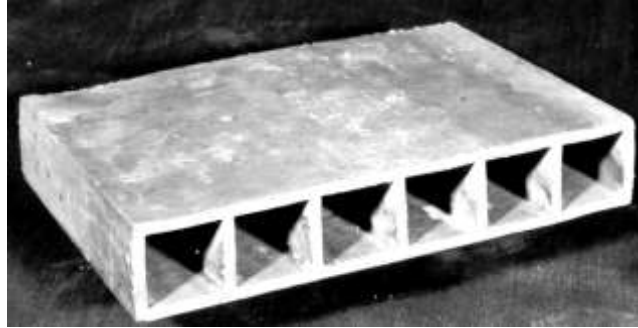
Lif katkılı betonlarda yüksek performans sağlamak için kullanılan malzeme ve üretim tekniği seçimi önemlidir. Liflerin etkili bir biçimde dağıtıldığı, kuvvet uygulanan yöne doğru yönlendirildiği ve ekstrüzyon gibi özel üretim teknikleri ile lif-çimento hamuru ara yüzeyinin güçlendirildiği durumlarda yüksek performans elde edilmekte ve çok çatlaklı kırılmalar gözlenmektedir. Yapılan incelemeler sonucu, liflerin çimento hamuru içinde dağılmadığı bölgelerin büyüklüğü arttıkça, ilk çatlak gerilmesinin azaldığı görülmüştür. Bunun yanında, lif topaklanması arttıkça şekil değiştirme sertleşmesinin azaldığı ve tokluğun düştüğü anlaşılmıştır.

Yüksek performanslı sentetik lif katkılı ekstrüzyon yöntemiyle üretilen malzeme ve dökme yöntemiyle üretilen malzemenin gerilme şekil değiştirme davranışları Şekil 2.2’de karşılaştırılmaktadır [13,14].



Şekil 2.2 : Yüksek performanslı sentetik lif katkılı betonda üretim yönteminin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi [14].

Görüldüğü gibi ekstrüzyon yöntemi ile üretimde çekme dayanımı dökme yöntemine göre yaklaşık 2,5 kat artmaktadır. Bu yöntemle üretilen bir eleman Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 : Yüksek performanslı sentetik lif katkılı ekstrüzyon yöntemiyle üretilen bir eleman [14].

2.2 Sentetik Lifler

Günümüzde, petrokimya ve tekstil endüstrisinde yapılan araştırmalar ve gelişmeler sonucu sentetik polimer lifleri üretilmektedir. Akrilik, aramid, naylon, polyester, polietilen ve polipropilen başlıca polimer esaslı liflerdir. Tümünün çekme dayanımları çok yüksek olmasına rağmen, aramid dışındaki liflerin çoğu düşük elastisite modülüne sahiptir. Sentetik liflerin kalitesi, çap ve narinliklerine bağlıdır ve çapları mikron düzeyindedir. Bu lifler tekil ya da lif demeti halinde bulunurlar. Lif

donatılı beton kompozitlerde kullanılanların uzunlukları 12 -50 mm arasında değişir. Bazı lif tipleri çok kısa (1-2 mm) olabilir, uygulama amacına göre farklı tipler seçilebilir [15]. Bazı sentetik liflerin özellikleri Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çimento esaslı kompozitlere sentetik lifler katılarak lif donatılı betonlar üretilmektedir. Beton içindeki oranları %0,05 – 6,5 arasında değişebilen sentetik lifler betonun kırılma direncini artırır. Lif donatılı betonlar için dört noktalı eğilme deneyindeki eğilme dayanımı, liflerin kirişteki çatlakları köprülediği yerlerde yarı sünek bir davranış sergiler. Ancak yalın betonda yük tepe noktasını aştığında çok az bir enerji yutulmasıyla birlikte numune kırılır [16].

Çizelge 2.1 : Sentetik liflerin özellikleri [17-21].

Lif Tipleri	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Nihai Uzama (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Çap (µm)
Akrilik	1,17	207-1000	14,6-19,6	7,5-50,0	-	13-104
Aramid I	1,14	3620	62	4,4	-	12
Aramid II	1,44	3620	117	2,5	-	10
Naylon	1,16	965	5,17	20,0	260	23
Polyester	1,34-1,39	896-110	17,5	-	265	-
Polietilen	0,96	200-300	5,0	3,0	253	25-30
Polipropilen	0,90-0,91	310-760	3,5-4,9	15,0	160	18

2.2.1 Naylon liflerin özellikleri

Naylon, doğrusal poliamid tipi plastiklere verilen genel bir addır. Çeşitli endüstriyel alanlarda, örneğin tekstil sanayinde kullanılan birçok naylon türü mevcuttur. Bugün itibariyle, betonda donatı olarak kullanılmak üzere geliştirilmiş, naylon 6 ve naylon 66 olmak üzere iki tip naylon bulunmaktadır [22]. Monofilament (çoklu iplikçik) formda kullanılırlar. Su emme özellikleri olduğundan nem dengesini korurlar. Polipropilen ve polyester lifler betona sadece mekanik yönden bağlanırken, naylon lifler su emme özellikleri sayesinde betonla daha kuvvetli bağ oluştururlar.

Naylon eriyikten sarma ile lif haline getirilen naylon liflere gerilme uygulanarak çekme dayanımları yükseltilebilir [22]. Amid grubu yapılarla arasında, poliamid zincir ile, hidrojen bağı sağlar, bu da naylona yüksek mekanik dayanım, aşınmaya karşı direnç, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklıklara kadar özelliklerini

koruyabilme ve kimyasallara karşı dayanım gibi birçok olumlu özellik katar [23].

Hidrofil özellikte bir malzeme olan ve %4,5 mertebelerine kadar nem içerebilen naylon lifler, hacimsel olarak %0,1-%0,2 gibi düşük oranlarda kullanıldıklarında betonun hidratasyon sürecini veya işlenebilirliğini etkilememekle birlikte, daha yüksek hacim oranlarında kullanıldıkları takdirde bu özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Naylon liflerin diğer yapay liflere göre daha pahalı bir malzeme olması da bu malzemenin önde gelen sakıncalarından birisidir [22].

2.2.2 Naylonun diğer özellikleri

- Kimyasal dirence sahiptir.
- Çekme dayanımı yüksektir.
- Ayrışmaya karşı dayanıklıdır.
- Ergime sıcaklığı naylon 66 için 255-260°C, naylon 6 için 215-220°C derece civarlarındadır. Naylon 66 ve naylon 6 arasındaki en belirgin fark ergime sıcaklıklarının farklı oluşudur.
- Su emme kapasitesi yüksektir.
- Özgül ağırlığı yaklaşık 1.16g/cm³'tür.
- Alkali dayanıma sahiptir [15,24,25].

2.2.3 Naylon lifli betonların genel özellikleri

Naylon lif donatılı betonlar, Amerikan Ordu Mühendisleri tarafından, 1960'lı yıllarda, patlama etkilerine dayanıklı askeri yapıların inşasında kullanılması amacıyla yapılan çalışmalarla geliştirilmiş bir lif donatılı beton türüdür [1].

Liflerin beton içindeki dağılımlarının düzenli olması, her bölgeye etki etmeleri ve oluşan çatlakların engellenmesi açısından önemlidir. Taze betonda düzgün yayılmış lif donatılar plastik rötre çatlamlarını engellerken, sertleşmiş betonda da lif donatıların düzgün şekilde yayılmış olması mikro çatlakların makro düzeye geçmesine izin vermez. Bununla birlikte lifler makro çatlak üzerinde köprülenme yaparak betonun dağılmasını engeller. Naylon liflerin beton karışımı boyunca yayılma yetenekleri yeterli olduğundan, betonun plastik ve sertleşmiş haldeki özelliklerini geliştirirler [17].

Naylon lifler, betonda dayanımı, sünekliği, durabiliteyi ve tokluğu artırmak için güçlendirici olarak kullanılmaktadır [2]. Naylon lifli betonların basınç

dayanımlarında lifsiz betona kıyasla kayda değer bir artış görülmesi 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 [17].

Beton içinde kullanıldıklarında, suyu emerek liflerin betonu içten dışa doğru kür etmesini sağlayabilirler. Ayrıca emilen su, lif ve beton arasında yapışmayı sağlar [2].

2.3 Çelik Lifler

2.3.1 Çelik liflerin özellikleri

Çelik teller farklı şekil ve boyutlarda olup, tel özelliklerinin tipik örnekleri ve tanımlanması Şekil 2.4'teki gibi özetlenebilir. Ayrıca TS 10153'e göre çelik tel tipleri şu şekilde sınıflandırılmışlardır:

A Sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyli teller

B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller

Tip 1: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller

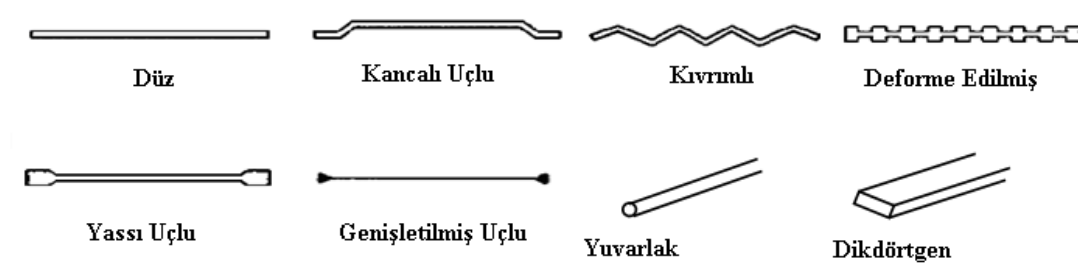
Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller

Tip 3: Ay biçimli dalgalı teller

C Sınıfı: Kancalı uçlu teller

Tip 1: İki ucu kancalı teller

Tip 2: Tek ucu kancalı teller



Şekil 2.4 : Çelik lif tipleri ve kesitleri [26].

Çelik teller beton içinde yüzey ve kenarlar da dahil olmak üzere homojen biçimde dağılır. Betonun sertleşmesi ve hidrasyon sürecinde malzeme içinde sayısız küçük

boşluklar ve çatlaklar oluşur. Çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına çelik teller karşı koyar; rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önlenir [27].

2.3.2 Çelik liflerin beton özelliklerine etkileri

Çelik telleri betonda kullanmanın başlıca beş yararı vardır: a) Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton, b) Donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi, c) Etkin çatlak kontrolü, d) Dayanıklılık, ve e) Donatı işçiliğinde belirgin azalma.

Beton yapıların kırılma davranışını daha iyi anlamak için, malzemenin çatlama sonrası davranışı ile ilgili bilgiler önemlidir. ÇTDB’da beton matris çatladıktan veya gevrek türde kırıldıktan sonra sünek çelik teller yükü diğer tellere aktarmaya ve taşımaya devam ederek, malzemenin yapısal bütünlük ve kohezyonunun devam etmesine yardımcı olurlar. Rasgele dağılı ve kısa kesilmiş teller, matrisin çatlamasından sonra mikroçatlakların önünü keserek bu çatlakları köprüleyerek çatlak yayılmasını kısıtlarlar. Çelik tellerin sıyrılması ise, daha çok enerji gerektirmekte ve malzemenin tokluğuna, tekrarlı ve dinamik yüklemelere karşı direncine büyük artışlar sağlamaktadır [28].

Çelik teller, betonlar üzerindeki en iyi iyileştirmeyi eğilme dayanımı ve eğilme tokluğunda yapmaktadır. Çelik tel donatılı betonlar yüksek eğilme rijitliğine sahiptirler ve servis yükleri altında daha az çatlak genişliğine sahip olurlar. Çelik tel kullanımı ile eğilme dayanımındaki iyileşme geleneksel olarak kullanılan donatı çubuklarının gösterdiği potansiyele karşı oldukça yetersizdir [29].

Çelik tel içeren betonlar normal betonlara oranla sağladıkları üstünlüklerden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Bunlar kısaca; püskürtme beton uygulamaları, yol kaplamaları, su ve deniz yapıları, zemin kaplamaları, prefabrike yapıların üretimi, depreme dayanıklı stratejik yapılar olarak sıralanabilir [3, 29].

2.4 Silis Dumanı

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının üretimleri sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında, yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun

parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur.

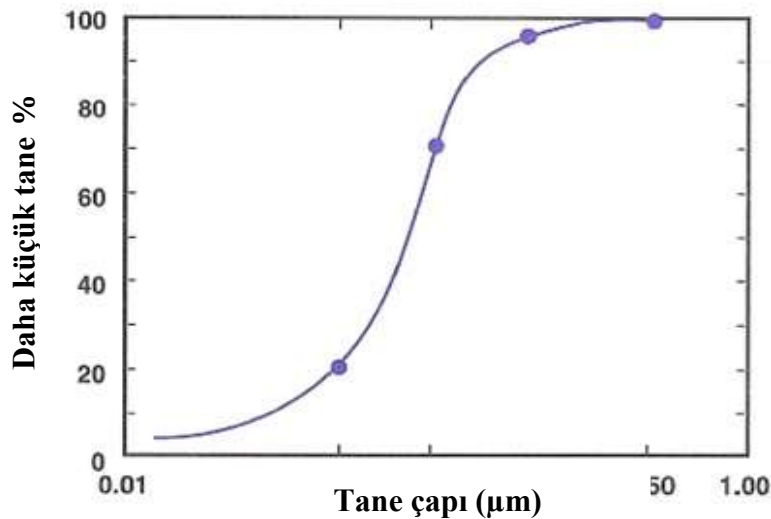
Araştırmalarda ve pratikte kullanılan silis dumanları genellikle %75 ve yukarı oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan elde edilmiştir. Silis dumanının tipik kimyasal bileşimleri Çizelge 2.2’de görülmektedir [30].

Çizelge 2.2 : Tipik silis dumanı kimyasal bileşimi [30].

Kimyasal bileşen	Ağırlıkça yüzde
SiO ₂	93
Al ₂ O ₃	0,4
Fe ₂ O ₃	0,8
CaO	0,6
MgO	0,6
SO ₃	0,3
Alkali	0,96

Yaklaşık 2,20 kg/dm³’lük bir özgül ağırlığa sahip olan silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli ve küresel taneciklerden meydana gelir.

Silis dumanının tane boyut dağılımının tipik bir örneği Şekil 2.5’te verilmiştir. Görüldüğü gibi tanelerin hemen tümü 0,1 µm civarındadır. Ortalama çimento tanesinin çapı 10 µm kabul edilirse silis dumanının çimentodan 100 kere daha ince olduğu sonucuna varılabilir [30].



Şekil 2.5 : Silis dumanı tane boyut dağılımı [30].

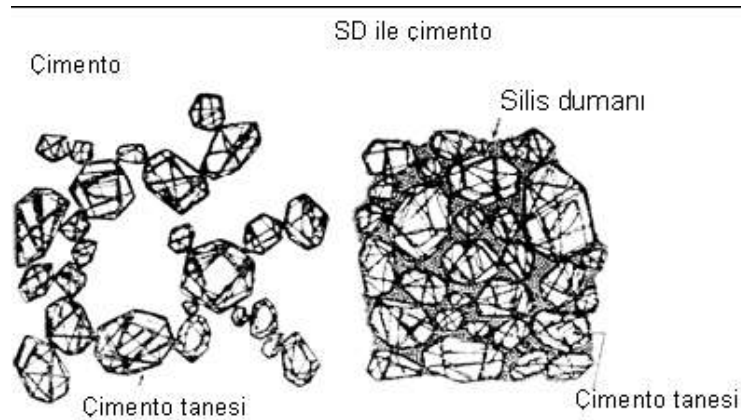
Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık isteyen yerlerde kullanılmaktadır. Uygulama alanları olarak yerinde dökülmüş veya

prefabrike yüksek dayanımlı veya erken dayanımı yüksek beton elemanları, ağır aşınmaya maruz döşemeler ve yol kaplamaları, erozyona ve oyulmaya maruz hidrolik yapılar, zararlı kimyasallara maruz betonlar, beton elemanların onarımı ve güçlendirilmesi, çelik donatının korunması, yüksek performanslı çimento şerbet ve sıvaları sayılabilir [30].

2.4.1 Silis dumanının beton özelliklerine etkisi

Çimento hamuru ve agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi betonda en zayıf halkadır. Silis dumanı gibi ultra incelikteki tanelerin kullanımı, yoğunluğun artırılması dolayısıyla boşlukların azaltılması taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için önemlidir. Bu tanelerin etkili olabilmesi için, beton içinde iyi bir dağılıma gereklidir ve bunu da bir süper akışkanlaştırıcı ile sağlamak olasıdır [8, 31].

Silis dumanı yüksek performanslı beton ve harçların önemli bileşeni olup işlenebilmeyi artırır, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı artırır, sonuçta da betonun dayanımı ve dürabilitesi artar. Ancak, SD'nın betonda kullanılmasıdaki problem fiyatıdır; fiyatı, çimento fiyatının yaklaşık beş katıdır ve her yerde bulunması güçtür. Diğer taraftan, bazı stratejik yapılarda kullanılacak yüksek performanslı beton ve harçların uzun süreli performanslarında oluşan gelişme de hesaba katılmalıdır [32, 33].



Şekil 2.6 : Çimento hamurunda silis dumanının doldurma etkisi [34].

Silis dumanı içeren bir çimento hamurunda Şekil 2.6'da görüldüğü gibi sıkı bir diziliş elde edilir.

Silis dumanı içeren betonların özelliklerini gözönüne alarak silis dumanının iki şekilde kullanıldığını hesaba katmak gerekir:

- i. Dürabilitenin yükseltilmesi ve hidratasyon hızının azaltılması gibi nedenlerde çimento miktarında bir miktar azaltma yaparak ve çimento ile yer değiştirerek kullanılması ve
- ii. Hem taze ve hem de sertleşmiş halde beton özelliklerini geliştirmek için bir mineral katkı olarak kullanılmasıdır [34].

2.4.2 Silis dumanının betonun dayanımı ve dürabilitesi üzerindeki etkisi

Dürabilite bakımından değerlendirildiğinde, silis dumanının betonun dürabilitesi üzerindeki en önemli etkisi malzeme içindeki boşlukları azaltmasıdır. Boşlukların azalmasına paralel olarak betonun geçirimliliği azalır. Geçirimliliğin azalması ile zararlı kimyasalların malzeme içerisine difüzyonu zorlaşır, dolayısıyla bu kimyasallara karşı dayanım yükselir. Dış ortam koşullarında silis dumanı içermeyen betonlara göre dürabilitesi daha yüksek ve uzun ömürlü bir malzeme elde edilir. Bunun yanı sıra betonda çimento ile yer değiştiren silis dumanı miktarı arttıkça alkali-agrega reaktivitesine karşı direnç artar [30].

2.5 Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkisi

Kimyasal katkılar, taze veya sertleşmiş beton veya harç özelliklerini değiştiren, betonun nihai özelliklerine zararlı etki oluşturmeyen, %5'ten daha az olmak üzere karıştırma işleminden hemen önce veya karıştırma sırasında katılan malzemelerdir.

Beton katkı maddeleri hızlandırıcı katkılar, akıcı kıvam için katkılar, hava sürükleyici katkılar, betonun kimyasallara karşı dayanımını arttıran katkılar, priz hızlandırıcı veya priz geciktirici katkılar olmak üzere sınıflandırılabilirler [35].

Özellikle yüksek dayanımlı betonlarda su/çimento oranı çok düşük olduğundan işlenebilme problemlerini ortadan kaldırmak için süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri sayesinde karışım suyu büyük oranda azaltılarak dayanım ve dayanıklılığı yüksek betonlar üretilmektedir [35].

Yeni kuşak hiperakışkanlaştırıcıların etki mekanizmaları geleneksel süperakışkanlaştırıcılardan farklıdır. Geleneksel melamin ve naftalin sülfonatlar gibi süperakışkanlaştırıcılar, çimento taneri tarafından emilerek beton karıştırma işleminin erken aşamasında tanelerin yüzeylerini kuşatırlar ve yüzeylerin negatif yükünü arttırarak bu taneleri negatif itme ile dağıtırlar. Yeni kuşak hiperakışkanlaştırıcılarda

bu dağıtma etkisinin yanında akışkanlaştırıcı moleküllerin sahip oldukları uzun kenarlı zincirler çimento partiküllerinin birbirlerine olan uzaklığını arttıırırlar. Buna sterik etki denilmektedir [36].

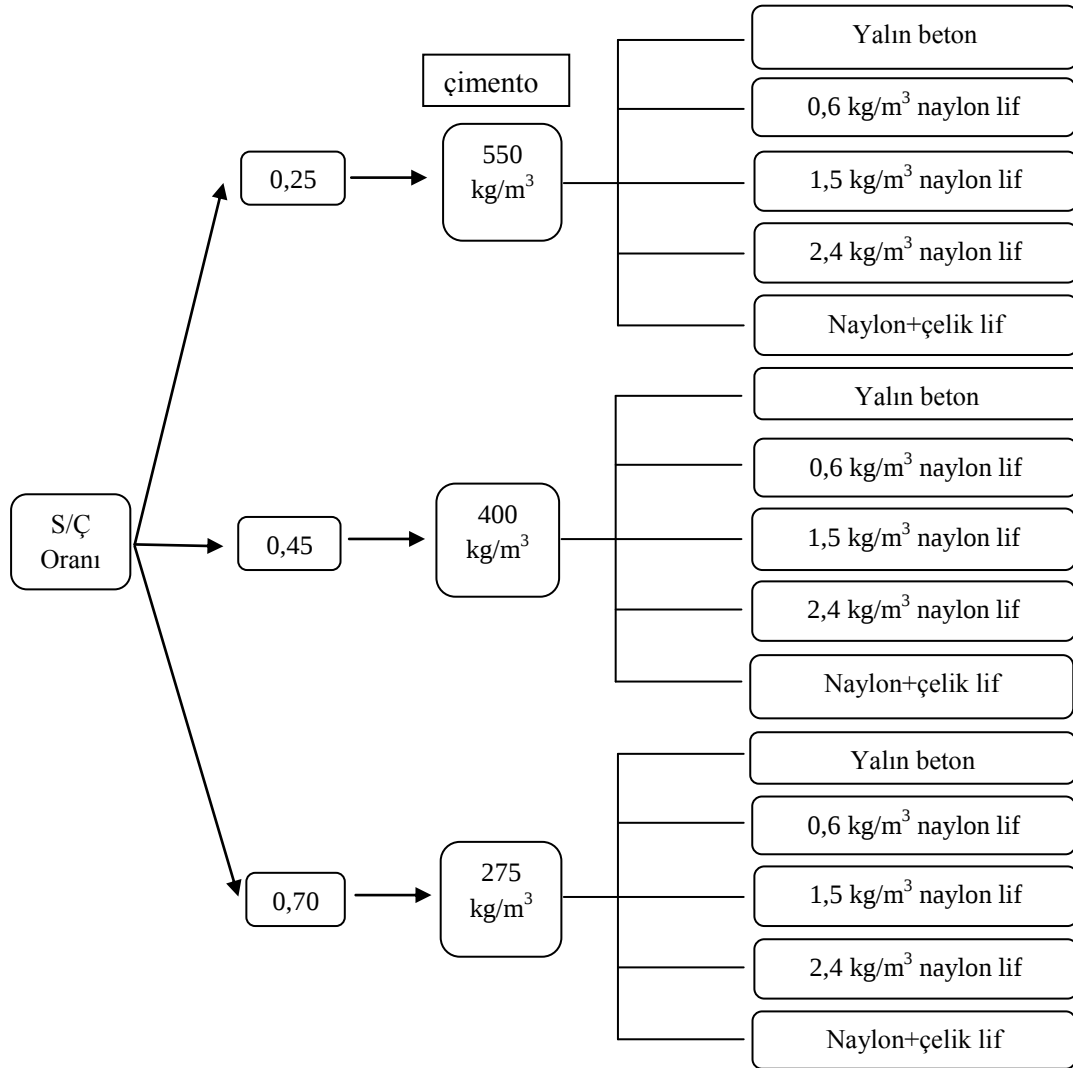
Akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri, bu malzemelerin kullanım oranları, kullanılacak çimento tipi ve çimento miktarları üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına karşın, her yeni üretimde betonda kullanılan malzemeler, bu malzemelerin kaynağı veya kullanım oranları değiştiğinden bu katkılarla ilgili genelleme yapmak mümkün değildir. Akışkanlaştırıcı katkı malzemelerinin kullanım oranlarının çalışma öncesinden yapılan ön deneylerle belirlenmesi gerekir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında, farklı su/bağlayıcı oranı ve farklı çimento dozajlarına sahip betonlara naylon lifin farklı miktarlarda eklenmesiyle oluşan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bütün gruplarda, üretilen karışımlarda basınç, elastisite modülü, yarma çekme ve üç noktalı kiriş eğilme deneyleri yapılmıştır. Tüm gruplarda uygulanan deneysel programın şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1 : Deneysel programın şematik gösterimi.

3.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler

3.2.1 Çimento

Kullanılan çimento CEM I 42.5 R olup AkçanSa Çimento fabrikasının üretimidir.

Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Üretimlerde kullanılan çimentonun özellikleri.

Fiziksel Özellikler	
Özgöl yüzey (Blaine)	3890 cm ² /g
Özgöl ağırlık	3,17 g/cm ³
Priz başlangıcı	128 dakika
Priz sonu	196 dakika
Mekanik Özellikler	
Basınç dayanımı (2.gün)	31,2 MPa
Basınç dayanımı (28. gün)	56 MPa
Kimyasal Özellikler	
Cl ⁻	%0,0425
SO ₃	%2,81
Çözünmeyen kalıntı	%0,78
Kızdırma kaybı	%1,45

3.2.2 Silis dumanı

Üretimlerde kullanılan silis dumanının özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 : Üretimlerde kullanılan silis dumanının kimyasal özellikleri.

Özgöl ağırlık	2,18 g/cm ³
Bileşen, %	
SiO ₂	96,74
Al ₂ O ₃	0,42
Fe ₂ O ₃	0,35
CaO	0,14
MgO	0,20
SO ₃	0,18
Na ₂ O	0,15
K ₂ O	0,28
H ₂ O	0,20
Klorür (Cl ⁻)	0,0064
Kızdırma kaybı	1,40

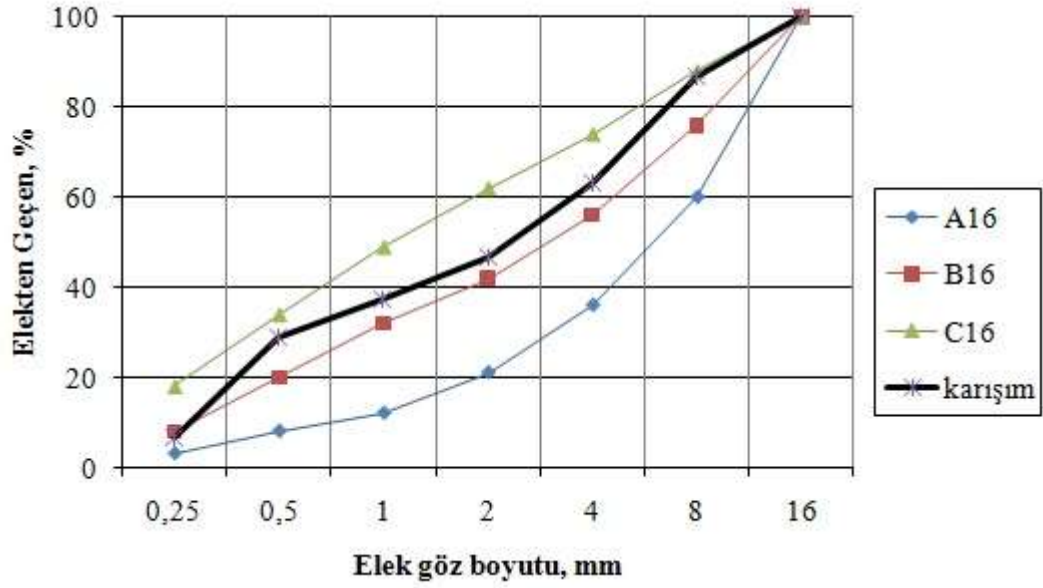
3.2.3 Agregalar

Çalışmada üretilen karışımlarda doğal kum, kırma kum ve kırma taş I olmak üzere 3 tip agregaya kullanılmıştır. Beton bileşimlerinin tamamında agregaya granülometrisi sabit tutulmuştur.

Agregaların fiziksel özellikleri Çizelge 3.3’te, karışımın granülometri eğrisi Şekil 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Üretimde kullanılan agregaların özellikleri.

	Özgöl ağırlık	Karışım oranları	Su emme yüzdeleri
Doğal kum	2,68 g/cm ³	%26	%1,1
Kırma kum	2,70 g/cm ³	%38	%2,1
Kırma taş I	2,71 g/cm ³	%36	%0,6



Şekil 3.2 : Üretimde kullanılan agregaların granülometri eğrisi.

3.2.4 Naylon lif

Çalışmada kullanılan naylon lifler 6mm, 19mm ve 32mm olarak 3 farklı uzunluğa sahiptir. Naylon liflerin özellikleri Çizelge 3.4’te ve betondaki karışım oranları Çizelge 3.5’te verilmektedir.

Çizelge 3.4 : Naylon liflerin özellikleri.

Boy	6 mm, 19mm, 32 mm
Çap	23µm
Özgöl ağırlık	1,16 g/cm ³
Çekme dayanımı	896 N/mm ²

Çizelge3.5 : Naylon liflerin 1m³ betondaki miktarları.

Boy	1m ³ betondaki lif miktarları, kg		
6 mm	1	0,625	0,25
19 mm	1	0,625	0,25
32 mm	0,4	0,25	0,1
Toplam	2,4	1,5	0,6

3.2.5 Kancalı uçlu çelik tel

TS 10513 standardına uygun iki ucu kancalı, birbirine tutkalla birleştirilmiş soğuk çekilmiş çelik tellerdir. Bu çelik teller Bekaert'in üretimi olup Dramix ZP 305X kodludur. Kancalı uçlu çelik tellerin teknik özellikleri Çizelge 3.6'da verilmektedir.

Çizelge 3.6 : Kancalı uçlu çelik tellerin teknik özellikleri.

Boy	30 mm
Çap	0,55 mm
Narinlik (l/d)	55
Özgül ağırlık	7,85 g/cm ³
Çekme dayanımı	2250 N/mm ²

3.2.6 Düz çelik tel

Üstü pirinç kaplı, sarı renkli kısa kesilmiş, düz çelik tellerdir. Bekaert'in OL 6/16 kodlu üretimi olup özellikleri Çizelge 3.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.7 : Kısa tellerin özellikleri.

Boy	6 mm
Çap	0,16 mm
Narinlik (l/d)	37,50
Özgül ağırlık	7,17 g/cm ³
Çekme dayanımı	2250 N/mm ²

3.2.7 Süperakışkanlaştırıcı

Kullanılan kimyasal beton katkısı polikarboksilik eter esaslı yeni nesil bir süperakışkanlaştırıcıdır. Özgül ağırlığı 1,082 g/cm³ olan bu katkı maddesi beton karışımlarında farklı oranlarda kullanmıştır. Karışımdaki miktarları taze beton özelliklerinin verildiği çizelgede belirtilmiştir.

3.3 Beton Üretimi

Beton üretimlerinde 40 litrelik beton mikseri kullanılmıştır. Karışım hesaplarında bulunan miktarlarda tartılan numunelerden ilk olarak iriden inceye doğru agregalar mikseriye konulmuş ve 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, tartılan çimento eklenmiş ve 2 dakika daha kuru olarak karıştırılmıştır. Sonrasında, su/bağlayıcı oranında hesaplanan su yavaş yavaş kuru karışıma eklenmiştir. Hedeflenen beton kıvamını sağlamak için katılan yeni kuşak süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi de karma suyunun bir miktarı ile karıştırılarak çimento hamuruna yavaş yavaş ilave edilmiştir. En son olarak, naylon lifler birbirlerinden ayrılarak ve homojen dağılması sağlanarak betona eklenmiştir. Naylon liflerin karışıma en son katılmasının nedeni su emme yüzdelерinin çok yüksek olması ve karma suyundan önce konulduklarında eklenen suyun büyük bir bölümünü emerek hidrasyonu engellemeleridir. Bütün bileşenler betona katıldıktan ve 3-4 dakika karıştırıldıktan sonra taze betonun çökme değerine bakılmış, istenen slump değeri sağlanmadığında bir miktar daha kimyasal katkı eklenerek beton kıvamı istenilen değerlere getirilmiştir.

3.4 Beton Karışımları ve Numune Kodları

Üç farklı su/bağlayıcı oranına sahip referans betonlara 1m^3 bileşimde 0,6kg, 1,5kg, ve 2,4kg olmak üzere 3 farklı içerikte naylon lif eklenerek 12 adet beton karışımı elde edilmiştir. Daha sonra söz konusu referans betonlara naylon lifler çelik liflerle birlikte katılarak karma lif karışımına sahip 3 farklı beton üretilmiştir. Karma karışıma sahip betonlarda 1m^3 bileşim için 1,5kg naylon lif kullanılırken, 20kg kanca uçlu çelik tel ve 18 kg kısa kesilmiş çelik tel kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan, W25 kodlu ilk seride bağlayıcı dozajı 550 kg/m^3 'tür. Bağlayıcı ağırlığının yaklaşık %10'u civarında silis dumanı kullanılmıştır. W45 kodlu, 400 dozlu ikinci seride su/çimento oranı 0,45 olarak sabit tutulmuştur. Üçüncü serinin ise çimento dozajı 275 kg/m^3 , su/çimento oranı 0,70'tir ve W70 olarak kodlandırılmıştır. Seriler $2,4\text{ kg/m}^3$, $1,5\text{ kg/m}^3$ ve $0,6\text{ kg/m}^3$ oranlarında naylon lif kullanılarak üretilmiştir. Bu serilerin kodları sırasıyla N24, N15 ve N6 şeklindedir. Karma lifli olarak üretilen son seride $1,5\text{ kg/m}^3$ oranında, 6mm uzunluğa, $23\mu\text{m}$ çapa ve 869 MPa çekme dayanımına sahip naylon lifler, 1m^3 'teki miktarı 18 kg olan, 6 mm uzunluğa, 0,16 mm çapa ve 2250 MPa çekme dayanımına sahip kısa düz uçlu teller, yine 1m^3 'teki miktarı 20 kg olan, 30 mm uzunluğa, 0,55 mm çapa ve 2250 MPa çekme dayanımına

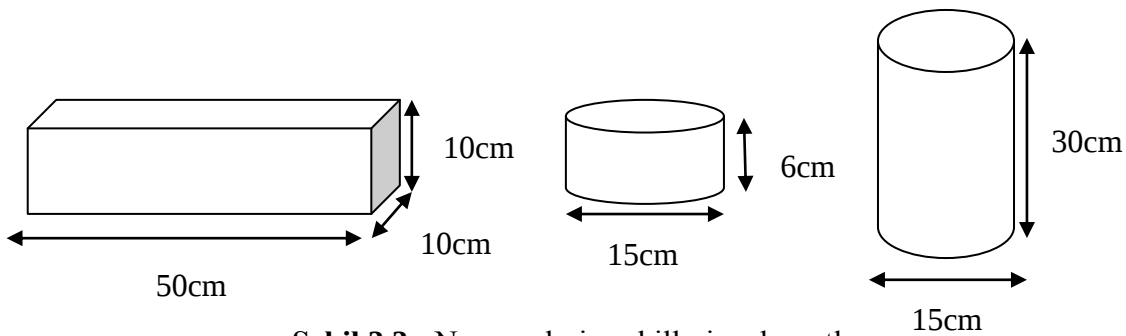
sahip kancalı uçlu uzun çelik teller kullanılmıştır. N0 kodlaması yalın betonu temsil etmektedir. S25 kodlu karışımlar ise karma lifli olarak üretilen karışımlardır. Bütün karışımlarda çökme değerinin S3 sınıfında olması kimyasal katkı miktarı değiştirilerek sağlanmıştır. Üretilen serilerin numune kodları ve lif oranları Çizelge 3.8’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.8 : Karışımların kodları, karışımlardaki naylon ve çelik lif oranları.

Numune kodu	Su / Bağlayıcı	Naylon lif (kg/m ³)	Düz çelik tel (kg/m ³)	Kanca uçlu çelik tel (kg/m ³)
W25N0	0,25	-	-	-
W25N24	0,25	2,4	-	-
W25N15	0,25	1,5	-	-
W25N6	0,25	0,6	-	-
W25S25	0,25	1,5	18	20
W45N0	0,45	-	-	-
W45N24	0,45	2,4	-	-
W45N15	0,45	1,5	-	-
W45N6	0,45	0,6	-	-
W45S25	0,45	1,5	18	20
W70N0	0,7	-	-	-
W70N24	0,7	2,4	-	-
W70N15	0,7	1,5	-	-
W70N6	0,7	0,6	-	-
W70S25	0,7	1,5	18	20

3.5 Numune Boyutları ve Şekilleri

Üretilen numunelerin şekilleri ve boyutları Şekil 3.2’de görülmektedir. Her bir seri için 10*10*50 cm boyutlu prizma numunelerden 5 tane, Ø15/30 cm olan silindirlerden 4 tane, Ø15/6 cm’lik disklerden de 6 tane üretilmiştir.



Şekil 3.3 : Numunelerin şekilleri ve boyutları.

3.6 Numunelerin Deneylere Hazırlanması

Üretilen farklı boyuttaki numuneler üzerinde deneyler uygulanmadan önce yapılan işlemler:

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

3.7 Taze Beton Deneyleri

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

3.7.1 Taze birim ağırlık deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi, beton üretimi sırasında birim ağırlık kabı olarak kullanılan silindir kaplara taze beton karışımı iki seferde dökülüp vibrasyonla yerleştirilmek suretiyle TS EN 12350-6'ya uygun olarak yapıldı. Taze birim ağırlık deneyi sonuçları Çizelge 3.9, Çizelge 3.10, Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12'de verilmektedir.

3.7.2 Çökme deneyi

Çökme deneyi, TS EN 12350-2'ye göre taze beton betonun işlenebilirliği hakkında fikir edinebilmek ve kıvamını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deney, belirli bir yöntemle betonla doldurulan çökme konisinin yukarı kaldırılması ve taze betonun kendi ağırlığı ile yayılması sonrasında taze betonda ilk konumuna göre meydana gelen yükseklik farkı ölçülerek yapılmıştır. Bu yükseklik kaybına göre de taze betonun çökme değeri belirlenmiştir. Üretilen yalın ve naylon lifli beton karışımlarına ait çökme deneyi sonuçları ve belirlenen diğer taze beton özellikleri Çizelge 3.9, Çizelge 3.10, Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12'de verilmektedir.

Çizelge 3.9 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan naylon lifli serilerin gerçek beton bileşimleri.

Kullanılan malzeme	W70N0	W70N6	W70N15	W70N24
Çimento (kg/m ³)	268	269	266	274
Silis dumanı (kg/m ³)	0	0	0	0
Su (kg/m ³)	188	188	186	192
Doğal kum (kg/m ³)	475	476	469	475
Kırma kum (kg/m ³)	714	716	705	714
Kırma taş 1 (kg/m ³)	669	670	661	669
Naylon lif (kg/m ³)	0	0,587	1,449	2,388
Süperakışkanlaştırıcı (kg/m ³)	1,876	2,153	2,657	3,557
Hava boşluğu (%)	3,7	3,4	4,6	2,8
Su / bağlayıcı	0,7	0,7	0,7	0,7
Birim ağırlık (kg/m ³)	2,31	2,32	2,29	2,33
Çökme (cm)	12	10	11	13

Çizelge 3.10 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan naylon lifli serilerin gerçek beton bileşimleri.

Kullanılan malzeme	W45N0	W45N6	W45N15	W45N24
Çimento (kg/m ³)	397	390	392	399
Silis dumanı (kg/m ³)	0	0	0	0
Su (kg/m ³)	179	176	176	179
Doğal kum (kg/m ³)	464	456	469	462
Kırma kum (kg/m ³)	698	685	687	695
Kırma taş 1 (kg/m ³)	654	642	645	651
Naylon lif (kg/m ³)	0	0,585	1,469	2,571
Süperakışkanlaştırıcı (kg/m ³)	2,142	2,732	3,134	3,571
Hava boşluğu (%)	2,1	3,6	2,9	2,1
Su / bağlayıcı	0,45	0,45	0,45	0,45
Birim ağırlık (kg/m ³)	2,39	2,35	2,36	2,39
Çökme (cm)	10	10	12	11

Çizelge 3.11 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan naylon lifli serilerin gerçek beton bileşimleri.

Kullanılan malzeme	W25N0	W25N6	W25N15	W25N24
Çimento (kg/m ³)	472	476	482	478
Silis dumanı (kg/m ³)	58	58	59	59
Su (kg/m ³)	147	148	150	149
Doğal kum (kg/m ³)	430	433	437	434
Kırma kum (kg/m ³)	646	651	657	652
Kırma taş 1 (kg/m ³)	605	609	615	611
Naylon lif (kg/m ³)	0	0,583	1,475	2,348
Süperakışkanlaştırıcı (kg/m ³)	5,665	6,19	6,745	7,192
Hava boşluğu (%)	4,9	4,1	3,0	3,5
Su / bağlayıcı	0,25	0,25	0,25	0,25
Birim ağırlık (t/m ³)	2,36	3,38	2,41	2,39
Çökme (cm)	11	11	11	12

Çizelge 3.12 : Karma lifli olarak üretilen naylon ve çelik lifli serilerin gerçek beton bileşimleri.

Kullanılan malzeme	W70S25	W45S25	W25S25
Çimento (kg/m ³)	271	387	470
Silis dumanı (kg/m ³)	0	0	58
Su (kg/m ³)	190	174	146
Doğal kum (kg/m ³)	475	448	423
Kırma kum (kg/m ³)	714	673	636
Kırma taş 1 (kg/m ³)	669	630	596
Düz çelik tel (kg/m ³)	17,66	17,336	17,202
Kanca uçlu çelik tel (kg/m ³)	19,335	18,98	18,834
Naylon lif (kg/m ³)	1,478	1,451	1,44
Süperakışkanlaştırıcı (kg/m ³)	3,251	3,482	6,583
Hava boşluğu (%)	2,7	4,5	5,3
Su / bağlayıcı	0,7	0,45	0,25
Birim ağırlık (kg/m ³)	2,34	2,35	2,37
Çökme (cm)	10	12	11

3.8 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve 28. güne kadar 20°C ± 2°C’de kirece doygun su içinde bekletilmiştir. Beton numuneler üzerinde yapılan sertleşmiş beton deneyleri aşağıda verilmektedir.

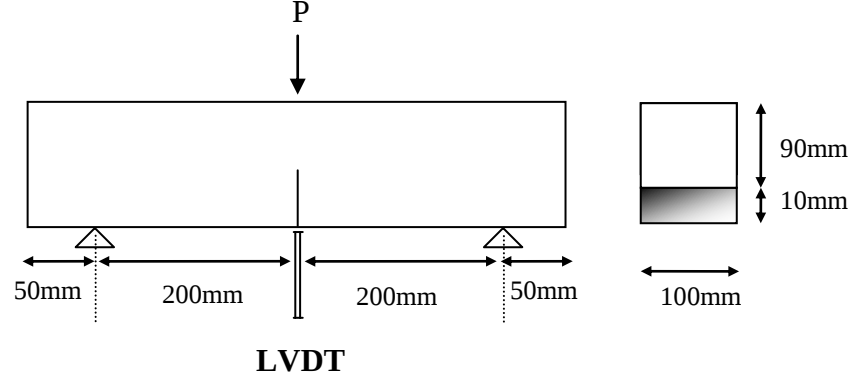
3.8.1 Silindir basınç deneyi

Silindir basınç deneyleri 150 mm çaplı, 300 mm yükseklikteki silindir numuneler üzerinde 28. günde gerçekleştirilmiştir. Deneyler 500 ton kapasiteli kapalı çevrimli deformasyon kontrollü basınç presi kullanılarak yapılmıştır. Çerçeve içersine yerleştirilen numunelerde yükleme hızı 0.1 mm/dak değerinde sabit tutulmuştur. Çerçevenin iki yanına numunenin boyundaki kısalmayı ölçen 2 adet LVDT yerleştirilmiş, buradan alınan deformasyon verilerinin ortalaması alınarak şekil değiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Boydaki değişimi ilk boya bölerek birim şekil değiştirme değerlerine geçilmiştir. Deney sırasında okunan yük değerlerini numunenin kesit alanına bölerek gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu sayede, her bir numune için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir.

Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, dayanıma karşı gelen gerilme değerinin %5'i ile %33'ü arasında kalan grafiğin eğiminden faydalanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçların ortalamaları Çizelge 3.13'te gösterilmiştir.

3.8.2 Üç noktalı eğilme deneyi ve kırılma enerjisinin belirlenmesi

Kırılma enerjisinin belirlenmesi için çentikli 100x100x500 mm'lik kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Numuneler elmas testere ile kesilerek 10 mm'lik bir çentik açılmış ve etkin kesit alanının 90x100 mm olması sağlanmıştır. Beton kiriş numunelere yük, maksimum kapasitesi 100 kN olan Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi ile uygulanmıştır. Yükleme hızı, naylon lifli numunelerde, 0,015 mm/dak., karma lifli numunelerde ise 2,5 mm'lik bir sehime kadar 0,05 mm/dak., 10 mm'lik sehime kadar ise 0,10 mm/dak.'da sabit tutulmuştur. Kirişin ortasına yerleştirilen 1 adet LVDT ile sehim ölçülmüş ve her bir kiriş numune için yük-açıklığın ortasındaki sehime eğrisi elde edilmiştir. Çentikli kiriş numune için eğilme deneyi düzeneği Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : Üç noktalı eğilme deney düzeneği.

Şekil 3.4’de gösterilmiş olan yük-sehim eğrisinin altındaki alan yardımıyla kırılma enerjisi RILEM 50-FMC’nin önerdiği denklem (3.1) ile bulunmuştur.

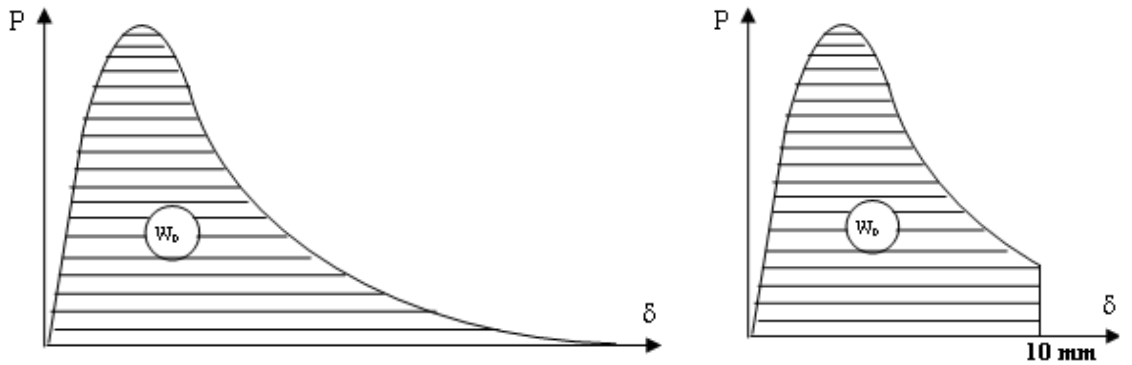
$$G_F = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (3.1)$$

Denklemde, W_o : Yük-sehim eğrisi altında kalan alanı (Nm), m : Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığını (kg), g : Yer çekimi ivmesini, δ_o : Kirişin göçme sırasındaki son sehim değerini (m), A_{lig} : Etkin kesit alanını (m^2) temsil etmektedir.

Numunelerin eğilme dayanımları ise (3.2) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{net} = (3PL) / 2BD^2 \quad (3.2)$$

Denklemde P : Kırılma yükünü (N), L : Mesnetler arası uzaklığı (mm), B : Numunenin kesit genişliğini (mm), D : Numune kesitinin yüksekliğini (mm) temsil etmektedir.



a) Naylon lifli ve yalın numuneler için

b) Hibrit numuneler için

Şekil 3.5 : Yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi.

3.8.3 Yarma-çekme deneyi

Üretilen yalın ve naylon lifli, çapı $d=150$ mm ve yüksekliği $h=60$ mm boyutundaki disk numuneler üzerinde yarma çekme deneyleri TS EN 12390-6'ya göre yapılmıştır. 28. günlerinde numuneler üzerinde, betonun dolaylı olarak çekme dayanımının belirlenmesi amacıyla yarma çekme deneyi yapılmaktadır. Yarma çekme deneyleri, numunelerin alt ve üst kenar yüzeylerine standart ahşap çubukların aynı ekseninde yerleştirilip basınç yükü uygulanması suretiyle yapılmıştır. Deney sonucunda disk numunelerin taşıyabildikleri en büyük yarma çekme yük değerleri belirlenmiştir. En büyük yük değerleri kullanılarak Denklem (3.3)'e göre numunelere ait yarma çekme dayanımları hesaplanmıştır.

$$f_{ct} = (2 \cdot P) / (\pi \cdot d \cdot l) \quad (3.3)$$

f_{ct} : Yarma-çekme dayanımını (MPa)

P: Kırılma yükünü (N)

L: Numunenin yükleme parçasına temas çizgisinin uzunluğunu (mm)

d: Numunenin seçilen en kesit ölçüsünü (mm)

3.8.4 Sertleşmiş numuneler üzerinde elde edilen sonuçlar

Sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçların ortalamaları Çizelge 3.13'te görülmektedir.

Çizelge 3.13 : Mekanik özellikler.

Karışım kodu	Silindir basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kırılma enerjisi (J/m ²)	Net eğilme dayanımı (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)
W25N0	83	42	106	6,61	5,95
W25N6	82	41	155	6,94	6,91
W25N15	83	39	178	6,68	6,99
W25N24	82	37	199	6,01	7,07
W25S25	70	37	7883	9,00	5,44
W45N0	50	30	120	3,90	4,32
W45N6	50	31	157	5,01	4,26
W45N15	55	33	178	5,57	4,21
W45N24	56	33	300	3,65	4,28
W45S25	56	35	5523	6,00	5,18
W70N0	34	26	65	3,54	3,34
W70N6	33	27	119	3,69	3,24
W70N15	33	26	186	4,08	3,41
W70N24	31	25	266	3,39	3,54
W70S25	33	29	4765	5,00	4,03

3.9 Sentetik lif ve çelik tel donatılı betonlar

Sentetik lif ve çelik tel kullanılarak üretilen beton karışımlarının mekanik davranışları da bu tez çalışması kapsamında incelenmiş ve değerlendirmesi yapılmıştır. Karışımlarda kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

3.9.1 Çimento

Kullanılan çimento özgül ağırlığı 3,14 g/cm³ olan CEM I 42.5 R çimentosudur.

3.9.2 Agregalar

Çalışmada üretilen karışımlarda kum, taş tozu, mıcır-no1 ve mıcır-no2 olmak üzere 4 tip agregaya kullanılmıştır. Beton bileşimlerinin tamamında agregaya granülometrisi sabit tutulmuştur. Agregaların fiziksel özellikleri ve karışım oranları Çizelge 3.14’te verilmiştir.

Çizelge 3.14 : Üretimde kullanılan agregaların özellikleri.

	Özgöl ağırlık	Karışım oranları
Kum	2.60 g/cm ³	%26
Taş tozu	2.70 g/cm ³	%23
Mıcır-no1	2.70 g/cm ³	%26
Mıcır-no2	2.70 g/cm ³	%25

3.9.3 Sentetik lif

Çalışmada ASTM C-1116 standartına uygun sentetik lifler kullanılmıştır. Fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.15’te verilmektedir.

Çizelge 3.15 : Sentetik liflerin özellikleri.

Uzunluk	54 mm
Ham madde	%100 Saf kopolimer PP/PE
Özgöl ağırlık	0,91 g/cm ³
Çekme dayanımı	550-750 N/mm ²
Elastisite modülü	4,7 Gpa
Fiber sayısı	220,000 parça/kg
Ergime noktası	162-168 °C
Yanma noktası	593 °C
Su emilimi	Sıfır
Asit / alkali direnci	Mükemmel

3.9.4 Kancalı uçlu çelik tel

Çalışmada kullanılan kancalı uçlu çelik teller Dramix 80/60 çelik tellerdir.

3.9.5 Kimyasal katkı

Kullanılan kimyasal beton katkısı priz geciktiren ve önemli oranda su azaltan bir süperakışkanlaştırıcıdır. Özgöl ağırlığı yaklaşık 1,165g/cm³ olan bu katkı maddesi beton karışımlarında farklı oranlarda kullanılmıştır.

3.9.6 Beton Karışımları ve Numune Kodları

Yapılan çalışmada lif içermeyen referans beton RB olarak, çelik lif içeren seriler ÇTDB olarak ve sentetik lif eklenerek üretilen seriler SLDB olarak kodlandırılmıştır. Üretilen serilerin numune kodları ve lif oranları Çizelge 3.16’da gösterilmektedir.

Çizelge 3.16 : Karışımların kodları, karışımlardaki sentetik ve çelik lif oranları.

Numune kodu	Sentetik lif (kg/m ³)	Kanca uçlu çelik tel (kg/m ³)
RB	-	-
ÇTDB	-	20
SLDB	3	-

3.9.7 Numune Boyutları ve Şekilleri

Referans beton için 4 adet 150*150*150 cm boyutlu küp ve 4 adet Ø15/30 cm olan silindir, lifli serilerden ise 4 adet 150*150*150 cm boyutlu küp ve 4 adet Ø15/30 cm olan silindir ve 3 adet 10*10*50 cm boyutlu prizmalar üretilmiştir.

3.9.8 Taze Beton Özellikleri

Üretilen betonların taze beton özellikleri Çizelge 3.17’de verilmiştir.

Çizelge 3.17 : Gerçek beton bileşimleri.

Kullanılan malzeme	RB	ÇTDB	SLDB
Çimento (kg/m ³)	299,75	301,51	302,72
Su (kg/m ³)	139,88	140,70	163,47
Kum (kg/m ³)	510,58	513,57	499,50
Taş tozu (kg/m ³)	447,63	450,25	437,94
Mıcır-No1 (kg/m ³)	506,58	509,55	496,47
Mıcır-No2 (kg/m ³)	486,60	489,45	476,29
Sentetik lif (kg/m ³)	-	-	3,027
Çelik tel (kg/ m ³)	-	20,10	-
Süperakışkanlaştırıcı (kg/m ³)	4,496	5,126	6,66
Hava boşluğu (%)	3	2,5	2
Su / çimento	0,47	0,47	0,54
Birim ağırlık (kg/m ³)	2,40	2,41	2,38
Çökme (cm)	19	16	15

3.9.9 Sertleşmiş numuneler üzerinde elde edilen sonuçlar

Sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçların ortalamaları Çizelge 3.18’de görülmektedir.

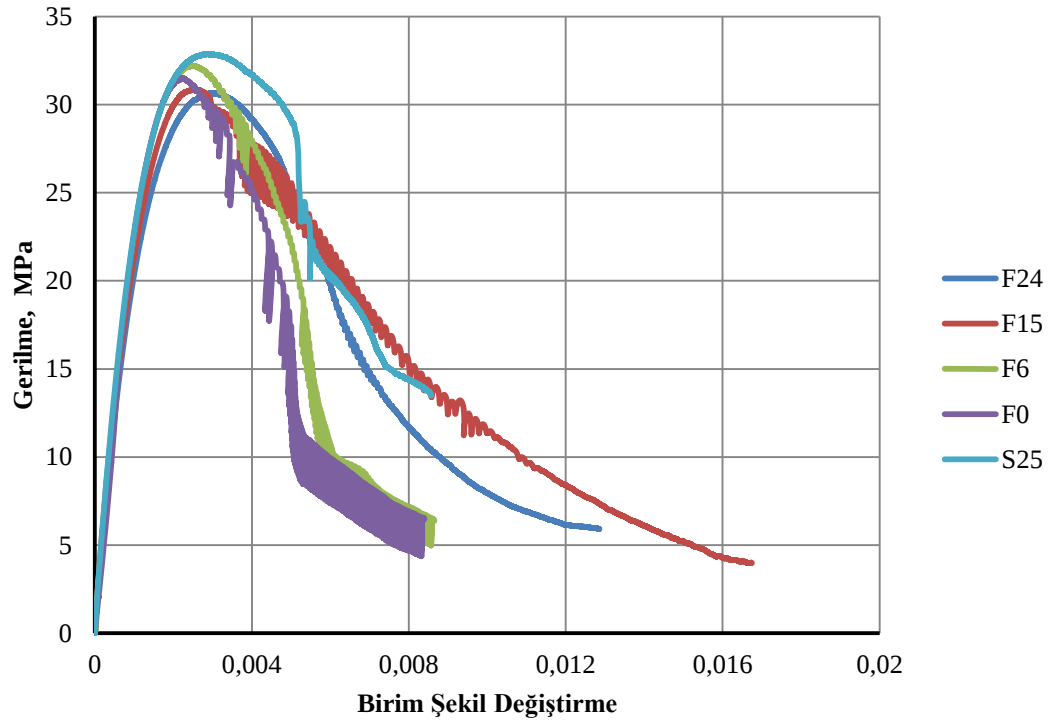
Çizelge 3.18 : Mekanik özellikler.

Karışım kodu	Silindir basınç dayanımı (MPa)	Küp basınç dayanımı (Mpa)	Elastisite modülü (GPa)	Kırılma enerjisi (Joule)	Net eğilme dayanımı (MPa)
RB	47	57	36	-	-
ÇTDB	49	57	34	2967	6,24
SLDB	45	59	34	1767	6

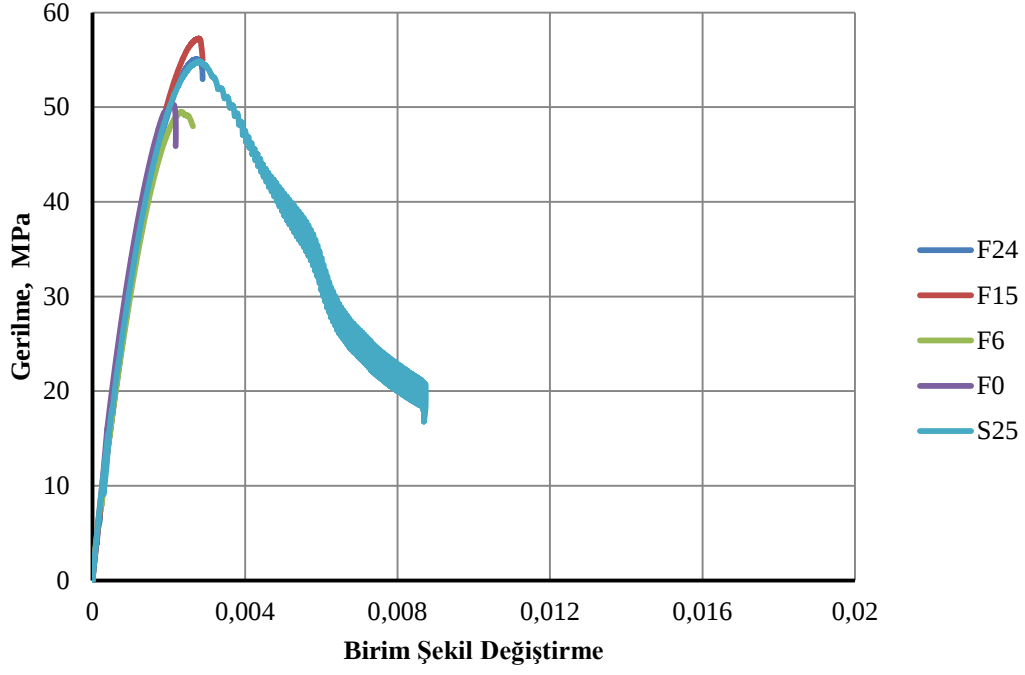
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELEME VE DEĞERLENDİRMESİ

4.1 Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

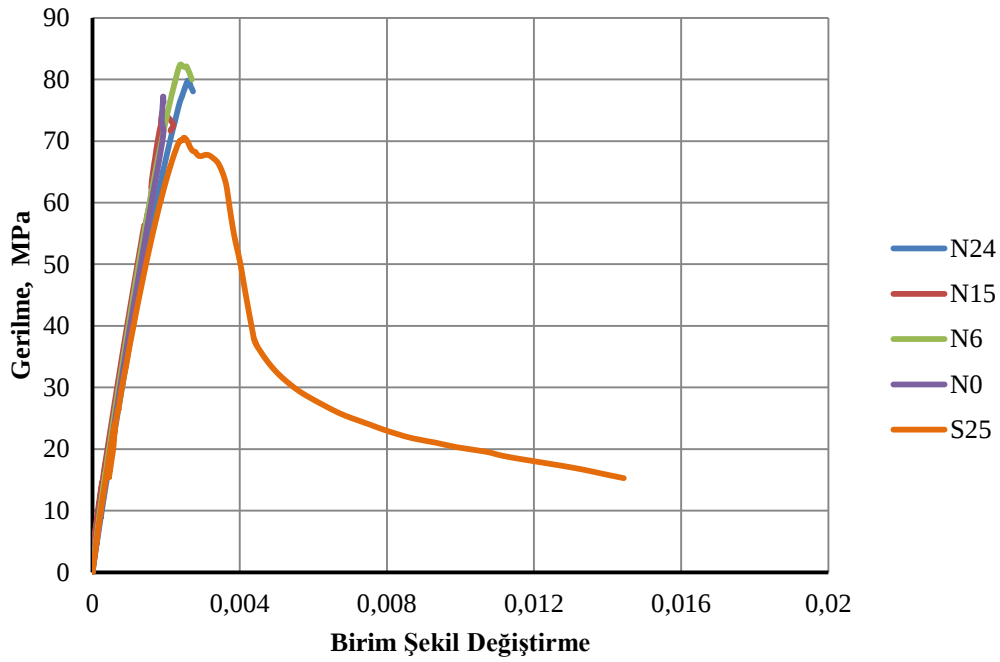
Silindir basınç deneylerini yapmak için şekil değiştirme kontrollü 500 ton kapasiteli basınç makinesi kullanılmış ve numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerin birbirleri ile ilişkisi Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.1 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi.



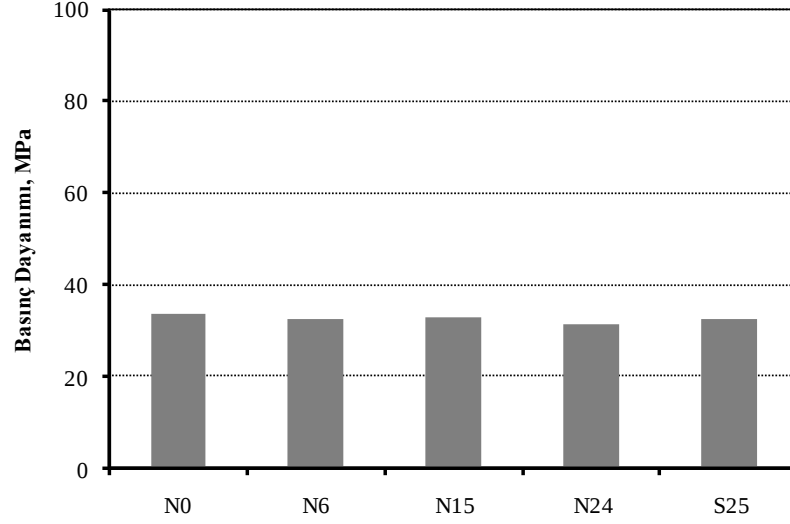
Şekil 4.2 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi.



Şekil 4.3 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi.

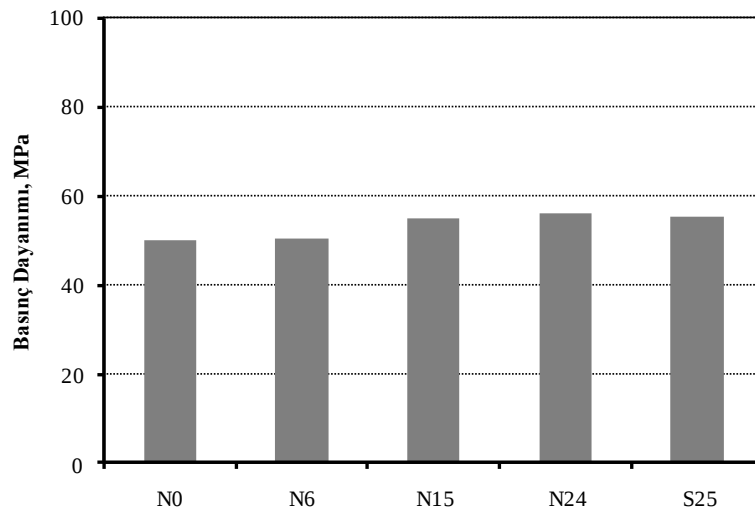
28. günde yapılan silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri her numune için Ek A'de verilmiştir. Bu değerlerin ortalaması Çizelge 3.13, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Şekil 4.4'e bakıldığında su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin ortalama basınç dayanımlarında naylon lif eklenmesinin veya karma lifli olarak üretim yapılmasının önemli bir etkisi olmamış, sonuçlar yaklaşık 33 MPa civarında bulunmuştur.



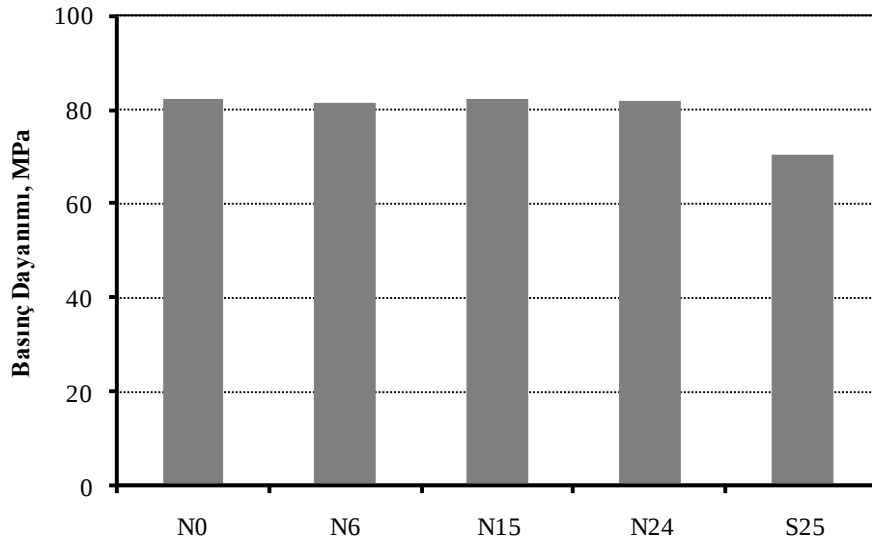
Şekil 4.4 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin silindir basınç deney değerleri.

Su/çimento oranı 0,45 olan serilerin sonuçlarına bakıldığında, Şekil 4.5'te görüldüğü gibi yalın ve 0,6 kg/m³ naylon lif içeren karışımların ortalama silindir basınç dayanımları 50 MPa iken diğer iki oranda naylon lif içeren numunelerin silindir basınç dayanımları bir miktar artmış ve yaklaşık olarak 55 MPa değerlerine gelmiştir. Naylon ve çelik lifin birlikte kullanıldığı karma lifli karışımlarda da ortalama silindir basınç dayanımı değişmemiş ve 55 MPa olmuştur.



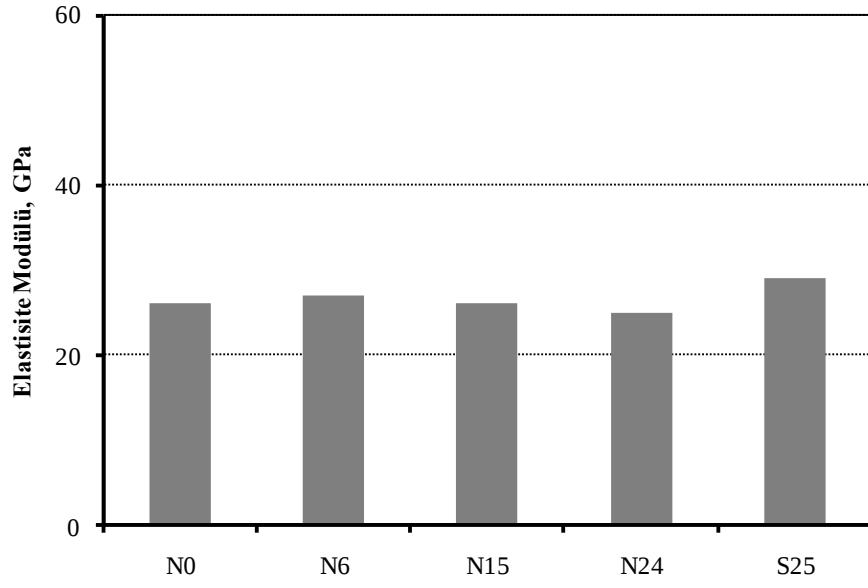
Şekil 4.5 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin silindir basınç deney değerleri.

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi, deney sonuçlarından elde edilen verilere göre su/bağlayıcı oranı 0,25 olan serideki yalın betonun ortalama silindir basınç dayanımı 83 MPa iken $2,4 \text{ kg/m}^3$, $1,5 \text{ kg/m}^3$ ve $0,6 \text{ kg/m}^3$ naylon lif içerikli karışımların dayanımları da hemen hemen aynı kalmış ve sırası ile 82MPa, 83 MPa ve 82MPa olarak bulunmuştur. Karma lifli numunelerde ise ortalama basınç dayanımı bir miktar azalmış, 70 MPa olmuştur.

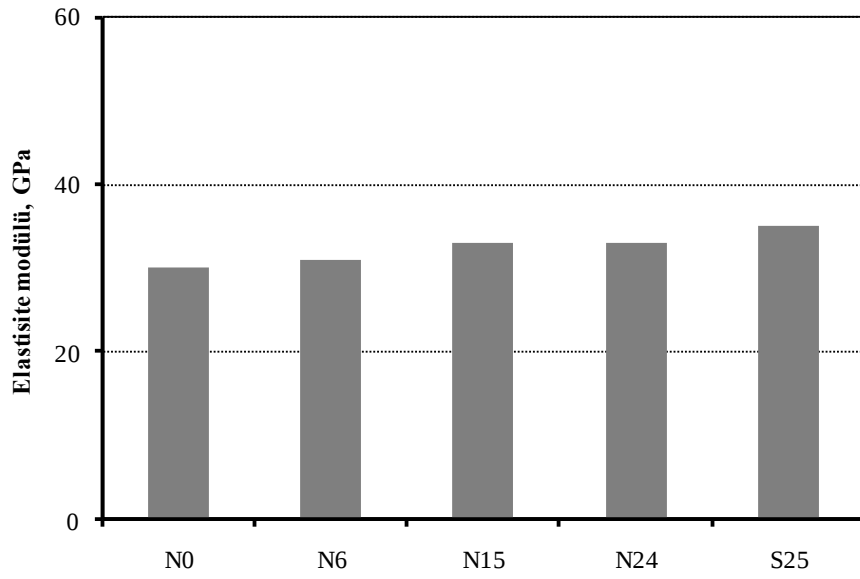


Şekil 4.6 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin silindir basınç deney değerleri.

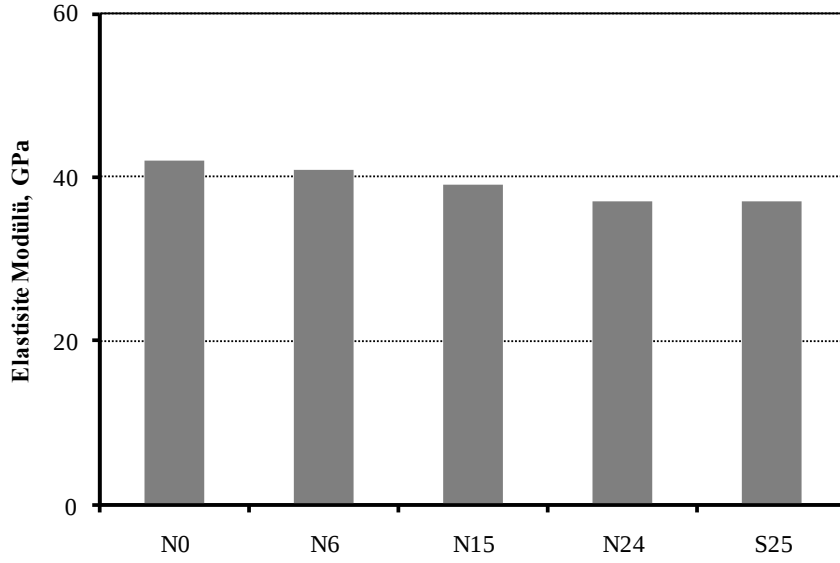
Silindir basınç deneylerinden elde edilen elastisite modülü değerlerine göre, betona lif katılmasının elastisite modülüne belirli bir etkisi olmamıştır. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görüldüğü gibi üç farklı su/bağlayıcı oranına sahip karışımların elastisite modülleri kendi içlerinde pratik anlamda değişmemiştir.



Şekil 4.7 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin elastisite modülü değerleri.



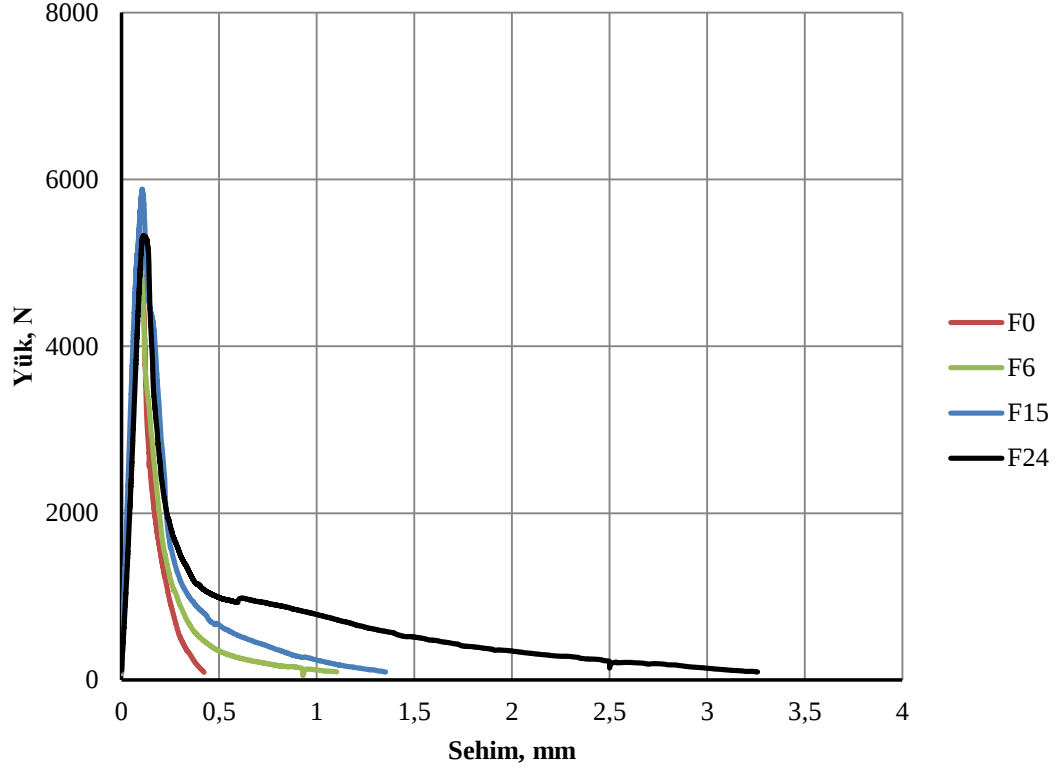
Şekil 4.8 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin elastisite modülü değerleri.



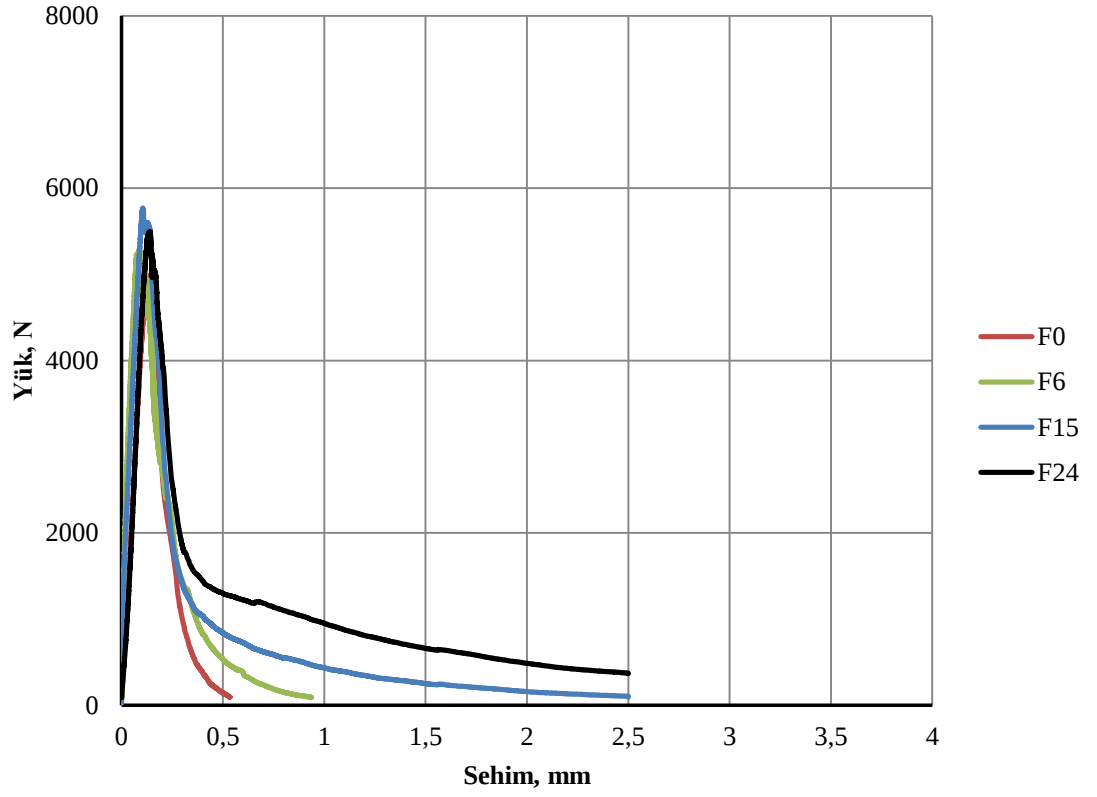
Şekil 4.9 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin elastisite modülü değerleri.

4.2 Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

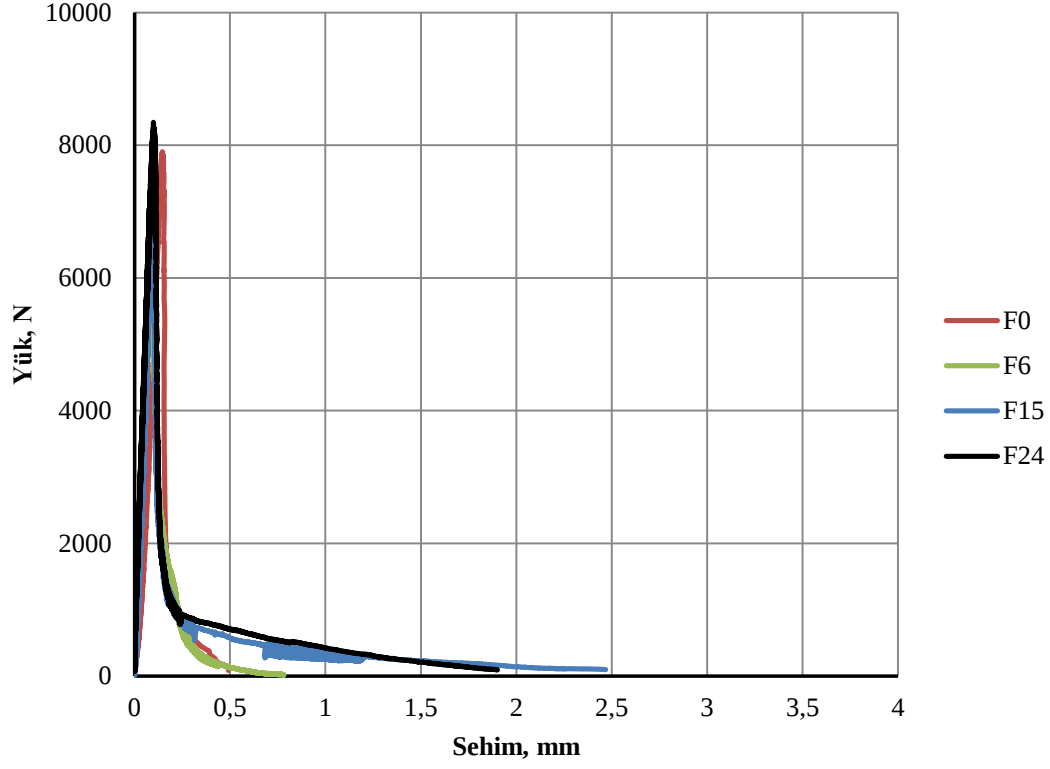
Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre betona farklı oranlarda naylon lif eklenmesi kırılma enerjisi arttırmış, net eğilme dayanımında önemli bir katkı sağlamamıştır. Beton gevrek bir malzeme olduğundan, naylon lif katılması betonun maksimum yük sonrası davranışını iyileştirerek daha sünek bir yapı oluşmasını sağlar. Malzeme tarafından yutulan enerjinin artması ile ani göçme kırılmaları engellenir. Deneylerden elde edilen yük sehim eğrileri su/bağlayıcı oranına göre Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12’de görülmektedir. Bu deneyler sonucunda elde edilen grafikler ve değerler her numune için Ek B’de verilmiştir.



Şekil 4.10 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin yük-sehim ilişkisi.

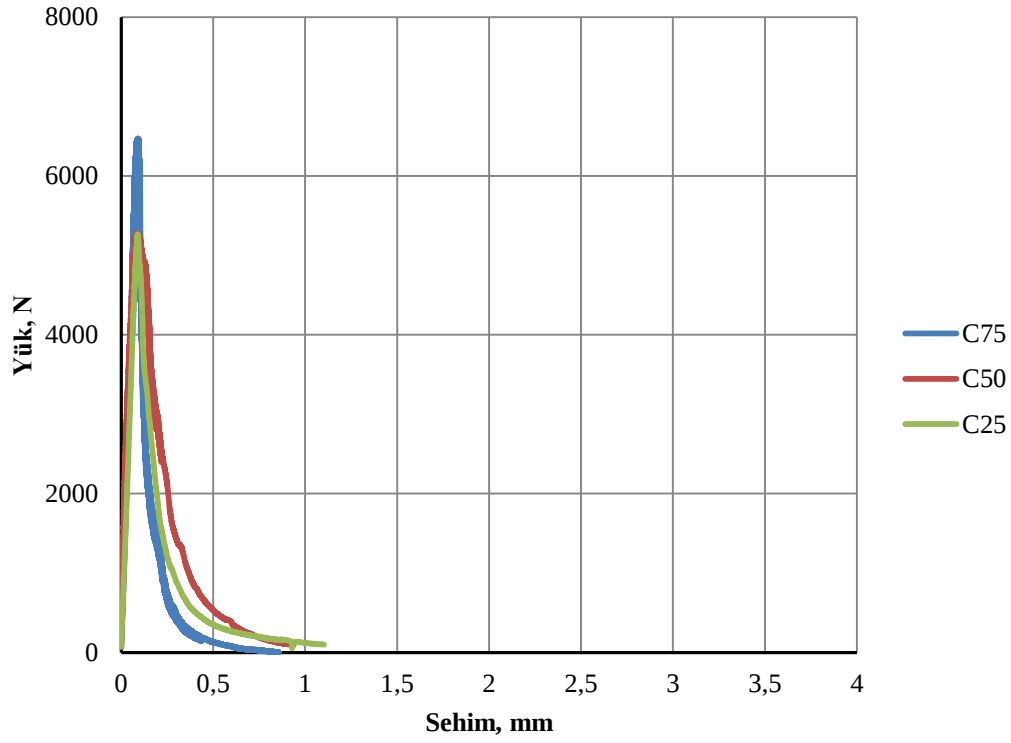


Şekil 4.11 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin yük-sehim ilişkisi.

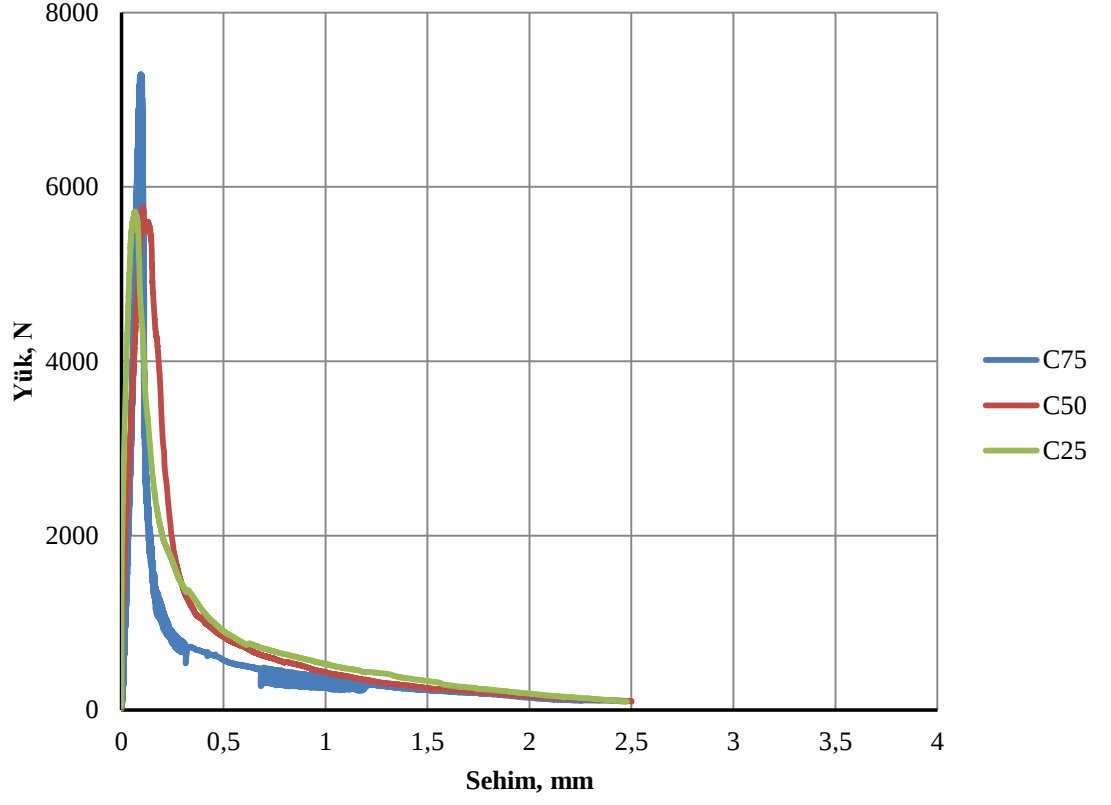


Şekil 4.12 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin yük-sehim ilişkisi.

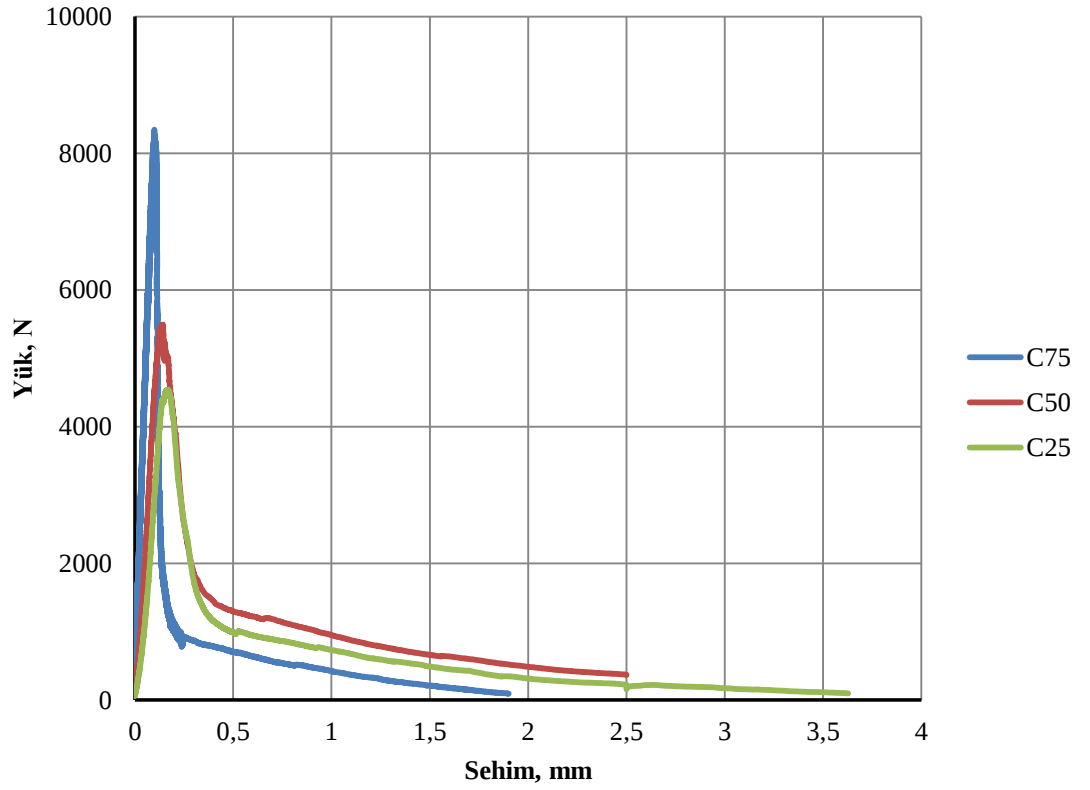
Numunelerin üç farklı naylon lif miktarına göre yük-sehim eğrileri Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 : Naylon lif içeriği 0,6 kg/m³ numunelerin yük-sehim ilişkisi.

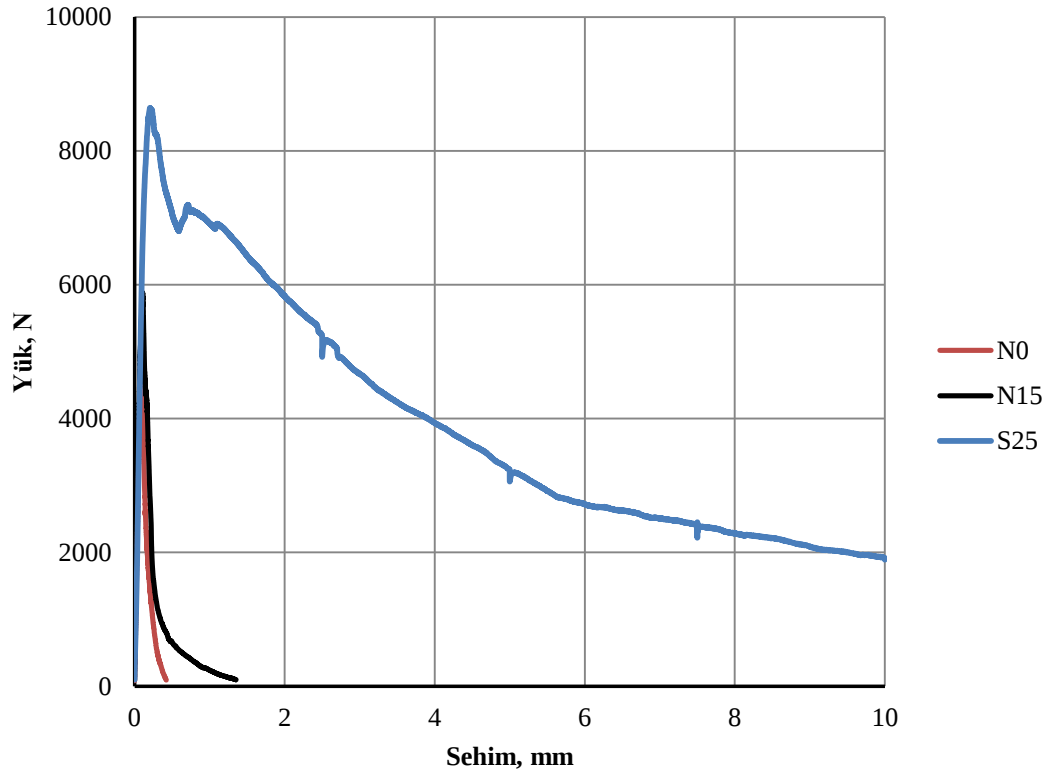


Şekil 4.14 : Nylon lif içeriği 1,5 kg/m³ numunelerin yük-sehim ilişkisi.

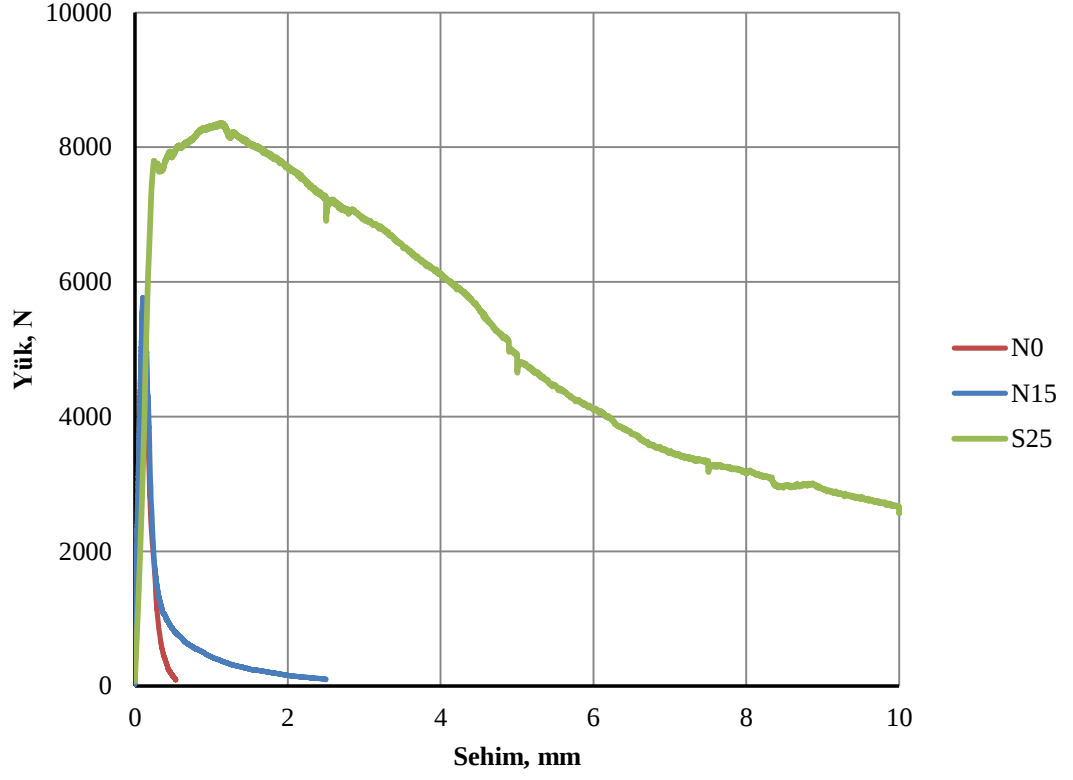


Şekil 4.15 : Nylon lif içeriği 2,4 kg/m³ numunelerin yük-sehim ilişkisi.

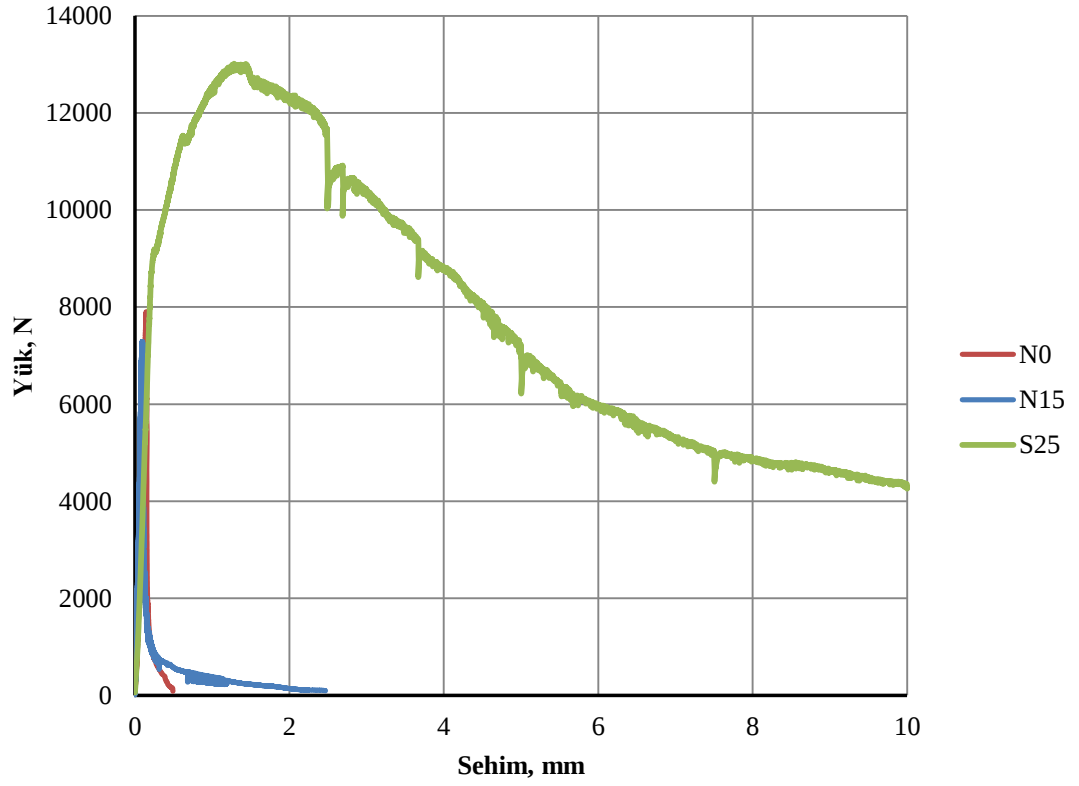
Karma lifli numunelerin su/bağlayıcı oranına göre yük-sehim eğrileri ise Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.16 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan hibrit numunelerin yük-sehim ilişkisi.



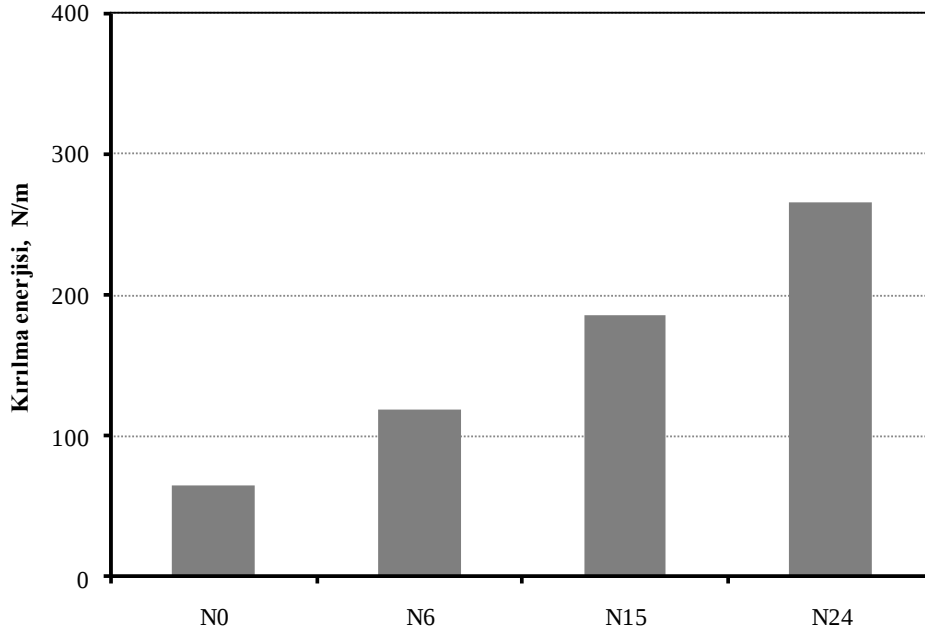
Şekil 4.17 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan karma lifli numunelerin yük-sehim ilişkisi.



Şekil 4.18 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan karma lifli numunelerin yük-sehim ilişkisi.

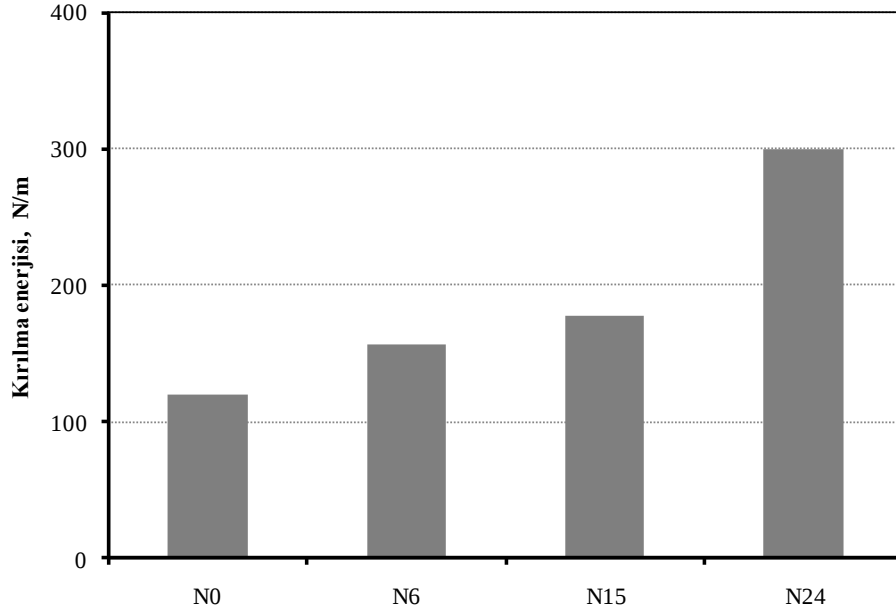
Deneyler sonucunda hesaplanan kırılma enerjilerinden elde edilen ortalamalar Çizelge 3.13, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

Sonuçlara göre karışımların kırılma enerjileri kıyaslandığında lif miktarına göre en fazla artış su/bağlayıcı oranı 0,70 olan serilerde olmuştur. Yalın karışım olan N0’da 65 N/m olan kırılma enerjisi N6 karışımında yaklaşık 2 kat, N15 karışımında 3 kat, N24 karışımında ise 4 kat artarak sırası ile 119 N/m, 200 N/m ve 266 N/m olmuştur.



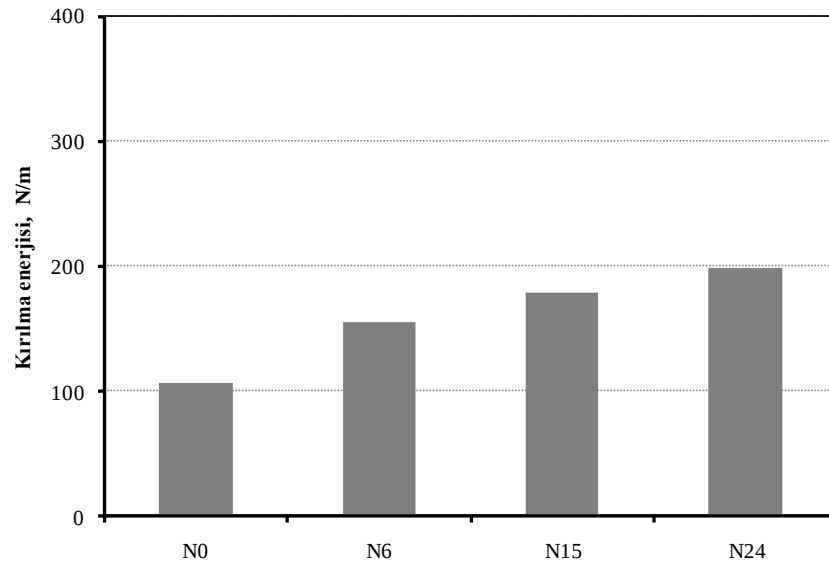
Şekil 4.19 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri.

Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan karışımların yalın betonu olan N0 karışımının kırılma enerjisi 120 N/m olarak bulunmuştur. 0,6 kg/m³ naylon lif içeren N6 karışımı da kırılma enerjisi yaklaşık olarak aynı kalmış ve 123 N/m bulunmuştur. N15 karışımında yaklaşık olarak 1,33 kat gibi düşük bir miktarda artış olmuş ve 159 N/m bulunmuştur. N24 karışımında ise yaklaşık olarak 2,5 kat artmış ve 299 N/m olarak bulunmuştur.



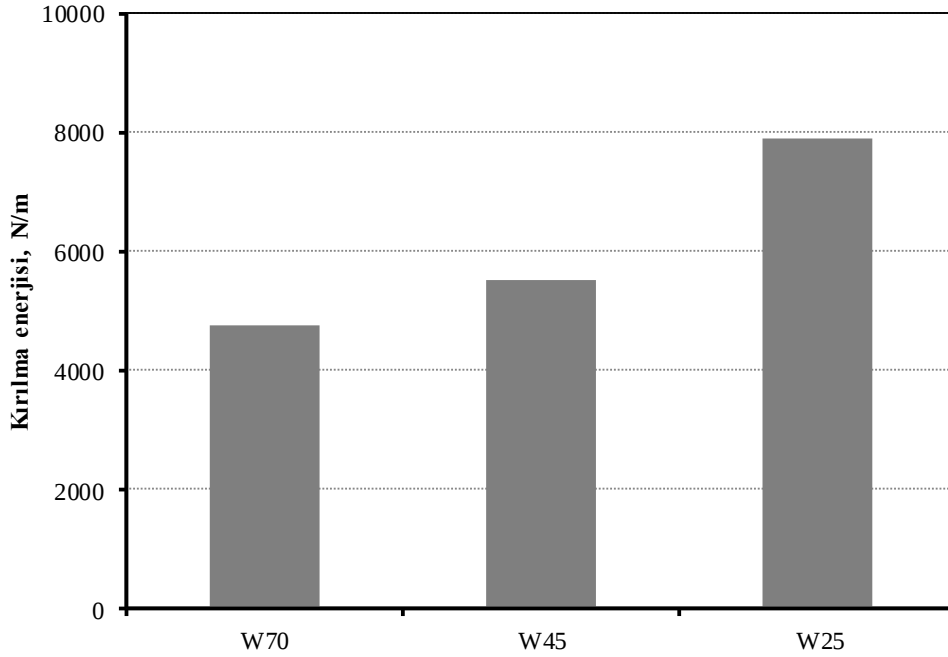
Şekil 4.20 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri.

Şekil 4.21’den de görüldüğü gibi su/bağlayıcı oranı 0,25 olan karışımlarda yalın beton (N0) karışımında kırılma enerjisi 106 N/m iken, $0,6 \text{ kg/m}^3$ naylon lif içeren N6 karışımında yalın betona kıyasla yaklaşık olarak 1,5 kat artış olmuş ve 155 N/m değerine erişmiştir. Lif içeriği $1,5 \text{ kg/m}^3$ ve $2,4 \text{ kg/m}^3$ naylon lif içerikli N15 ve N24 karışımlarında ise kırılma enerjisinin sırası ile yaklaşık 1,75 ve 2,0 kat arttığı görülmüş ve sırasıyla 178 N/m ve 199 N/m değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.21 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri.

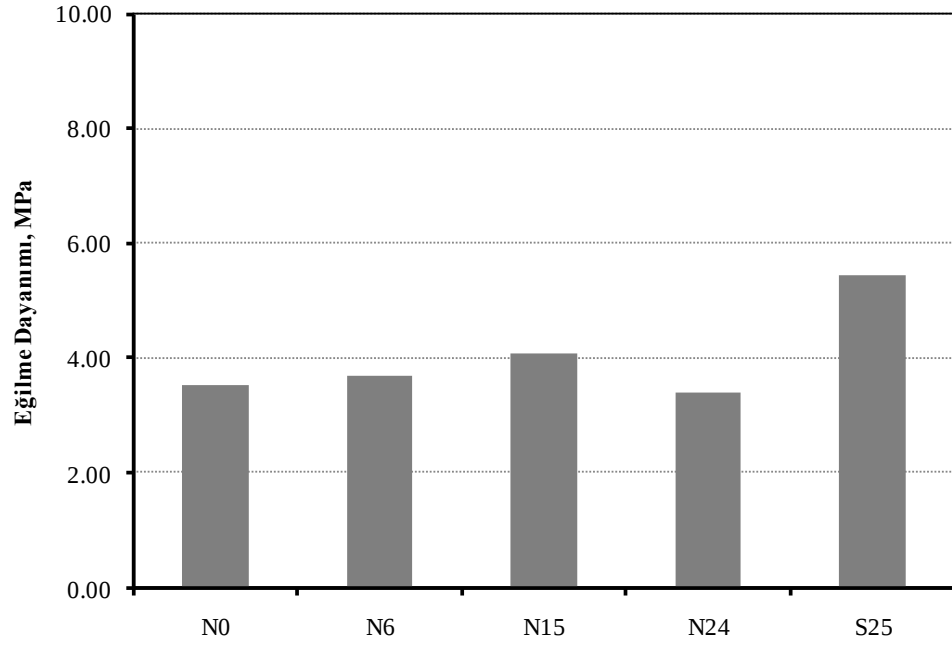
Şekil 4.22'ye bakıldığında naylon liflerle çelik liflerin birlikte kullanılarak üretildiği numunelerde kırılma enerjileri su/bağlayıcı oranının azalması ile artmıştır. Naylon lifli karışımlarla kıyaslandığında ise karma lif içeren numunelerin kırılma enerjilerinde önemli ölçüde artış görülmektedir.



Şekil 4.22 : Naylon ve çelik lifin birlikte kullanılması durumunda kırılma enerjisi değerleri.

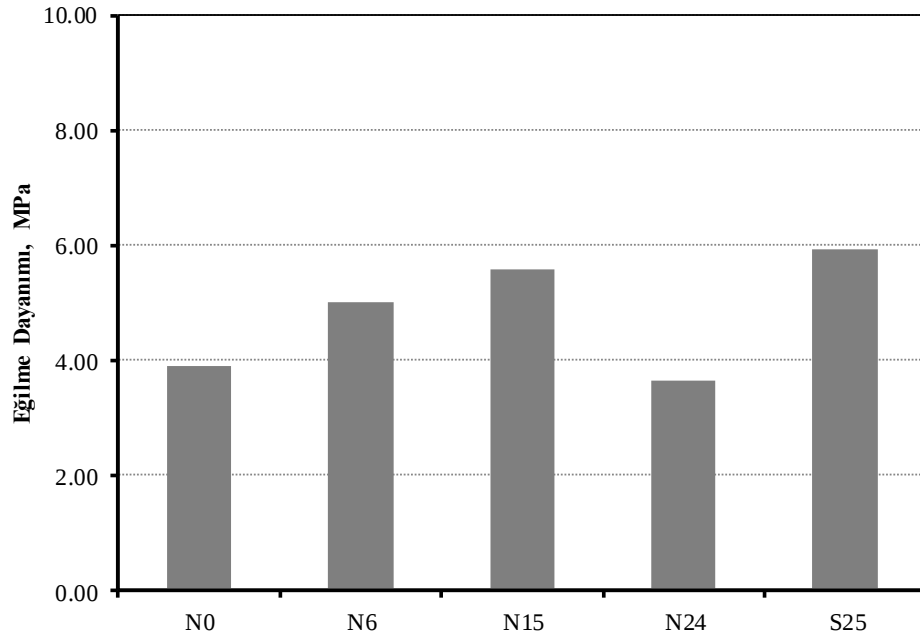
Karışımların net eğilme dayanımları 3 noktalı eğilme deneyleri sonucunda elde edilen maksimum yük değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerin ortalamaları Çizelge 3.13, Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te verilmiştir.

Şekil 4.23'e bakıldığında su/bağlayıcı oranı 0,70 olan naylon lifli karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı N15 karışımında elde edilmiş ve 4,08 MPa bulunmuştur. N6 ve N0 karışımlarının sonuçları yaklaşık olarak aynıdır. N24 karışımında en düşük değer elde edilmiş ve 3,39 MPa bulunmuştur. Karma lifli numunelerin eğilme dayanımı ise naylon lifli karışımlara göre daha yüksek olup 5,00 MPa olarak bulunmuştur.



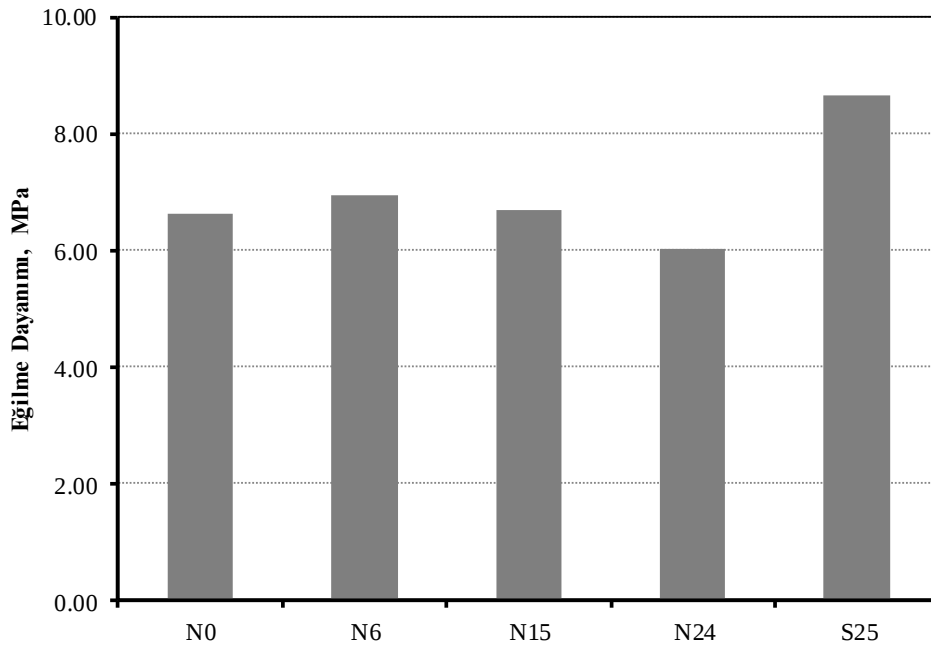
Şekil 4.23 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin eğilme dayanımı değerleri.

Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan naylon lifli karışımlarda N6 ve N15 kodlu numunelerde lif miktarı arttıkça eğilme dayanımları artmıştır. N24 numunelerde ise eğilme dayanımı 3,65 MPa değerine düşmüştür. Karma lifli numunelerde ise beklendiği gibi eğilme dayanımı daha yüksek olmuş ve 6,00 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.24 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin eğilme dayanımı değerleri.

Şekil 4.25'ten de görüldüğü gibi su/bağlayıcı oranı 0,25 olan serinin yalın betonunda eğilme dayanımı 6,61 MPa olarak bulunmuştur. N6 ve N15 karışımlarının da eğilme dayanımı çok fazla değişmemiş, sırasıyla 6,94 MPa ve 7,74 MPa değerleri elde edilmiştir. N24 karışımında ise eğilme dayanımı bir miktar azalmış 6,01 MPa değerine düşmüştür. Naylon ve çelik lifin birlikte kullanıldığı numunelerde ise yine eğilme dayanımı en yüksek olmuş ve 9,00 MPa değeri elde edilmiştir.

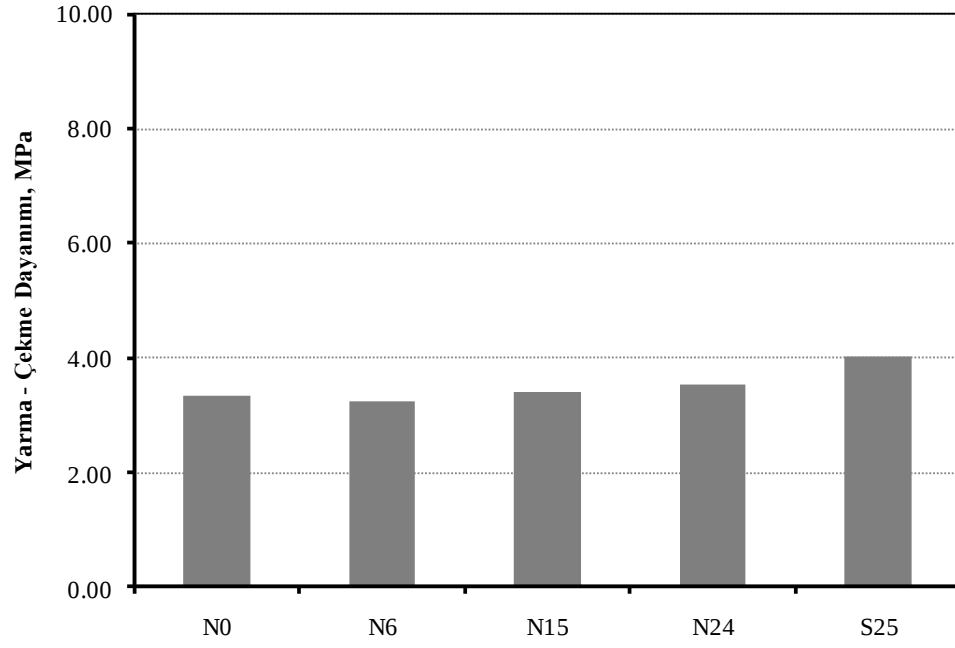


Şekil 4.25 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin eğilme dayanımı değerleri.

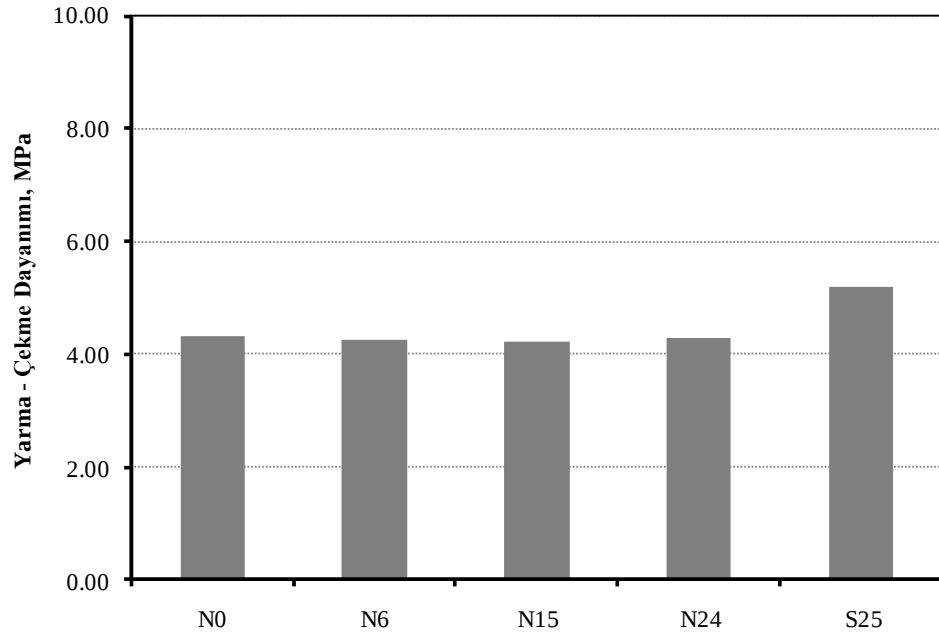
4.3 Yarma-Çekme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Yarma-çekme deneyinden elde edilen sonuçların ortalaması Çizelge 3.13, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir. Bütün numunelere ait sonuçlar ise Ek C'de sunulmuştur.

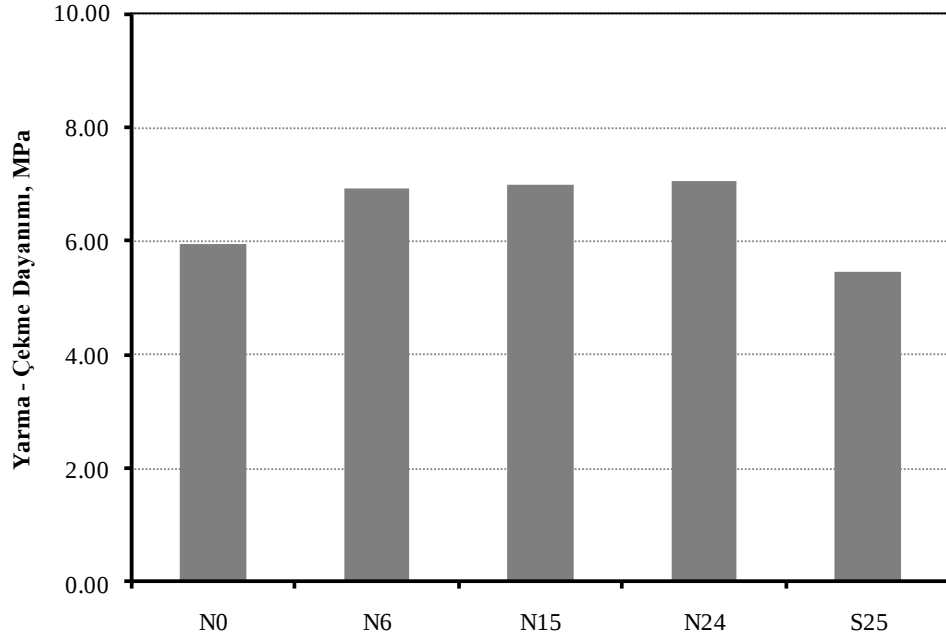
Bütün serilerin yarma-çekme dayanımlarına bakıldığında, betonda naylon lifin veya naylon lif ile çelik lifin birlikte kullanmasının betonun çekme dayanıma önemli ölçüde katkı sağlamadığı ve her seriden kendi içinde yaklaşık değerler elde edildiği görülmüştür.



Şekil 4.26 : Su/bağlayıcı oranı 0,70 olan numunelerin yarma-çekme dayanımı değerleri.



Şekil 4.27 : Su/bağlayıcı oranı 0,45 olan numunelerin yarma-çekme dayanımı değerleri.

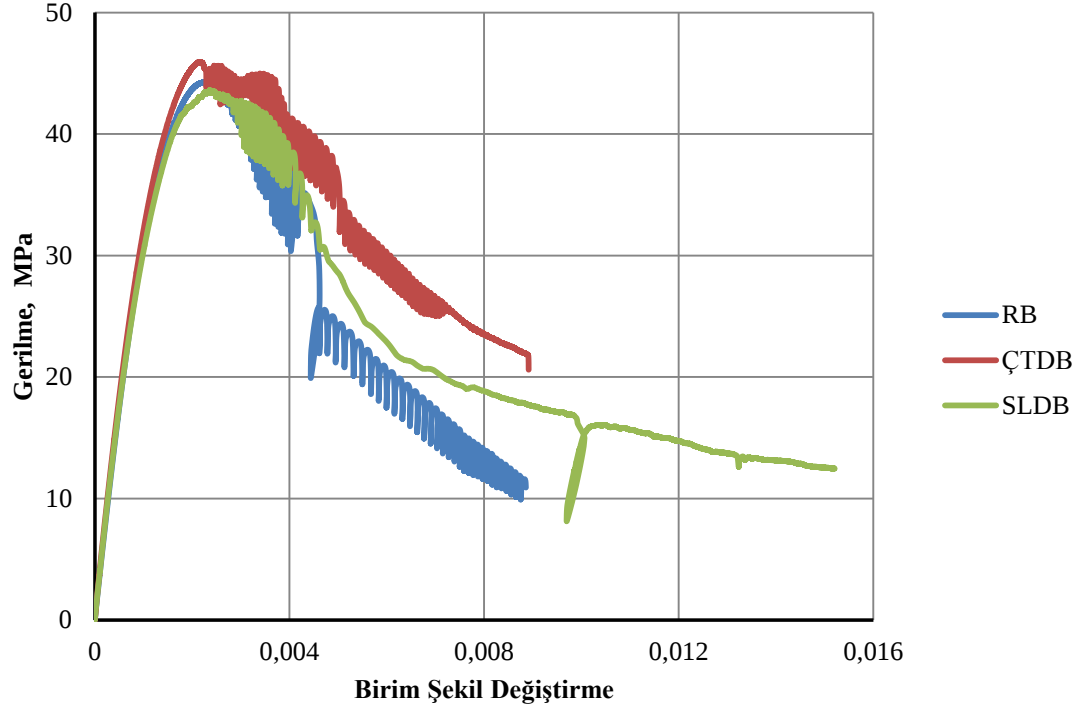


Şekil 4.28 : Su/bağlayıcı oranı 0,25 olan numunelerin yarma-çekme dayanımı değerleri.

4.4 Sentetik Lif ve Çelik Tel Donatılı Betonların Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.4.1 Silindir basınç deneyinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

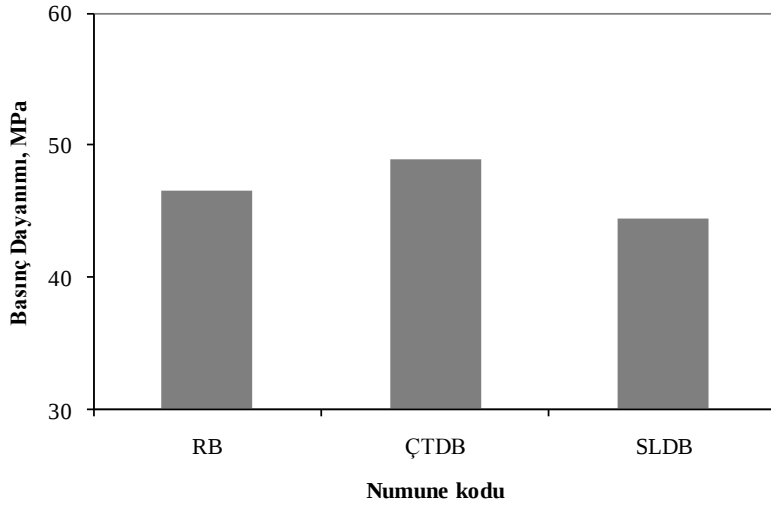
Silindir basınç deneylerini yapmak için şekil değiştirme kontrollü 500 ton kapasiteli INSTRON marka kapalı çevrimli basınç makinesi kullanılmış ve numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler toplu halde Şekil 4.29’da verilmiştir. Bütün numunelere ait sonuçlar ise Ek D’de sunulmuştur.



Şekil 4.29 : Gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi.

28. günde yapılan silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin ortalaması Çizelge 3.18 ve Şekil 4.29’da gösterilmiştir.

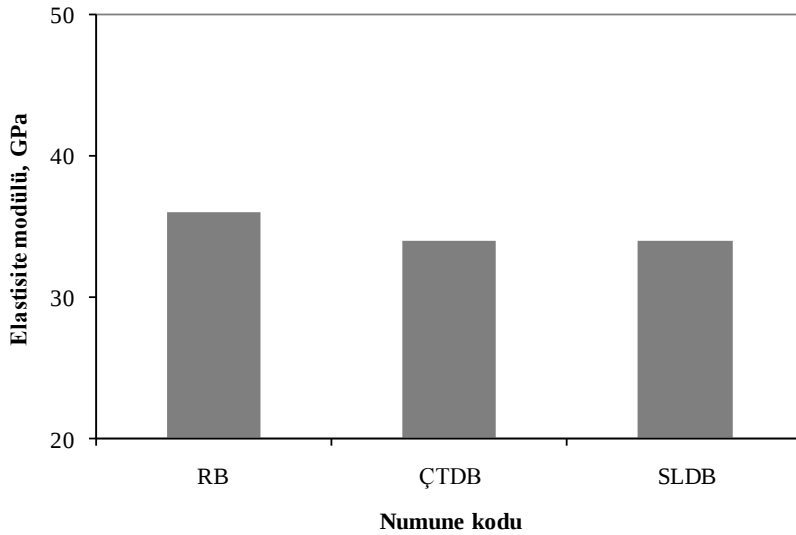
Şekil 4.29 incelendiğinde numunelerin ortalama basınç dayanımlarında sentetik lif eklenmesinin veya çelik telli olarak üretim yapılmasının önemli bir etkisi olmamış, sonuçlar yaklaşık 47 MPa civarında bulunmuştur. Ancak, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin inen kolu çelik tel donatılı betonlarda daha az eğimli, diğer bir deyişle daha sünek bir davranış sergilemiştir. ÇTDL’nu sentetik lifli beton izlemektedir. Aynı şekilden görüldüğü üzere referans betonu gevrek davranış göstermiştir.



Şekil 4.30 : Silindir basınç deneyi sonuçları.

Şekil 4.30’da görüldüğü gibi referans betonun silindir basınç dayanımı 47 MPa iken, ÇTDB serilerin 49 MPa, SLDB’nun ise 45 MPa olmuştur.

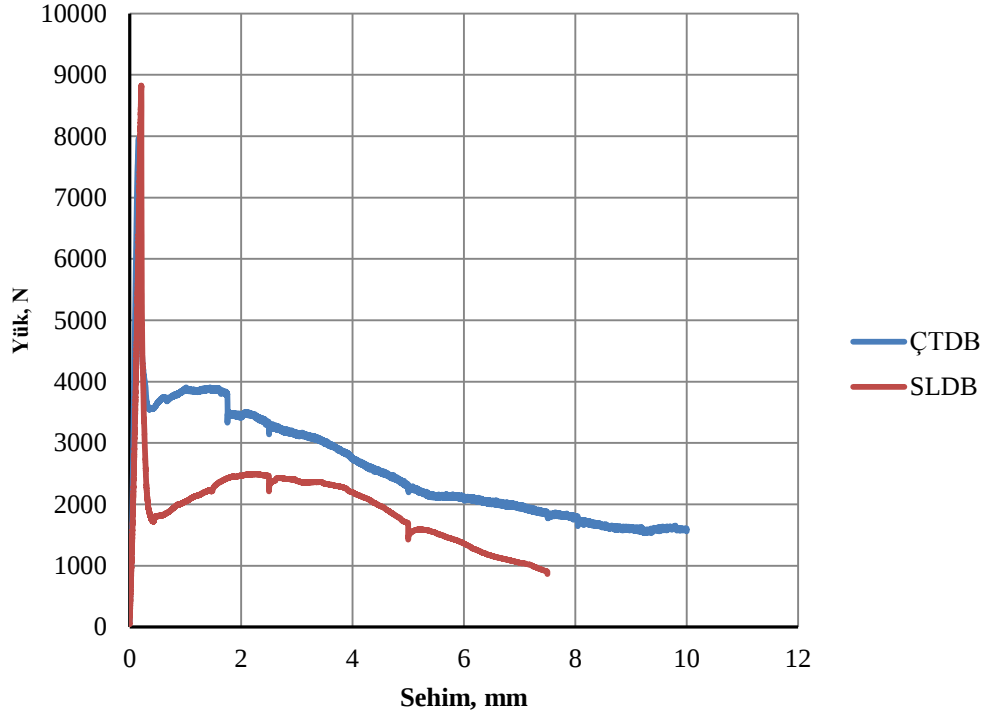
Silindir basınç deneylerinden elde edilen elastisite modülü değerlerine göre, betona lif katılmasının elastisite modülüne belirli bir etkisi olmamıştır. Şekil 4.31’de görüldüğü gibi karışımların elastisite modülleri pratik anlamda değişmemiştir.



Şekil 4.31 : Elastisite modülü değerleri.

4.4.2 Üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

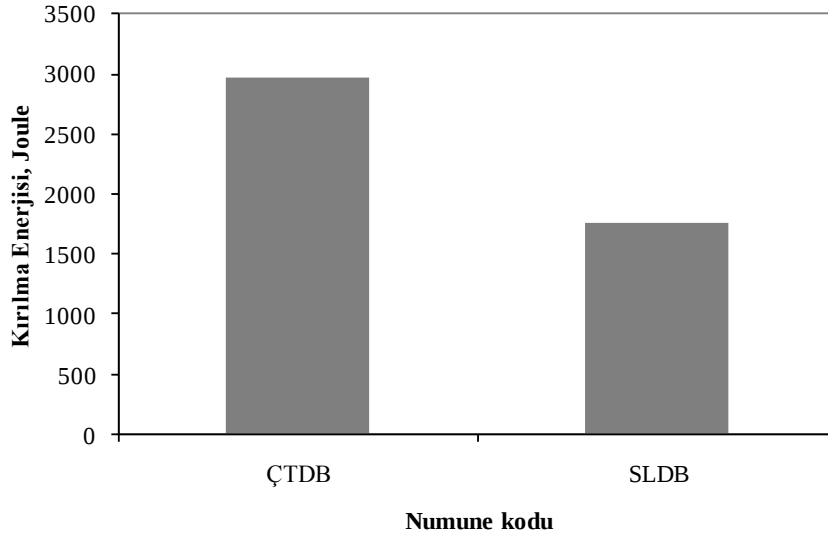
Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre betona sentetik lif eklenmesi kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımını arttırmaktadır. Sentetik lifler maksimum yük sonrası davranışını iyileştirerek daha sünek bir yapı oluşmasını sağlar. Deneylerden elde edilen yük sehim eğrileri Şekil 4.32’de görülmektedir.



Şekil 4.32 : Yük-sehim ilişkisi.

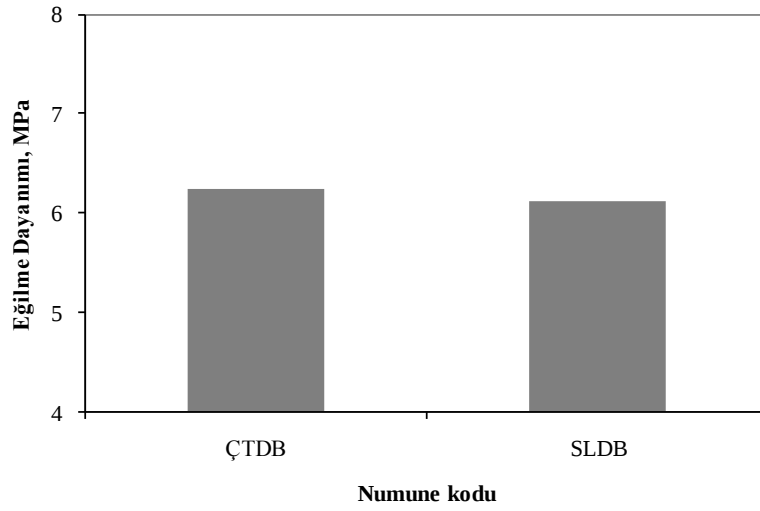
Deneyler sonucunda hesaplanan kırılma enerjilerinden elde edilen ortalamalar Çizelge 3.18 ve Şekil 4.32’de gösterilmiştir.

Sonuçlara göre karışımların kırılma enerjileri kıyaslandığında ÇTDB’nun özgül kırılma enerjisi SLDB’nunkinden yaklaşık 1,5 kat daha fazladır. Ancak, SLDB 7,5mm’ye deformasyon yapabilmiştir. Betonun tokluğu ve sünekliği önemli ölçüde artmıştır. Kırılma enerjisi sonuçları Şekil 4.33’te verilmiştir.



Şekil 4.33 : Kırılma enerjisi sonuçları.

Eğilme dayanımları kıyaslandığında ÇTDB ve SLDB'nun eğilme dayanımları yaklaşık aynıdır. sentetik lifli beton çelik tel kullanılan betona yakın bir davranış sergilemiştir.



Şekil 4.34 : Eğilme dayanımı sonuçları.

5. DENEY SONUÇLARININ MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

5.1 Optimizasyonun Amacı ve Kapsamı

Optimizasyonun amacı;

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

5.2 Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY)

Mühendisler genellikle optimum sonuç veren tepkilerin veri giriş parametrelerinin değerlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemde, tepkinin modellenmesi ve analiz problemlerinde etkili olan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin ortak kullanılması ile tepkinin yüzeyi elde edilmektedir. TYT, tepki üzerinde tekli ve kombinasyon halinde faktörlerin etkilerini de tanımlamaktadır. Bu yöntem, faktörlerin etkilerinin analiz edilmesinin yanında bir matematiksel model de üretmektedir. Bu matematiksel model, optimizasyonda amaç matematiksel veya sayısal yaklaşımlar kullanılarak optimize edilebilmektedir. Matematiksel modelin grafiksel gösterimi, TYT’ni ortaya koymaktadır. Tepki ve faktörler arasındaki genel bağıntı Denklem (5.1)’de verilmektedir.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + e \quad (5.1)$$

Y : Tepki

f : Tepkinin bilinmeyen fonksiyonu

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

k : Faktör sayısı

e : İstatistiksel hata

Tepki yüzey yönteminde modeller sadece polinom formu ile sınırlı olmasa bile basitliğinden dolayı genellikle bu form kullanılmaktadır. Kuadratik polinom durumu

için tepki yüzeyi Denklem (5.2)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (5.2)$$

Burada k, tasarım değişkenlerinin sayısını göstermektedir. İki değişken durumunda tepki yüzeyi Denklem (5.3)'teki gibi tanımlanmaktadır.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2 \quad (5.3)$$

$X_3=X_1^2$, $X_4=X_2^2$, $X_5=X_1 X_2$ ile yer değiştirilmesiyle Denklem (5.4)'te görüldüğü gibi lineer regresyon modeline dönüşmektedir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 \quad (5.4)$$

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

TYT kullanılarak bir optimizasyon çalışmasını üç aşamada ayırmak mümkündür.

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

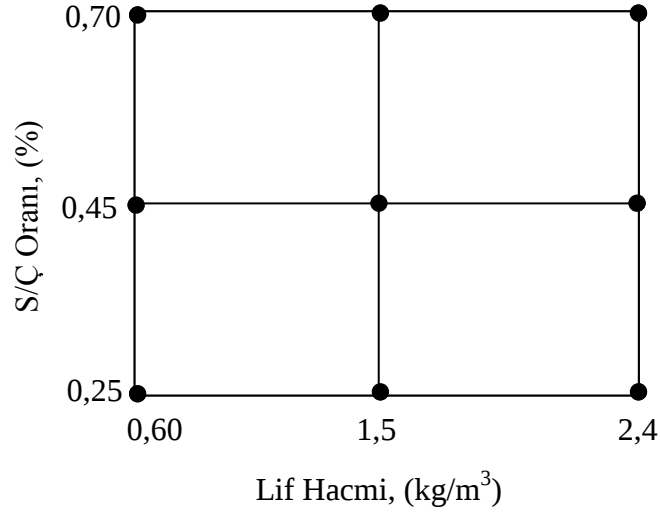
Tasarım metodu seçilmesinden sonra model denklemi tanımlanmakta ve model denkleminin katsayıları regresyon metotları kullanılarak belirlenmektedir. Regresyon modelinin genel gösterimi Denklem (5.5)'te ve matris gösterimi Denklem (5.6)'da verilmektedir.

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (5.5)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & x_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Yukarıda verilen denklem sistemi çoklu regresyon tekniği olan en küçük kareler metodu kullanılarak çözülmektedir [37].

Deneysel çalışmada seçilen bağımsız değişkenlerin (Su/çimento-bağlayıcı oranı ve lif hacmi) üç farklı seviyedeki değerlerinin bağımlı değişkenler (mekanik özellikler) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu seçilen değişkenlere ve değişkenlerin seviyelere bağlı olarak Üç Seviyeli Faktöriyel Tasarım Yöntemi kullanılmıştır. Buna göre üç seviyeli-iki faktörlü tasarıma ait deney (veri) noktaları Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Deney veri noktaları (9 adet).

Öncelikle Şekil 5.1’de gösterilen 9 adet deney noktalarında belirlenen değerler (deney sonuçları) kullanılarak faktörlere (bağımsız değişkenler) bağlı olarak, tepkileri (bağımlı değişkenler) veren modeller (denklemler) belirlenmiştir. Her bir tepki için tepki modelinin belirlenmesinde kullanılan deney veri noktalarındaki değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Naylon lifli karışımlara ait değişkenler ve deney noktaları.

Faktörler		Tepkiler					
S/Ç (S/B) Oranı	Lif Hacmi V_f , kg/m ³	Silindir Basınç Dayanımı f_s , MPa	Elastisite Modülü E, GPa	Yarma Çekme Dayanımı f_y , MPa	Özgül Kırılma Enerjisi G_f , J/m ²	Net Eğilme Dayanımı f_n , MPa	Karışım Maliyeti br ^a
0,25	0,6	82	41	6,91	155	6,94	1,43
0,25	1,5	83	39	6,99	178	6,68	1,47
0,25	2,4	82	37	7,07	199	6,01	1,49
0,45	0,6	50	31	4,26	157	5,01	1,05
0,45	1,5	55	33	4,21	178	5,57	1,08
0,45	2,4	56	33	4,28	300	3,65	1,12
0,70	0,6	33	27	3,24	119	3,69	1,00
0,70	1,5	33	26	3,41	186	4,08	1,01
0,70	2,4	31	25	3,54	266	3,39	1,06

^a Verilen birim fiyatlara göre belirlenen en düşük karışımın maliyeti esas alınarak hesaplanmıştır.

5.3 Çok Amaçlı Optimizasyon

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

Çok amaçlı problemlerin çözümünde, her bir tepki için kontur çizgisi, sınırlandırılmış optimizasyon problemleri ve arzu edirlilik yöntemi gibi pek çok istatistiksel teknik kullanılmaktadır. Arzu edirlilik yöntemi, bilgisayar yazılımının elde edilebilirliği, kolaylığı ve her bir tepki için verilen önem ve etki ağırlığının değiştirilebilir olması nedeniyle tavsiye edilmektedir [38].

5.3.1 Arzu edirlilik (desirability) yöntemi

Myres ve Montgomery tarafından arzu edirlilik olarak isimlendirilen çoklu tepki yöntemi tanımlanmıştır [39]. Arzu edirlilik yöntemi, tahmin edilen her bir tepkinin (Y_i), $0 < d_i < 1$ arasında sınırlandırılmış birimsiz bir değer olan arzu edirlilik değerine dönüştürülmesini içermektedir. Daha yüksek d_i değeri, daha uygun tepki (Y_i) değerinin olduğunu göstermektedir. Arzu edirlilik değerinin sıfır olması ($d_i=0$) ise istenilmeyen bir tepki değeri anlamına gelmektedir. Her bir tepkinin ayrı ayrı arzu edirlilik (d_i) değeri, Denklem (5.7), Denklem (5.8) ve Denklem (5.9)'daki amaç fonksiyonları kullanılarak hesaplanmaktadır.

Maksimum hedef için arzu edirlilik fonksiyonu:

$$d_i = \begin{cases} 0 & Y_i \leq \min f_i \\ \left[\frac{Y_i - \min f_i}{\max f_i - \min f_i} \right]^{wt_i} & \text{ve } 0 < d_i < 1, \min f_i < Y_i < \max f_i \\ 1 & Y_i \geq \max f_i \end{cases} \quad (5.7)$$

Minimum hedef için arzu edirlilik fonksiyonu:

$$d_i = \begin{cases} 1 & Y_i \leq \min f_i \\ \left[\frac{\text{maks } f_i - Y_i}{\text{maks } f_i - \min f_i} \right]^{wt_j} & \text{ve } 0 < d_j < 1, \min f_i < Y_i < \text{maks } f_i \\ 0 & Y_i \geq \text{maks } f_i \end{cases} \quad (5.8)$$

Bir hedef amacı için arzu edirlilik fonksiyonu:

$$d_i = \begin{cases} \left[\frac{Y_i - \min f_i}{T_i - \min f_i} \right]^{wt_{1i}} & \min f_i < Y_i < T_i \\ \left[\frac{Y_i - \text{maks } f_i}{T_i - \text{maks } f_i} \right]^{wt_{2i}} & T_i < Y_i < \text{maks } f_i \\ 0 & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (5.9)$$

Burada d_i , Y_i , $\min f_i$, T_i ve wt_i sırasıyla i .'nci tepkinin; arzu edirlilik fonksiyonu, TYY ile bulunan değeri, deneysel olarak elde edilen en küçük ve en büyük değerleri, hedef değeri ve etki ağırlık düzeyini göstermektedir. Farklı tepkilere değişik önem dereceleri belirtilmesi halinde toplam amaç fonksiyonu Denklem (5.10)'da gösterilmektedir [38].

$$D = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{r_i} \right)^{1/\sum r_i} \quad (5.10)$$

n : Tepki sayısı

d_i : Her bir tepkinin arzu edirlilik değeri

r_i : Her bir tepkinin önem seviyesi

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

Toplam arzu edirlilik değeri Denklem (5.11)'e göre belirlenmektedir [39].

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.11)$$

D : Çok amaçlı arzu edirlilik değeri

d_i : Her bir tepkinin arzu edirlilik değeri

n : Tepki sayısı

5.4 Regresyon Analizi ve Sonuçları

Bu çalışmada, naylon lifli betonların her bir grup deneysel çalışma programında farklı bağımsız değişkenlere (S/Ç oranı ve lif hacmi) bağlı olarak elde edilen bağımlı değişkenlere (silindir basınç ve yarma-çekme dayanımı, elastisite modülü, net eğilme dayanımı ve özgül kırılma enerjisi) veren lineer ve polinom türü matematiksel modeller Design-Expert 6.0.7 programı kullanılarak belirlenmiştir. Her bir tepkiyi temsil eden en iyi modelin belirlenmesi için program tarafından farklı modeller analiz edilmektedir. Bu modeller:

- a) Lineer Model: Faktörlerin tekli olarak kullanıldığı model (A, B, C gibi)
- b) 2FI (İkili faktörlü etkileşim) Model: Faktörlerin tekli ve ikili olarak kullanıldığı model (AB, BC, AC gibi).
- c) Kuadratik Model: Faktörlerin tekli, ikili olarak ve tekli terimlerin karelerinin de kullanıldığı model (AB, AC, BC, A^2 , B^2 , C^2 gibi).
- d) Kübik Model: Faktörlerin tekli, ikili, üçlü olarak kullanıldığı model (ABC, A^2B , A^2C , AB^2 , A^3 , B^3 , C^3 gibi).

En iyi model türü program tarafından belirlendikten sonra bu modeldeki terimlerin anlamlılığı varyans analizi (ANOVA) ile kontrol edilerek ($\alpha=0,05$) anlamlılık düzeyinde kontrol edilerek uygun modeller elde edilmiştir. . Her bir tepki için elde edilen regresyon modelleri Çizelge 5.2'de ve modellere ait korelasyon katsayıları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

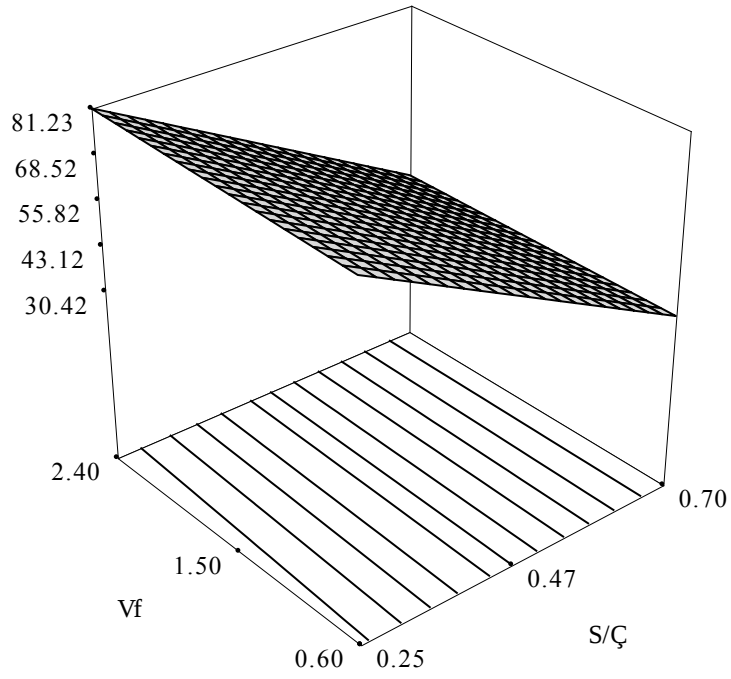
Çizelge 5.2 : Regresyon Modelleri.

Model Türü	Modeller
2FI	$f_s = 104.2 - 105.4(S/\zeta) + 2.2 \cdot V_f - 3.1(V_f) \cdot (S/\zeta)$
R-Kuadratik	$f_y = 12.9 - 29.7 \cdot S/\zeta + 0.09 \cdot V_f + 22.9 (S/\zeta)^2$
2FI	$E = 48.4 - 31.7 \cdot S/\zeta - 1.7 \cdot V_f + 2 \cdot (S/\zeta) \cdot V_f$
R-Kuadratik	$G_f = 63 + 387.9 \cdot S/\zeta + 4.8 \cdot V_f - 571.1 (S/\zeta)^2 + 122.3 (S/\zeta) \cdot V_f$
2FI	$f_n = 9.2 - 7.4 \cdot S/\zeta - 0.9 \cdot V_f + 0.8 (S/\zeta) \cdot V_f$
R-Kuadratik	$K_m = 2.3 - 4.5 \cdot S/\zeta + 0.03 \cdot V_f + 3.67 (S/\zeta)^2$

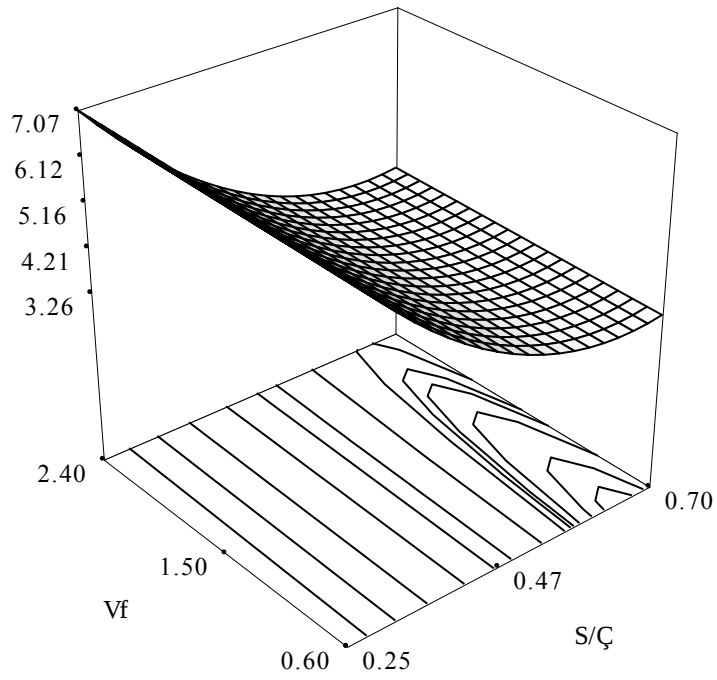
Çizelge 5.3 : Korelasyon katsayıları.

Model Türü	Korelasyon Katsayıları, R
2FI	0,96
R-Kuadratik	0,99
2FI	0,93
R-Kuadratik	0,89
2FI	0,86
R-Kuadratik	0,99

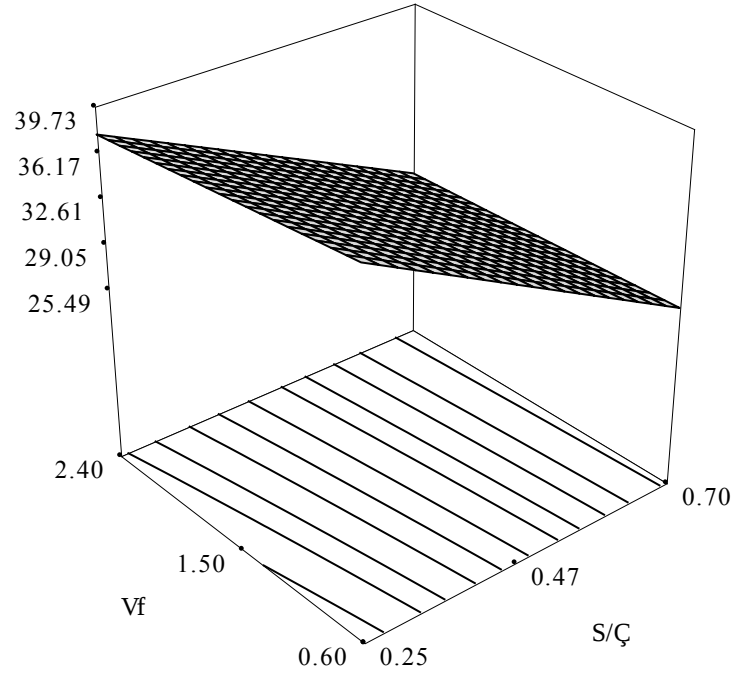
Farklı S/Ç oranı ve lif hacim oranına bağlı olarak her bir tepki için belirlenen modellere ait tepki yüzeyleri Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmektedir.



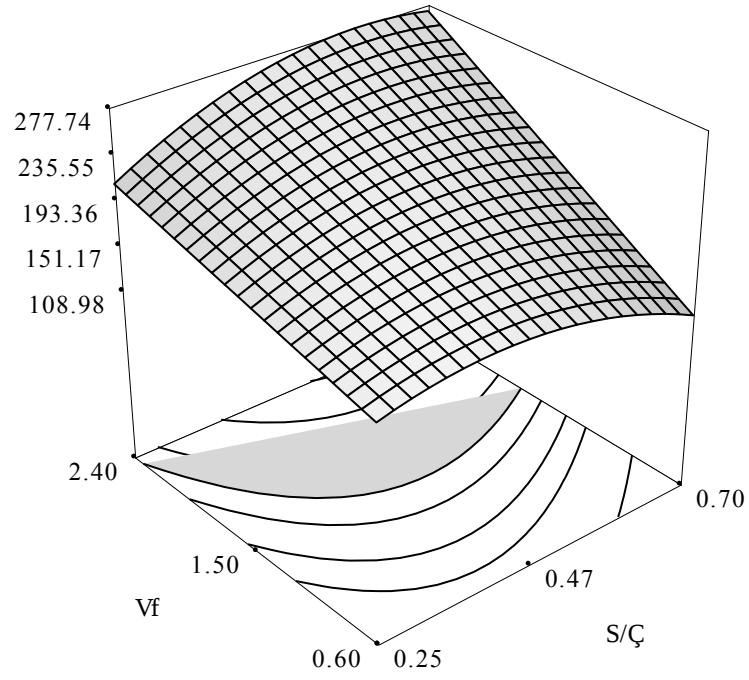
Şekil 5.2 : Nylon lifli betonların silindir basınç dayanımlarına ait tepki yüzeyleri.



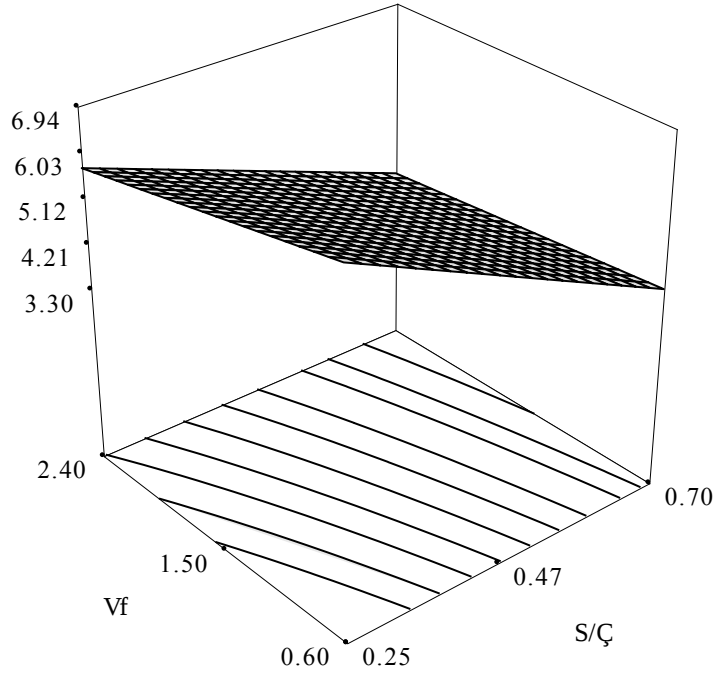
Şekil 5.3 : Nylon lifli betonların yarma-çekme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri.



Şekil 5.4 : Nylon lifli betonların elastisite modüllerine ait tepki yüzeyleri.



Şekil 5.5 : Nylon lifli betonların özgül kırılma enerjilerine ait tepki yüzeyleri.



Şekil 5.6 : Nylon lifli betonların net eğilme dayanımlarına ait tepki yüzeyleri.

5.5 Nylon Lifli Betonların Optimum Karışım Tasarımı ve Sonuçları

Genel olarak karışım optimizasyonları, elde edilen tepkilerin veya faktörlerin istenilen optimizasyon koşullarına göre (maksimum, minimum veya hedef değerlere göre) en uygun çözümlerin bulunmasını amaçlamaktadır. Birden fazla faktör ve tepkinin göz önüne alınması durumunda çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon, deneysel olarak belirlenen her bir tepki için hesaplanan arzu edirlilik fonksiyonunu (d_i) kullanan sayısal optimizasyon teknikleri ile uygulanmaktadır. Nylon lifler, artan lif miktarıyla birlikte betona kazandırdığı süneklik ve mekanik özelliklerin yanında betonun karışım maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle yüksek performans özelliklerine sahip daha ekonomik karışım çözümlerini belirlemek amacıyla yapılan çoklu optimizasyonlarda karışım maliyeti tepki olarak optimizasyona katılmıştır.

Nylon lifli betonların mekanik ve performans parametreleri olan yarma çekme dayanımı, silindir basınç dayanımı, özgül kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımlarını temsil eden en iyi modellere çok amaçlı optimizasyon teknikleri uygulanarak optimum karışım tasarımları belirlenmiştir. Optimum karışım tasarımı,

maksimum süneklik (özellik kırılma enerjisi, net eğilme dayanımları), maksimum yarma çekme ve silindir basınç dayanımı ve en düşük karışım maliyeti koşulunu sağlayan minimum lif hacmi elde edilmesini içermektedir. Optimizasyonda, kullanılan her bir tepkiye ait ağırlık etkisi eşit olarak alınmıştır. Her bir grup için faktörler ve tepkilere ait deneysel alt ve üst sınır değerleri Çizelge 5.4'te verilmektedir. Çok amaçlı optimizasyon Çizelge 5.4'te faktörler ve tepkiler için verilen sınır koşullarında yapılarak optimum karışım çözümleri belirlenmiştir. Çoklu optimizasyona eş zamanlı olarak katılan toplam faktör ve tepki sayısına göre toplam arzu edirlilik fonksiyonu Denklem (5.12)'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 Faktörler ve tepkilere ait alt ve üst sınır değerleri.

Değişkenler	Faktörler ve Tepkiler	Alt Sınır	Üst Sınır
Faktörler	S/Ç Oranı, (%)	0,25	0,70
	Lif Hacmi (V_f), kg/m^3	0,60	2,40
Tepkiler	Silindir Basınç Dayanımı, (f_s), MPa	31	83
	Elastisite Modülü, (E), GPa	25	41
	Yarma Çekme Dayanımı, (f_y), MPa	3,24	7,07
	Özellik Kırılma Enerjisi (G_f), Joule/m^2	119	300
	Net Eğilme Dayanımı, (f_n)MPa	3,39	6,94
	Karışım Maliyeti, birim	1	1,49

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4 \times d_5 \times d_6 \times d_7)^{1/7} \quad (5.12)$$

Burada;

d_1 : Silindir basınç dayanımı tepkisine ait arzu edirlilik değeri

d_2 : Elastisite modülü tepkisine ait arzu edirlilik değeri

d_3 : Yarma çekme dayanımı tepkisine ait arzu edirlilik değeri

d_4 : Özellik kırılma enerjisi tepkisine ait arzu edirlilik değeri

d_5 : Net eğilme dayanımı tepkisine ait arzu edirlilik değeri

d_6, d_7 : Belirlenen iki faktöre ait arzu edirlilik değerleri.

Çok amaçlı optimizasyon, belirlenen amaç koşullarına bağlı olarak farklı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle çoklu optimizasyon öncesinde her bir faktör ve tepki için optimizasyon amacına göre amaç koşullarının belirlenmesi gerekmektedir.

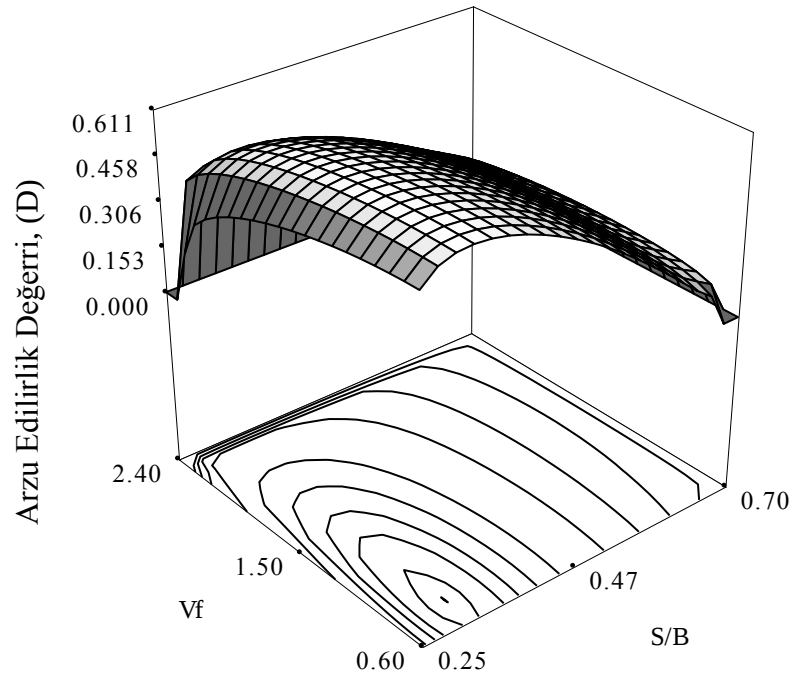
Her bir faktör ve tepki için seçilen optimizasyon amaç koşulları ve belirlenen optimum karışım çözümleri Çizelge 5.5'te verilmektedir. Tahmin edilen optimum çözümler %95 güven aralığında belirlenmiştir.

Çizelge 5.5 : Naylon lifli karışımlara ait optimum karışım çözümleri.

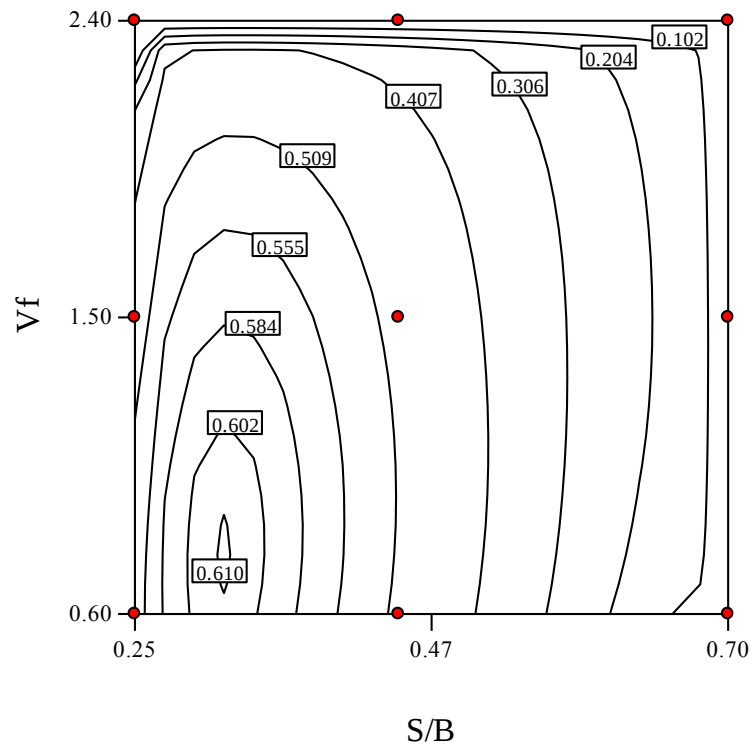
Faktörler ve Tepkiler		Amaç	Optimum Çözüm	Alt Sınır	Üst Sınır
Faktörler	Su/Çimento Oranı (S/Ç), %	--	0,32	0,25	0,70
	Lif Hacmi (V_f), kg/m^3	Minimum	0,78	0,6	2,4
Tepkiler	Silindir Basınç Dayanımı (f_s), MPa	Maksimum	72	31	83
	Elastisite Modülü (E), GPa	Maksimum	37	25	41
	Yarma Çekme Dayanımı (f_y), MPa	Maksimum	5,82	3,24	7,07
	Özgül Kırılma Enerjisi (G_f), Joule/m^2	Maksimum	162	119	300
	Net Eğilme Dayanımı, MPa	Maksimum	6,37	3,39	6,94
	Karışım Maliyeti, birim	Minimum	1,28	1	1,49
	Çok Amaçlı Arzu Edilirlik Değeri (D)	--	0,611		

Naylon liflerin kullanıldığı karışımlarda silindir basınç dayanımı, elastisite modülü, yarma çekme dayanımı, özgül kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımının en büyük, karışım maliyeti ve lif hacminin en küçük olduğu koşullarda yapılan çoklu optimizasyon sonucunda, Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi optimum çözüm; S/Ç= 0,32, $V_f= 0,78 \text{ kg/m}^3$ ve karışım maliyeti 1,28 olarak elde edilmiştir. Bu optimum orandaki silindir basınç dayanımı, elastisite modülü, yarma çekme dayanımı, özgül kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı sırasıyla 71,82 MPa, 37,53 GPa, 5,82 MPa, 162,36 Joule/m^2 ve 6,37 MPa'dır.

Naylon lifli karışımlar için Denklem (5.11)'e göre hesaplanan kompozit arzu edirlilik değerinin (D) faktörlere göre değişimini gösteren tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü grafikleri Şekil 5.7a ve Şekil 5.7b'de verilmektedir. Optimum karışım çözümü, tepki yüzeyi grafiklerinin en yüksek olduğu nokta ile tanımlanmakta olup karışımlar için Şekil 5.7a'da gösterilmektedir. Elde edilen tepki yüzeyi grafiklerinde arzu edirlilik değerlerinin (D) sıfır olduğu bölgeler, her bir tepki ve faktör için belirlenen amaç koşullarında çözümün olmadığı faktör değerlerini tanımlayan bölgelerdir.



a) Tepki yüzeyi



b) Tepki yüzeyi izdüşümü

Şekil 5.7 : Nylon lifli karışımlar için çok amaçlı optimizasyona ait tepki yüzeyi ve tepki yüzeyi izdüşümü.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- Silindir basınç dayanımları, naylon lifin farklı oranlarda eklenmesi veya çelik ve naylon lifin birlikte kullanılması ile üretilen karma lifli beton karışımlarında değişmemiştir.
- Naylon lif ve çelik tel kullanılmasının karışımların elastisite modülü değerlerine belirli bir etkisi görülmemiştir. Su/bağlayıcı oranı artması ile elastisite modülü değerleri azalmıştır.
- Karışımlara naylon lif eklenmesi ile kırılma enerjilerinde en az 1,5, en fazla 4 kat artış görülmüştür.
- Betona naylon lif eklenmesi ile kırılma enerjisinde meydana gelen artışlar lif miktarına göre değişmektedir. Karışımlara 1 m³ bileşim için 0.6 kg naylon lif eklenmesi ile yaklaşık olarak 1.5 kat, 1.5 kg lif eklenmesi ile düşük su/bağlayıcı oranlarında 1.7, yüksek su/bağlayıcı oranına sahip karışımlarda ise 3 kat, 2.4 kg lif eklenmesi ile de en düşük 2 en yüksek 4 kat artış olmuştur. Aynı lif miktarına sahip karışımlarda, su/bağlayıcı oranı arttıkça kırılma enerjilerinin de azaldığı görülmüştür.
- Karışımların 1 m³ bileşimlerinde 1,5 kg naylon lif, 20 kg kanca uçlu çelik tel ve 18 kg düz çelik tel katılarak, karma lifli olarak üretilen numunelerin kırılma enerjileri yalın betonlara göre en az 45, en fazla 70 kat artmıştır. Bunun nedeni yük-sehim eğrisinde, kancalı uçlu uzun çelik tellerin maksimum yük sonrası davranışı iyileştirmesidir. Kısa kesilmiş düz teller ise mikro çatlakların oluşumunu engelleyerek ilk çatlak yükünün artmasını sağlamaktadır.
- Betona naylon lif eklenmesi ile numunelerin net eğilme dayanımlarında önemli bir artış olmamıştır. Ancak 1,5 kg/m³ naylon lif miktarına sahip karışımların eğilme dayanımlarının diğerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Su/bağlayıcı oranı azaldıkça betonun dayanımı artacağından kırılma yükleri ve dolayısıyla eğilme dayanımları da artmıştır.

- Karma lifli karışımların net eğilme dayanımları yalın betonlarla kıyaslandığında en az 1,3, en fazla 1,5 kat artmıştır.
- Numunelerin yarma-çekme dayanımları, farklı miktarlarda naylon lif eklenmesi veya karma lifli olarak üretilmesi ile değişmemiş yaklaşık olarak aynı kalmıştır.
- Sentetik lif kullanılarak üretilen betonlar, sadece çelik tel kullanılarak üretilen betonlarla kıyaslandığında basınç dayanımlarında ve elastisite modüllerinde önemli bir farklılık olmadığı görülmüştür. Ancak, sentetik liflerin kullanımı betonun performansının yaklaşık olarak ÇTDB performansı ile aynı olmasını sağlamıştır. Eğilme dayanımlarının yaklaşık aynı olduğu, özgül kırılma enerjilerinin ise ÇTDB’da 1,5 kat daha fazla olduğu görülmüştür.
- Bu çalışmadaki üretimlerde kullanılan naylon liflerin maliyeti uygulanabilirlik açısından önemlidir. Naylon lifli betonların maliyeti göz önüne alınarak en düşük maliyet ve en yüksek performans koşullarında yapılan çok amaçlı sayısal optimizasyon sonucunda $S/\bar{C}=0,32$, $V_f=0,78 \text{ kg/m}^3$ ve optimum maliyet 1,28br değerlerinde optimum çözüm elde edilmiştir. Bu optimum çözüme karşılık gelen silindirik basınç dayanımı, elastisite modülü, yarma çekme dayanımı, özgül kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı değerleri sırasıyla; 71,82 MPa, 37,53 GPa, 5,82 MPa, 162,36 Joule/m² ve 6,37 MPa’dır.

KAYNAKLAR

- [1] **ACI 544.1R-96**, 1996: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee 544, American Concrete Institute, Detroit, MI.
- [2] **Rafalco, S. D., Brandon, T. L., Filz, G. M., and Mitchell, J. K.**, 2008: Fiber Reinforcement For Rapid Stabilization of Soft Clay Soils, Transportation Research Board of the National Academies, Vol.2026, pp.21-29.
- [3] **Taşdemir, M.A. ve Bayramov F.**, 2002: Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İtÜdergisi/d*, Cilt 1, Sayı 2, 125-144.
- [4] **Şengül, C.**, 2005: Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışına Su/İnce Malzeme Oranı ve Lif Dayanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [5] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Ağar, A.Ş. ve Yerlikaya, M.**, 2005: Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı, 6. Ulusal Beton Kongresi, İ.T.Ü, İstanbul, 16-18 Kasım, 33-43.
- [6] **SHRP- C/FR – 91-103**, 1991: High Performance Concretes, A State of the Art Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC.
- [7] **Jansen, D. C., Shah, S. P. and Rossow, E.**, 1995: StressStrain Results of Concrete from Circumferential Strain Feedback Control Testing, *ACI Materials Journal*, 419-428.
- [8] **Taşdemir, M. A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson, A. D., Lydon, F. D. and Barr, B. I. G.**, 1998: Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A ThreePhase Composite Model Approach, *Cement and Concrete Composites*, 20, pp.301-318.
- [9] **Aral, M.**, 2006: Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir Optimum Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [10] **Balaguru P. B. and Shah, S. P.**, 1992: Fiber-Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, Inc.
- [11] **Rossi, P.**, 2000: Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC) An Overview, Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France, 13-15 September.87-100.
- [12] **Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D. H. ve Moczko, A.**, 2000: Fracture Properties and Acoustic Emission Response of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre Reinforced Concrete. Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), 491-500, Lyon, France.

- [13] **Akkaya, Y. ve Shah, S. P.**, 2001: Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 127, 311-316.
- [14] **Akkaya, Y.**, 2000: Microstructural Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, PhD Thesis, Northwestern University, Illinois.
- [15] **Shah, B.**, 1995: Fiber-Reinforced Composites, American Concrete Institute, Detroit U.S.A.
- [16] **Lee, S.J., Rust, J.P., Hamouda, H., Kim, Y.R. and Borden, R.H.**, 2005: Fatigue Cracking Resistance of Fiber Reinforced Asphalt Concrete, Textile Research Journal, Vol.75, pp.123-128.
- [17] **Songa, P.S., Hwangb, S. And Sheub, B.C.**, 2005: Strength Properties of Nylon and Polypropylene Fiber Reinforced Concretes, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.1546-1550.
- [18] **Zhou, Z., Xiao, Z., Pan, W., Xie, Z., Luo, X. And Jin, L.**, 2003: Carbon-Coated Nylon Fiber Reinforced Cement Composites as an Intrinsically Smart Concrete for Damage Assessment during Dynamic Loading, J. Material Science Technology, Vol. 19, No. 6.
- [19] **Pelisser, F., Neto, A.B.S.S., Rovere, H.L.L and Pinto, R.C.A.**, 2010: Effect of the Addition of Synthetic Fibers to Concrete Thin Slabs on Plastic Shrinkage Cracking, Construction and Building Materials, 24, 2171-2176.
- [20] **Anurag, K., Xiao, F. And Amirkhanian, S.N.**, 2009: Laboratory Investigation of Indirect Tensile Strength Using Roofing Polyester Waste Fibers in Hot Mix Asphalt, Construction and Building Materials, 23, 2035-2040.
- [21] **Kurt, G.**, 2006: Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [22] **Ersoy, H. Y.**, 2001: Kompozit Malzeme, Literatür, İstanbul.
- [23] **Raghavendra, R. H., Kamath, M. G., Dahiya, A.**, Nisan 2004: Nylon Fibres.
- [24] **Khajuria, A., Bohra, K., and Balaguru, P.**, 1991: Long- Term Durability of Synthetic Fibers in Concrete, American Concrete Institute, Detroit, vol. 2, pp 851-868, (ACI SP-126).
- [25] **McIntyre, J. E.**, 2005: Synthetic Fibers: Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin, Literatür, England.
- [26] **Bayasi, Z. and Soroushian P.**, 1991: Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 88, 129-134.
- [27] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N. ve Yerlikaya, M.**, 2004: Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton 2004 Kongresi, Dünya Ticaret Merkezi, İstanbul, 10-12 Haziran.
- [28] **Barros, J.A.O. and Figueiras, J.A.**, 1999: Flexural Behaviour of SFRC: Testing and Modelling, Journal of Materials in Civil Engineering, 11(4), 331-339.
- [29] **Köksal, F.**, 2004: Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [30] **Yeğınobalı, A.**, 2002: Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB/AR-GE Enstitüsü, Ankara.
- [31] **Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Mills, N., Barr, B. I. G. ve Lydon, F. D.**, 1999: Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Post Peak Response of Concrete in Bending, ACI Materials Journal, 96, 74-83.
- [32] **Massazza, F.**, 2000: Evaluation of Cements and Cementitious Systems: History and Prospects, Cement and Concrete Technology in the 2000s, Second International Symposium, TCMA, İstanbul, pp 3-28.
- [33] **Goldman, A. and Bentur, A.**, 1992: Effects of Pozzolanic and Nonreactive Microfillers on Transition Zone in High-Strength Concretes. Proceedings, Interfaces in Cementitious Composites, J.C. Maso, ed., RILEM, E and FN Spon, London, pp. 53-62.
- [34] **FIP.**, 1988: Condensed Silica Fume in Concrete, State of Art Report, 37p, Thomas Telford, London.
- [35] **Uyan, M. ve Yıldırım, H.**, 1991: Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği, 2.Ulusal Beton Kongresi, İ.T.Ü., İstanbul, 27-30 Mayıs, 262-279.
- [36] **YKS**, Yüksek Performanslı Beton İçin Yeni Kuşak Hiper Akışkanlaştırıcı, GLENİUM Tanıtım Broşürü, YKS.
- [37] **Box, G. and Wilson, K.**, 1951: On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, Journal of the Royal Statistical Society Series B 13, 1-45.
- [38] **Yalçın, M.**, 2009: Çelik Lif Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [39] **Myers R.H. and Montgomery, D.C.**, 2002: Response Surface Methodology: Process And Product Optimization Using Designed Experiment, John Wiley & Sons, New York.

EKLER

Ek A : Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

Ek B : Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar ve Grafikler

Ek C : Yarma-Çekme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar

Ek D : SLDB ve ÇTDB Numunelerin Deney Sonuçları

Ek A : Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

Çizelge A.1 : Silindir numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerleri.

Numune kodu	Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
W70N0-1	34
W70N0-2	34
W70N0-3	32
W70N0-4	34
W70N6-1	32
W70N6-2	33
W70N6-3	33
W70N6-4	32
W70N15-1	34
W70N15-2	35
W70N15-3	32
W70N15-4	31
W70N24-1	31
W70N24-2	31
W70N24-3	32
W70N24-4	31
W70S25-1	32
W70S25-2	30
W70S25-3	33
W70S25-4	35
W45N0-1	49
W45N0-2	51
W45N0-3	50
W45N6-1	50
W45N6-2	48
W45N6-3	49
W45N6-4	54
W45N15-1	51
W45N15-2	55
W45N15-3	57
W45N15-4	56
W45N24-1	58
W45N24-2	55
W45N24-3	56
W45N24-4	55

Çizelge A.1 (devam) : Silindir numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerleri.

W45S25-1	55
W45S25-2	56
W45S25-3	56
W45S25-4	55
W25N0-1	77
W25N0-2	86
W25N0-3	87
W25N0-4	80
W25N6-1	82
W25N6-2	81
W25N6-4	82
W25N15-1	90
W25N15-2	75
W25N15-3	84
W25N24-1	84
W25N24-2	80
W25N24-3	81
W25S25-1	71
W25S25-2	69
W25S25-3	71

Çizelge A.2 : Silindir numunelerden elde edilen elastisite modülü değerleri.

Numune kodu	Elastisite Modülü (MPa)
W70N0-2	27
W70N0-3	23
W70N0-4	29
W70N6-1	25
W70N6-2	29
W70N6-4	27
W70N15-2	25
W70N15-3	27
W70N15-4	25
W70N24-1	25
W70N24-2	25
W70N24-4	24
W70S25-1	34
W70S25-2	24
W70S25-3	27
W70S25-4	32
W45N0-2	30
W45N0-3	28
W45N0-4	31
W45N6-1	32
W45N6-3	31
W45N6-4	31
W45N15-1	33
W45N15-2	31
W45N15-3	33
W45N24-1	33
W45N24-2	38
W45N24-3	29
W45S25-1	34
W45S25-3	37
W45S25-4	33
W25N0-1	40
W25N0-3	42
W25N0-4	43
W25N6-1	41
W25N6-4	41
W25N15-2	39
W25N15-3	38
W25N24-1	36
W25N24-2	37
W25S25-2	36
W25S25-3	35
W25S25-4	39

Ek B : Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar ve Grafikler**Çizelge B.1 : Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjisi değerleri.**

Numune kodu	Kırılma Enerjileri (N/m)	Ortalama (N/m)
W70N0-1	65	65
W70N0-2	82	
W70N0-3	50	
W70N0-4	48	
W70N0-5	81	
W70N6-1	120	119
W70N6-2	128	
W70N6-3	109	
W70N15-1	131	186
W70N15-2	224	
W70N15-3	168	
W70N15-4	169	
W70N15-5	239	
W70N24-1	286	266
W70N24-2	209	
W70N24-3	250	
W70N24-4	292	
W70N24-5	293	
W70S25-1	4200	4765
W70S25-2	7644	
W70S25-3	2899	
W70S25-4	5319	
W70S25-5	3764	
W45N0-2	127	120
W45N0-3	106	
W45N0-4	126	
W45N6-3	157	157
W45N15-3	165	178
W45N15-4	190	
W45N24-4	333	300
W45N24-5	264	
W45S25-1	5674	5523
W45S25-2	5522	
W45S25-3	6286	
W45S25-5	4609	
W25N0-1	121	106
W25N0-2	102	
W25N0-3	98	
W25N0-4	116	
W25N0-5	92	

Çizelge B.1 (devam) : Prizma numunelerden elde edilen kırılma enerjisi değerleri.

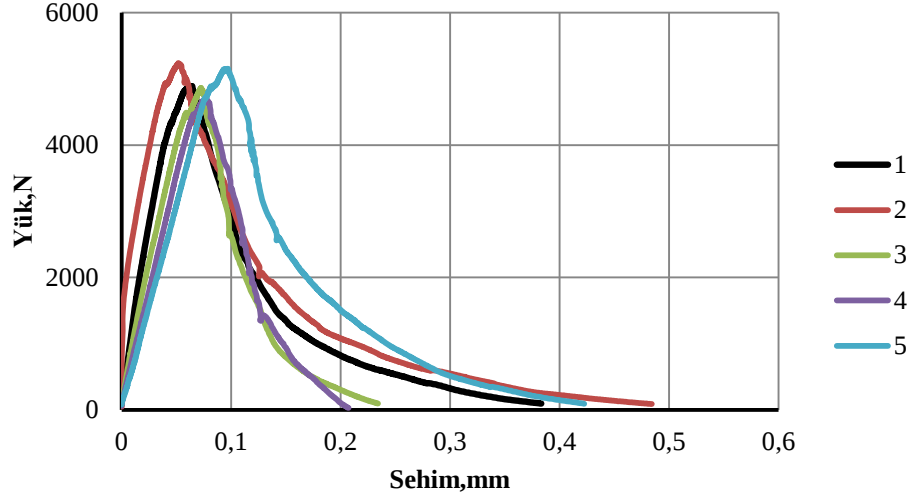
W25N6-1	188	155
W25N6-3	175	
W25N6-4	101	
W25N6-5	154	
W25N15-1	150	178
W25N15-2	189	
W25N15-3	174	
W25N15-4	199	
W25N24-1	236	211
W25N24-2	319	
W25N24-3	140	
W25N24-4	169	
W25N24-5	193	
W25S25-3	8330	7883
W25S25-5	7436	

Çizelge B.2 : Prizma numunelerden elde edilen eğilme dayanımı değerleri.

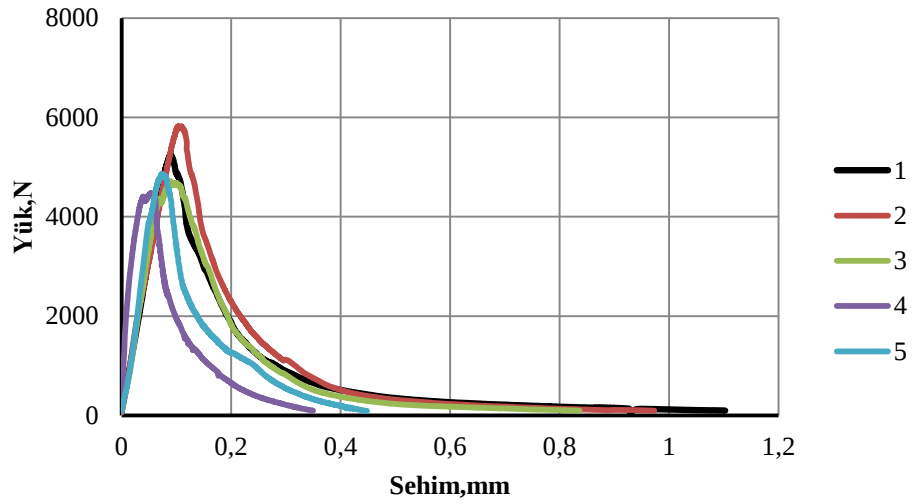
Numune kodu	Kırılma Enerjileri (N/m)
W70N0-1	3.48
W70N0-2	3.71
W70N0-3	3.54
W70N0-4	3.31
W70N0-5	3.64
W70N6-1	3.8
W70N6-2	4.14
W70N6-3	3.46
W70N6-5	3.37
W70N15-1	3.74
W70N15-2	4.19
W70N15-3	4.2
W70N15-4	4.1
W70N15-5	4.15
W70N24-1	3.55
W70N24-2	3.43
W70N24-3	3.0
W70N24-4	3.21
W70N24-5	3.77
W70S25-1	5.88
W70S25-3	4.81
W70S25-4	6.18
W70S25-5	4.84
W45N0-1	4.38
W45N0-2	4.14
W45N0-3	3.6
W45N0-4	3.47
W45N6-1	5.75
W45N6-3	3.9
W45N6-4	4.45
W45N6-5	5.93
W45N15-1	5.69
W45N15-2	4.3
W45N15-3	5.68
W45N15-4	6.59
W45N24-2	3.47
W45N24-4	4.04
W45N24-5	3.44
W45S25-1	5.87
W45S25-2	6.57
W45S25-3	6.07
W45S25-5	5.25

Çizelge B.2 (devam) : Prizma numunelerden elde edilen eğilme dayanımı değerleri.

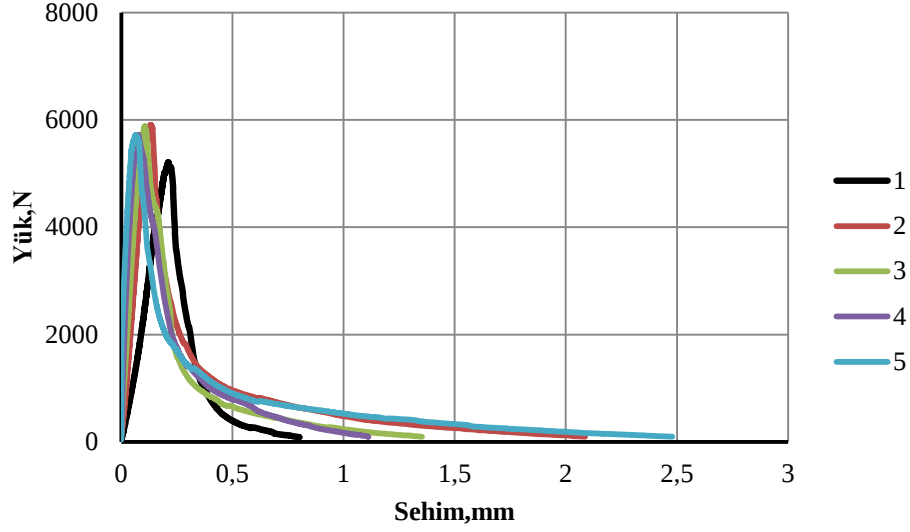
W25N0-1	6.47
W25N0-2	6.54
W25N0-3	6.52
W25N0-4	6.63
W25N0-5	6.9
W25N6-1	8.02
W25N6-3	7.39
W25N6-4	4.73
W25N6-5	7.62
W25N15-1	6.12
W25N15-2	5.53
W25N15-3	5.55
W25N15-4	8.5
W25N15-5	7.69
W25N24-1	5.84
W25N24-2	8.23
W25N24-3	8.13
W25N24-4	8.17
W25N24-5	6.18
W25S25-3	9.13
W25S25-5	8.21



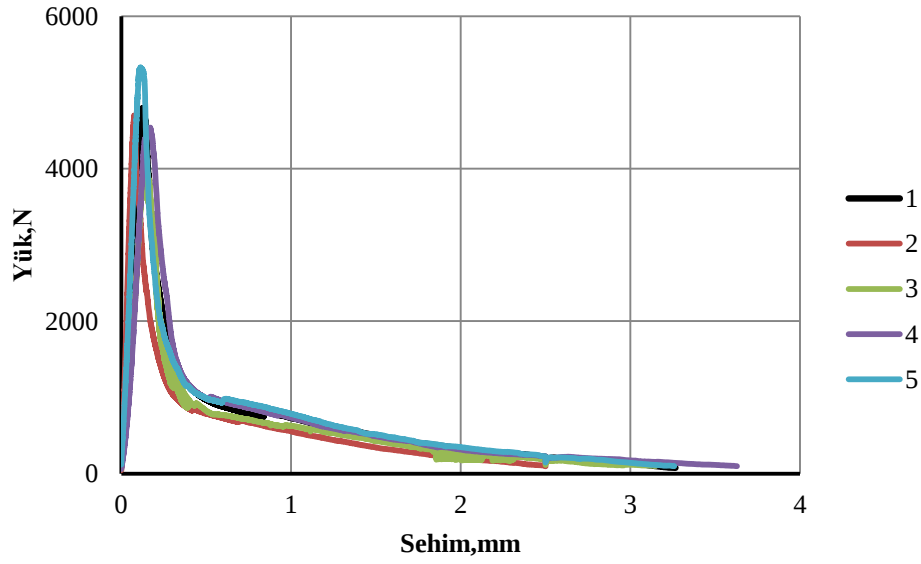
Şekil B.1 : Su/çimento oranı 0,70 olan yalın numunelerine ait yük sehim grafikleri.



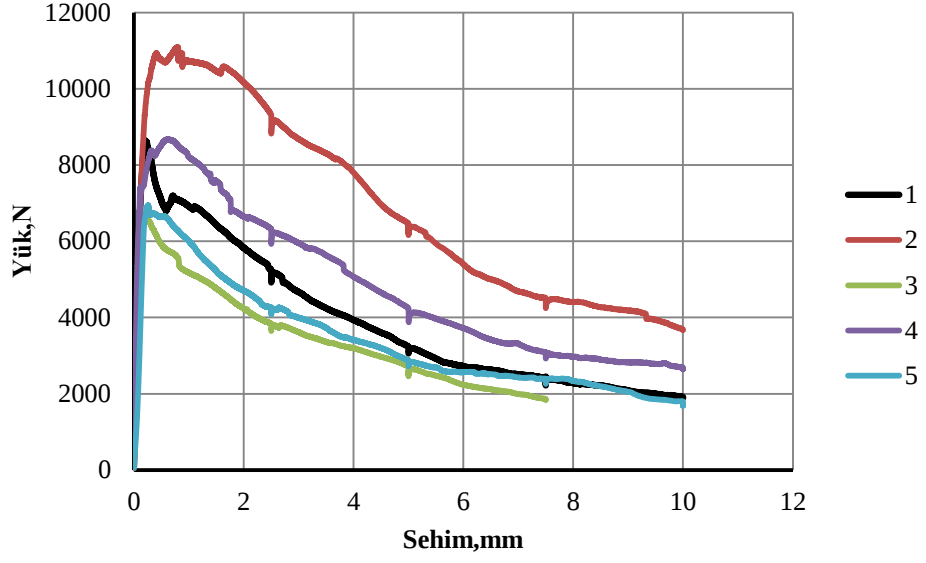
Şekil B.2 : Su/çimento oranı 0,70 olan 0,6 kg/m³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



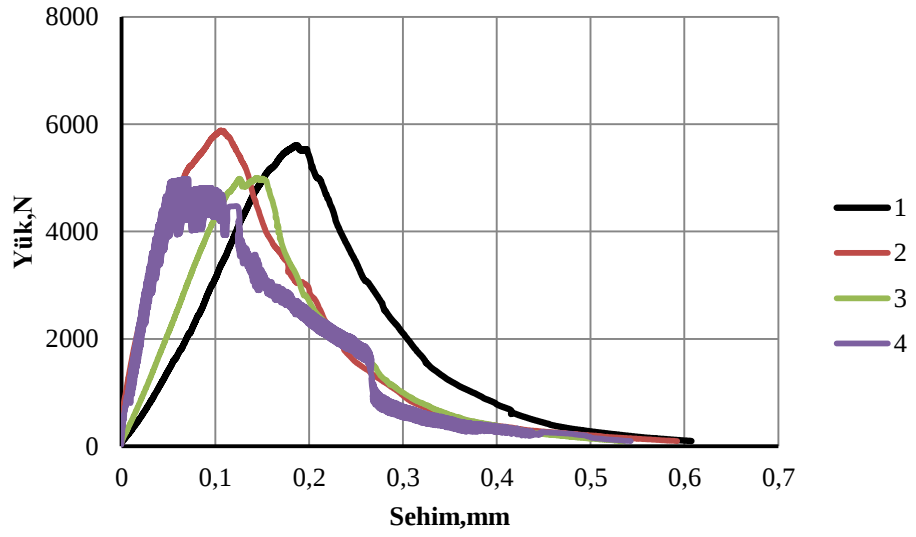
Şekil B.3 : Su/çimento oranı 0,70 olan 1,5 kg/m³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



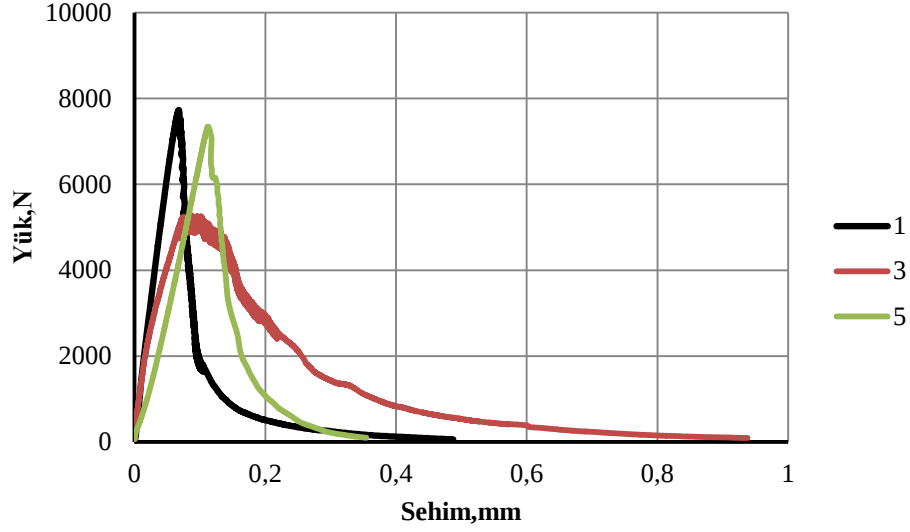
Şekil B.4 : Su/çimento oranı 0,70 olan 2,4 kg/m³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



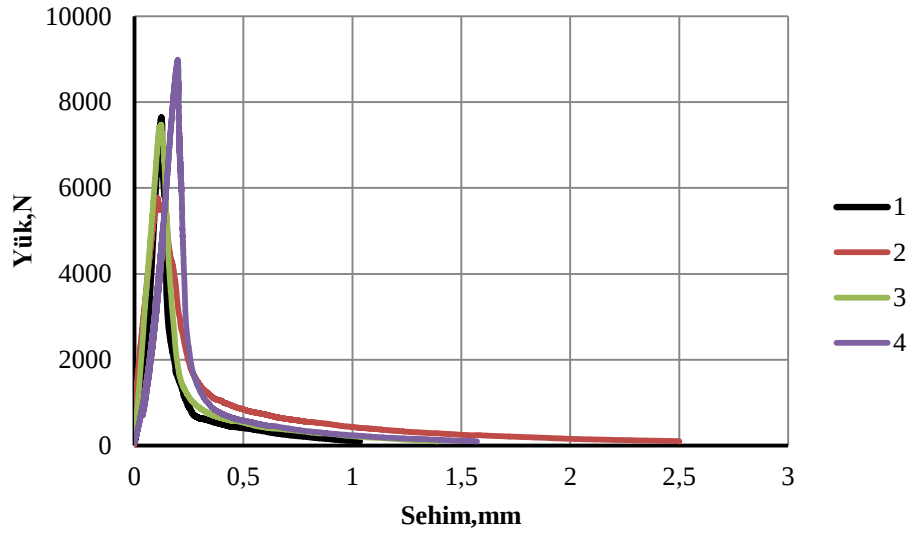
Şekil B.5 : Su/çimento oranı 0,70 olan karma lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



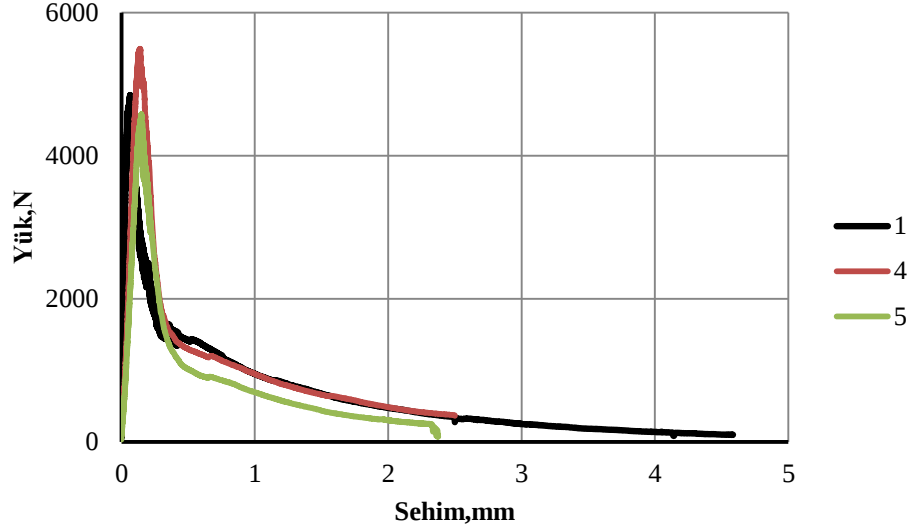
Şekil B.6 : Su/çimento oranı 0,45 olan yalın numunelerine ait yük sehim grafikleri.



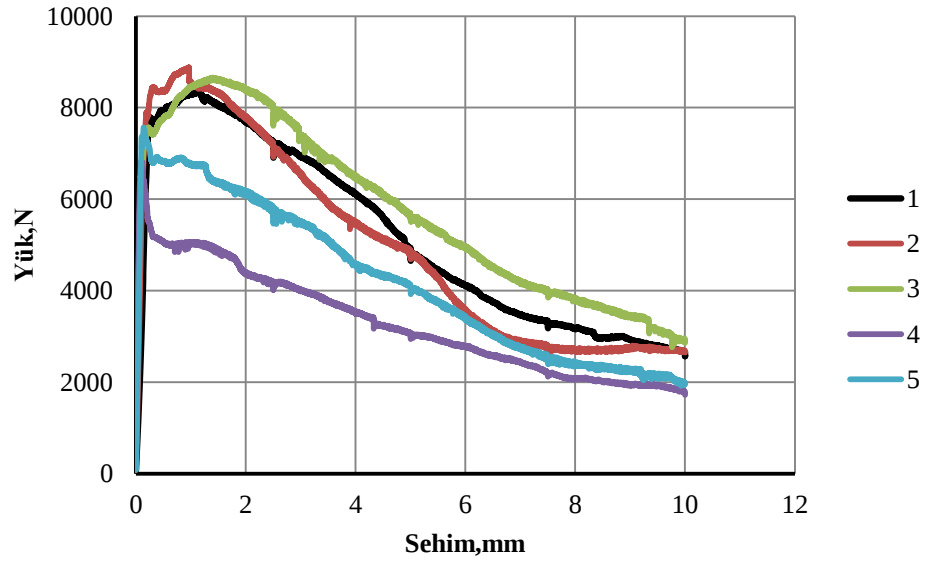
Şekil B.7 : Su/çimento oranı 0,45 olan 0,6 kg/m³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



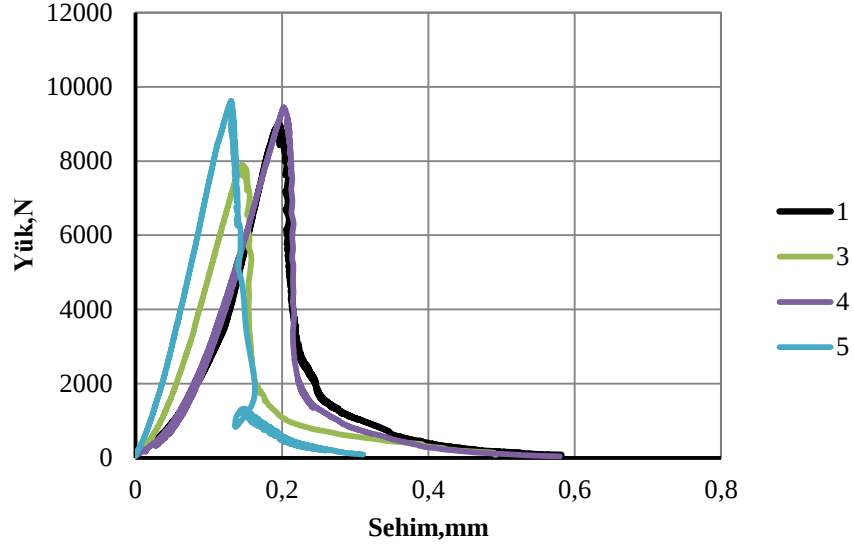
Şekil B.8 : Su/çimento oranı 0,45 olan 1,5 kg/m³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



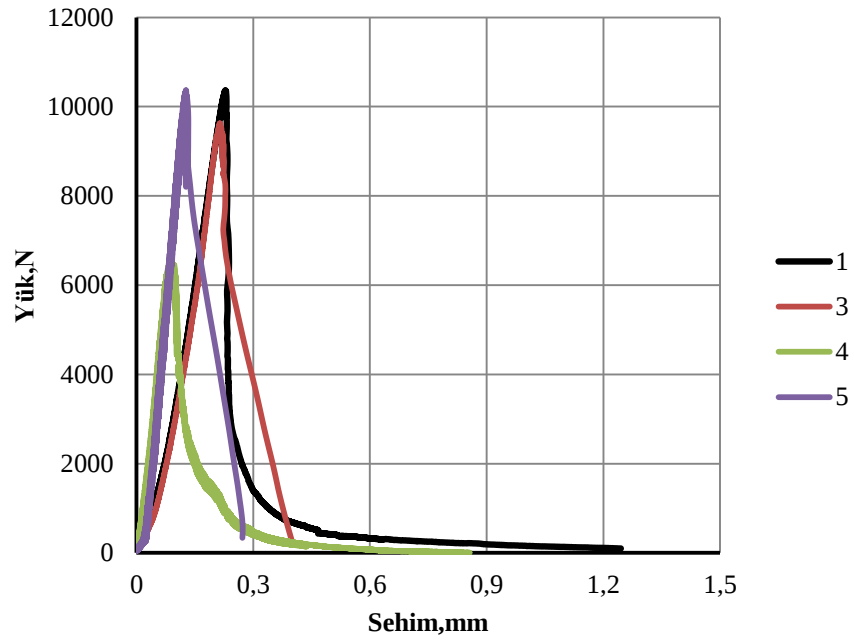
Şekil B.9 : Su/çimento oranı 0,45 olan 2,4 kg/m³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



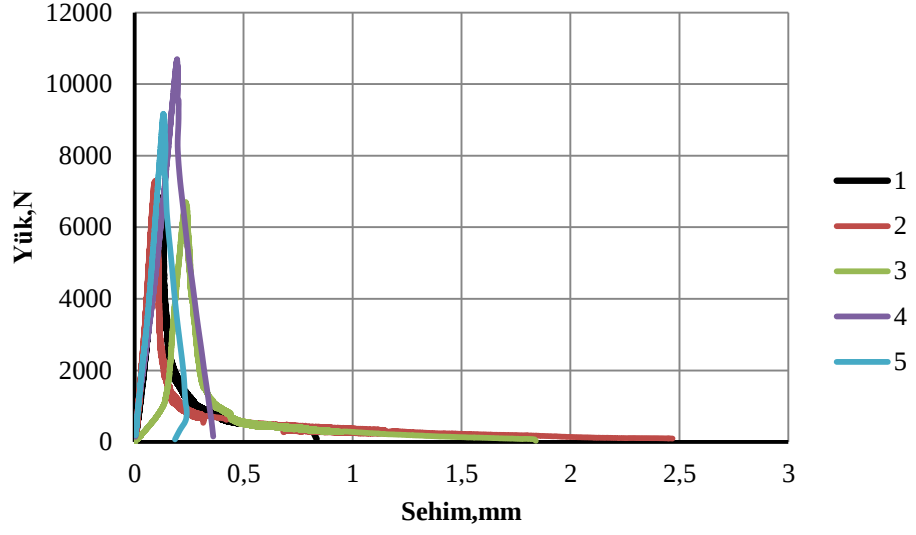
Şekil B.10 : Su/çimento oranı 0,45 olan karma lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



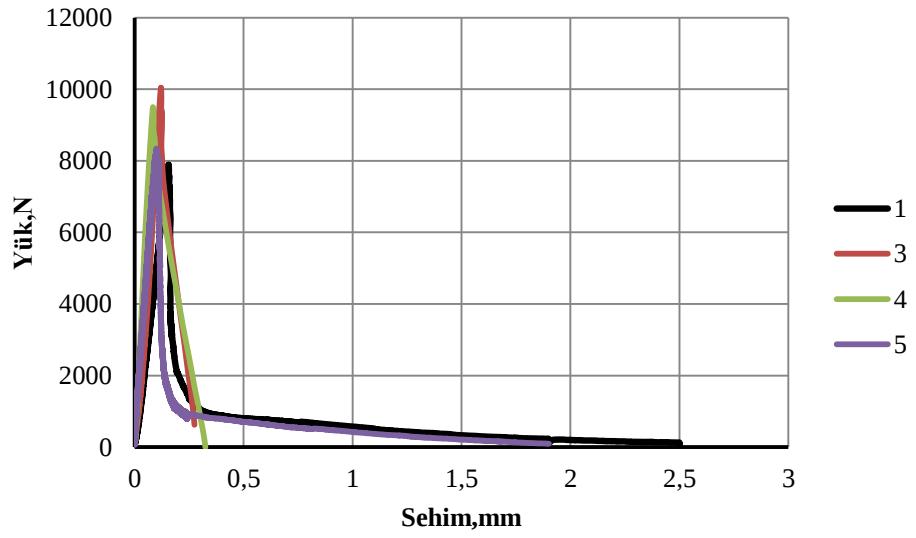
Şekil B.11 : Su/çimento oranı 0,25 olan yalın numunelerine ait yük sehim grafikleri.



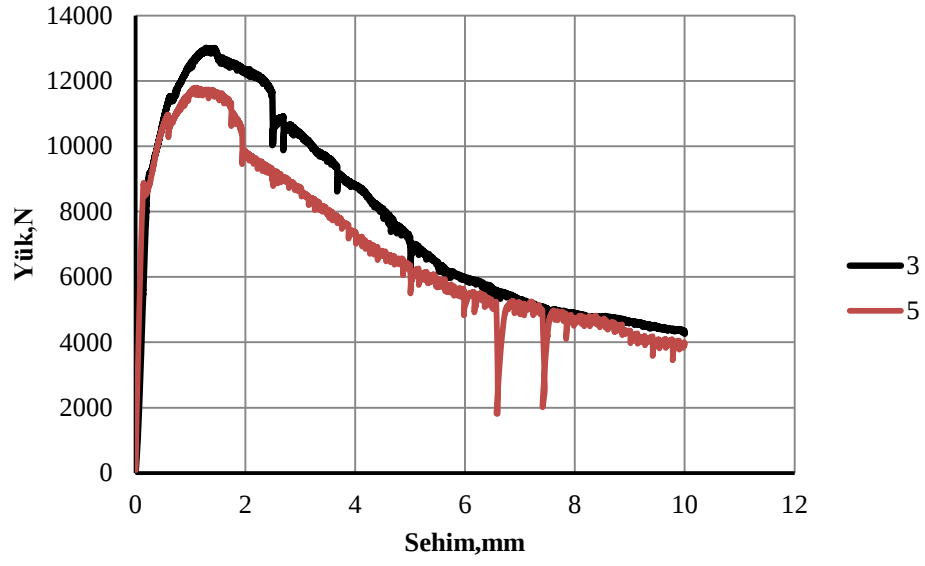
Şekil B.12 : Su/çimento oranı 0,25 olan 0,6 kg/m³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



Şekil B.13 : Su/çimento oranı 0,25 olan 1,5 kg/m³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



Şekil B.14 : Su/çimento oranı 0,25 olan 2,4 kg/m³ naylon lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.



Şekil B.15 : Su/çimento oranı 0,25 olan karma lif içeren numunelerine ait yük sehim grafikleri.

Ek C. Yarma-Çekme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar

Çizelge C.1 : Disk numunelerden elde edilen yarma-çekme dayanımı değerleri.

Numune kodu	Yarma-Çekme Dayanımı (MPa)
W70N0-1	3,33
W70N0-2	3,12
W70N0-4	3,47
W70N0-5	3,37
W70N0-6	3,40
W70N6-1	2,91
W70N6-2	3,52
W70N6-3	3,47
W70N6-4	3,79
W70N6-5	2,90
W70N6-6	2,87
W70N15-1	3,93
W70N15-2	3,53
W70N15-3	3,51
W70N15-4	3,54
W70N15-5	2,92
W70N15-6	3,05
W70N24-1	3,70
W70N24-2	3,49
W70N24-3	3,55
W70N24-4	3,47
W70N24-5	3,33
W70N24-6	3,70
W70S25-1	3,69
W70S25-2	3,50
W70S25-3	4,14
W70S25-4	4,35
W70S25-5	4,87
W70S25-6	3,64
W45N0-1	4,27
W45N0-2	4,09
W45N0-3	4,38
W45N0-5	4,51
W45N0-6	4,35
W45N6-1	4,63
W45N6-4	3,84
W45N6-5	4,38
W45N6-6	4,18

Çizelge C.1 (devam) : Disk numunelerden elde edilen yarma-çekme dayanımı değerleri.

W45N15-1	4,44
W45N15-2	4,24
W45N15-3	3,82
W45N15-4	3,78
W45N15-5	4,68
W45N15-6	4,34
W45N24-1	4,31
W45N24-3	4,44
W45N24-5	4,14
W45N24-6	4,23
W45S25-1	5,62
W45S25-2	5,69
W45S25-3	5,04
W45S25-4	3,99
W45S25-5	4,86
W45S25-6	5,88
W25N0-1	5,36
W25N0-2	5,30
W25N0-3	6,94
W25N0-4	6,51
W25N0-5	5,06
W25N0-6	6,55
W25N6-1	6,08
W25N6-2	6,25
W25N6-3	7,85
W25N6-4	7,24
W25N6-5	7,52
W25N6-6	6,54
W25N15-1	5,99
W25N15-2	7,14
W25N15-3	7,44
W25N15-4	7,39
W25N24-2	7,10
W25N24-4	5,86
W25N24-5	7,55
W25N24-6	7,76
W25S25-1	4,97
W25S25-2	5,72
W25S25-3	5,56
W25S25-4	4,47
W25S25-5	5,78
W25S25-6	6,17

Ek D : SLDB ve ÇTDB Numunelerin Deney Sonuçları**Çizelge D.1 : Silindir basınç dayanımı değerleri.**

Numune kodu	Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
RB-1	44
RB-2	42
RB-3	50
RB-4	50
ÇTDB-1	48
ÇTDB-2	52
ÇTDB-3	46
ÇTDB-4	50
SLDB-1	46
SLDB-2	44
SLDB-3	44
SLDB-4	44

Çizelge D.2 : Elastisite modülü değerleri.

Numune kodu	Elastisite Modülü (GPa)
RB-1	35
RB-2	36
ÇTDB-1	35
ÇTDB-2	36
ÇTDB-3	32
SLDB-1	33
SLDB-2	33
SLDB-4	35

Çizelge D.3 : Net eğilme dayanımı değerleri.

Numune kodu	Net eğilme dayanımı (MPa)
ÇTDB-1	6,13
ÇTDB-2	6,34
SLDB-1	5,53
SLDB-2	6,95
SLDB-3	5,88

Çizelge D.4 : Özgül kırılma enerjisi değerleri.

Numune kodu	Özgül kırılma enerjisi (N/m)
ÇTDB-1	2860
ÇTDB-2	3073
SLDB-1	1767

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Didem YAŞAR

Doğum Yeri ve Tarihi : Tokat 26.06.1986

Adres : dyasar@yildiz.edu.tr

Lisans Üniversite : Gazi Üniversitesi

