

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAKROSENTETİK VE ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN MEKANİK
DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cihat ÇAKIR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAKROSENTETİK VE ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN MEKANİK
DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Cihat ÇAKIR
(501101090)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101090 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Cihat ÇAKIR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**MAKROSENTETİK VE ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nabi YÜZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2013**

Savunma Tarihi: **6 Haziran 2013**

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımlarıyla yanımda olan değerli hocam Prof.Dr. Yılmaz Akkaya'ya ve Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir'e, ilgi ve yardımları dolayısıyla sayın hocam Ar.Gör. Cengiz Şengül'e, deneysel çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına, yaptıkları üretim desteklerinden dolayı İSTON Kalite Güvence Kontrol- AR-GE Müdürlüğü'ne ve Akçansa hazır beton santraline teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her zaman her konuda büyük desteklerini gördüğüm aileme, Doç. Dr. Fikret Dülger ve End. Müh. Ali Dülger'e ve yanımda olan bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Haziran 2013

Cihat ÇAKIR
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Liflerle İlgili Genel Bilgiler	3
2.1.1 Lif çeşitleri.....	4
2.2 Çimento Esaslı Kompozit Malzemeler	8
2.2.1 Normal dayanımlı betonlar	8
2.2.2 Yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonlar.....	8
2.3 Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitler	11
2.3.1 Çelik tel donatılı betonlar	13
2.3.2 Sentetik lifli betonlar.....	21
2.4 Silis Dumanı.....	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	25
3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı ve İçeriği	25
3.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	26
3.2.1 Çimento	26
3.2.2 Silis dumanı	26
3.2.3 Agregalar	27
3.2.4 Hiperakışkanlaştırıcı	28
3.2.5 Çelik lif.....	28
3.3 Beton Karışımları ve Numune Kodları.....	29
3.4 Numune Boyutları	30
3.5 Karışım Oranları.....	30
3.6 Taze Beton Deneyleri	31
3.6.1 Birim hacim ağırlık deneyi.....	31
3.6.2 Slump (Çökme) deneyi.....	32
3.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	32
3.7.1 Silindir basınç deneyi	32
3.7.2 Yarma çekme deneyi.....	32
3.7.3 Üç noktalı eğilme deneyi.....	33
3.7.4 Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımının belirlenmesi	34
4. ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN PERFORMANSA BAĞLI TASARIMI.....	35
4.1 Almanya Beton Birliği Yöntemi	36
4.2 Deney Sonuçlarının Alman Beton Birliği Yöntemi'ne Göre Değerlendirilmesi	38

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	41
5.1 Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	41
5.2 Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	43
6. GENEL SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR.....	49
EKLER.....	53
ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

ABBY	: Almanya Beton Birliği Yöntemi
ÇAAD	: Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton
DD	: Düşük Dayanımlı
DFRCC	: Sünek lif donatılı çimento esaslı kompozit
ECC	: Tasarlanmış çimento esaslı kompozit
FRC	: Lif donatılı beton
FRCC	: Lif donatılı çimento esaslı kompozit
FRM	: Lif donatılı harç
GPa	: Ciga Paskal
HPFRCC	: Yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozit
MPa	: Mega Paskal
NDB	: Normal Dayanımlı Beton
NDÇT	: Normal Dayanımlı Çelik Tel
PÇ	: Portland Çimentosu
RILEM	: Reunion Internationale des Laboratoires d’Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions
RPC	: Reaktif pudra betonu
SD	: Silis Dumanı
SFRC	: Steel Fibre Reinforced Concrete – Çelik Lif Takviyeli Betonlar
SIFCON	: Yüksek oranda kısa kesilmiş çelik tel içeren çimento bulamacı
SIMCON	: Yüksek oranda ağ şeklinde çelik tel içeren çimento bulamacı
S/B	: Su/Bağlayıcı oranı
TS	: Türk Standartları
YD	: Yüksek Dayanımlı
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
YDÇT	: Yüksek Dayanımlı Çelik Tel

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Farklı çelik tip örnekleri.....	6
Çizelge 2.2 : Çeşitli sentetik liflerin özellikleri	7
Çizelge 2.3 : Bazı cam liflerinin özellikleri	8
Çizelge 2.4 : Normal dayanımlı beton (NDB) ve yüksek dayanımlı betonların (YDB) mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	10
Çizelge 2.5 : Çeşitli malzemelerin incelikleri	22
Çizelge 3.1 : Kullanılan çimentonun özellikleri.	26
Çizelge 3.2 : Numunelerde kullanılan silis dumanının özellikleri.	26
Çizelge 3.3 : Çelik lifli betonların üretiminde kullanılan agregaların özellikleri.	27
Çizelge 3.4 : Sentetik lifli betonların üretiminde kullanılan agregaların özellikleri.	27
Çizelge 3.5 : Düşük dayanımlı kancalı uçlu çelik telin özellikleri.....	29
Çizelge 3.6 : Yüksek dayanımlı kancalı uçlu çelik telin özellikleri.....	29
Çizelge 3.7 : Çelik lifli numunelerde kullanılan çelik tel miktarları.....	30
Çizelge 3.8 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin gerçek beton bileşimleri.	31
Çizelge 3.9 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin gerçek beton bileşimleri.	31
Çizelge 4.1 : Çelik lif donatılı betonlar için ABBY'ye göre şekil değiştirme bölgeleri.....	36
Çizelge A.1 : Kiriş numunelerinden elde edilen kırılma enerjisi değerleri.	54
Çizelge A.2 : Kiriş numunelerinden elde edilen eğilme dayanımı değerleri.....	54
Çizelge A.3 : Kiriş numunelerinden elde edilen KSD ve TSD'ye göre eşdeğer gerilme, dayanım sınıfı ve artık gerilme değerleri.....	55
Çizelge A.4 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerinden elde edilen çatlak ağzı açılma deplasmanlarına göre kırılma enerjisi değerleri.	56
Çizelge A.5 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerinden elde edilen çatlak ağzı deplasmanlarına göre kalan eğilme dayanım ve net eğilme dayanımları değerleri.	56
Çizelge A.6 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerinden elde edilen KSD ve TSD'ye göre eşdeğer gerilme, dayanım sınıfı ve artık gerilme değerleri.	57
Çizelge B.1 : S/Ç oranı 0,38 olan çelik lifli betonlara ait silindirik basınç dayanımı değerleri.	69
Çizelge B.2 : S/Ç oranı 0,38 olan çelik lifli betonlara ait elastisite modülü değerleri.	69
Çizelge B.3 : S/Ç oranı 0,60 olan lifli betonlara ait silindirik basınç dayanımı değerleri.	70
Çizelge B.4 : S/Ç oranı 0,60 olan lifli betonlara ait elastisite modülü değerleri.	70
Çizelge C.1 : S/Ç oranı 0,38 olan çelik lifli betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri.	71

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Çimento esaslı kompozitlerin sınıflandırılması	12
Şekil 2.2 : ÇTDB için tipik yük-sehim eğrisi	16
Şekil 2.3 : Farklı çelik lif tipleri	17
Şekil 2.4 : ÇTDB’da kullanılan çelik tel tipinin yük-sehim eğrisine etkisi.....	17
Şekil 2.5 : Çelik tel donatılı betonlarda tel içeriği ve tel narinliğinin yük-sehim eğrisine etkisi	18
Şekil 2.6 : Çatlak köprülenmesine farklı tel boyutlarının etkisi	19
Şekil 2.7 : Farklı tipteki çelik tellerle üretilmiş beton kirişlerin yük sehim eğrileri..	20
Şekil 2.8 : Çimento hamurunda silis dumanının doldurma etkisi	21
Şekil 2.9 : Silis dumanı tane boyu dağılımı	22
Şekil 3.1 : Deneysel programın şematik gösterimi.	25
Şekil 3.2 : Çelik lifli betonlarda kullanılan agregaların granülometri eğrisi.	28
Şekil 3.3 : Sentetik lifli numunelerde kullanılan agregaların granülometri eğrisi.	28
Şekil 3.4 : Numunelerin boyut ve şekilleri.	30
Şekil 3.5 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.	33
Şekil 3.6 : Yük-sehim eğrisinin temsili gösterimi.	34
Şekil 4.1 : ABBY’ye göre tanımlanan şekil değiştirme bölgeleri [40].	37
Şekil 4.2 : Farklı su/çimento oranları için, (a) KSD ve (b) TSD için eşdeğer eğilme dayanımı – çelik tel hacmi grafikleri	37
Şekil 4.3 : Su/çimento oranı 0,38 olan çelik lifli kiriş numunelerinin KSD ve TSD değerleri-eşdeğer eğilme dayanımı grafiği.	38
Şekil 4.4 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin KSD ve TSD değerleri enerji grafiği.	38
Şekil 4.5 : Su/çimento oranı 0,60 olan kiriş numunelerinin enerji grafiği.	39
Şekil 4.6 : Su/çimento oranı 0,60 olan kiriş numunelerinin KSD ve TSD’ye göre eğilme dayanımı grafiği.	39
Şekil 5.1 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin silindir basınç deney sonuçları.	41
Şekil 5.2 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin silindir basınç deney sonuçları.	42
Şekil 5.3 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin elastisite modülü sonuçları.....	42
Şekil 5.4 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin elastisite modülü sonuçları.....	43
Şekil 5.5 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin yük-sehim eğrileri.....	43
Şekil 5.6 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin yük-sehim eğrileri.....	44
Şekil 5.7 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri.	44
Şekil 5.8 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri.	45
Şekil 5.9 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.	45
Şekil 5.10 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.	46
Şekil A.1 : Su/çimento oranı 0,38 olan yalın numunelere ait yük-sehim grafikleri...58	
Şekil A.2 : Su/çimento oranı 0,38 olan 20 kg düşük dayanımlı çelik tel içeren numunelere ait yük-sehim grafikleri.....58	

Şekil A.3 : Su/çimento oranı 0,38 olan 30 kg düşük dayanımlı çelik tel içeren numunelere ait yük-sehim grafikleri.....	59
Şekil A.4 : Su/çimento oranı 0,38 olan 20 kg yüksek dayanımlı çelik tel içeren numunelere ait yük-sehim grafikleri.....	59
Şekil A.5 : Su/çimento oranı 0,38 olan 30 kg yüksek dayanımlı çelik tel içeren numunelere ait yük-sehim grafikleri.....	60
Şekil A.6 : Su/çimento oranı 0,38 olan yalın kiriş numunelerinin yük- çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri.	60
Şekil A.7 : Su/çimento oranı 0,38 olan 20 kg düşük dayanımlı çelik tel içeren kiriş numunelerinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri.	61
Şekil A.8 : Su/çimento oranı 0,38 olan 30 kg düşük dayanımlı çelik tel içeren kiriş numunelerinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri.	61
Şekil A.9 : Su/çimento oranı 0,38 olan 20 kg yüksek dayanımlı çelik tel içeren kiriş numunelerinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri.	62
Şekil A.10 : Su/çimento oranı 0,38 olan 30 kg yüksek dayanımlı çelik tel içeren kiriş numunelerinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri.....	62
Şekil A.11 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin eğilme dayanımlarının grafikleri.	63
Şekil A.12 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin enerjilerinin grafikleri.	63
Şekil A.13 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin enerji - çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri.....	64
Şekil A.14 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin artık gerilme – çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri.	64
Şekil A.15 : S/Ç oranı 0,60 olan lifsiz kiriş numunelerine ait yük- sehim grafiği.	65
Şekil A.16 : S/Ç oranı 0,60 olan naylon lifli kiriş numunelerine ait yük- sehim grafiği.	65
Şekil A.17 : S/Ç oranı 0,60 olan makrosentetik lifli kiriş numunelerine ait yük- sehim grafiği.	66
Şekil A.18 : S/Ç oranı 0,60 olan lifsiz kiriş numunelerine ait yük- çatlak ağzı açılma deplasmanı grafiği.	66
Şekil A.19 : S/Ç oranı 0,60 olan naylon lifli kiriş numunelerine ait yük- çatlak ağzı açılma deplasmanı grafiği.	67
Şekil A.20 : S/Ç oranı 0,60 olan makrosentetik lifli kiriş numunelerine ait yük- çatlak ağzı açılma deplasmanı grafiği.	67
Şekil A.21 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerine ait çatlak ağzı açılma deplasmanına göre artık gerilme grafiği.	68
Şekil A.22 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerine ait KSD ve TSD'ye göre kırılma enerjileri grafiği.....	68

SEMBOL LİSTESİ

A_{lig}	: Etkin kesit alanı (m ²)
B	: Numunenin kesit genişliği (mm)
d	: Lif çapı
D	: Numunenin seçilen en kesit ölçüsünü (mm)
E	: Elastisite modülü (KN/ mm ²)
f_{ct}	: Yarma-çekme dayanımı (MPa)
g	: Yer çekim ivmesi
l	: Lif uzunluğu
L	: Mesnetler arası mesafe (mm)
P	: Kırılma yükü (N)
V_f	: Lif hacmi
W₀	: Yük-sehim eğrisi altında kalan alan (J/m ²)
δ₀	: Kirişin göçme anındaki son sehim değeri

MAKROSENTETİK VE ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞI

ÖZET

Son yıllarda beton teknolojisinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. 30-40 yıl öncesinde betonun basınç dayanımı en fazla 40 MPa iken, günümüzde basınç dayanımı 60-115 MPa arası değişen yüksek dayanımlı betonlar üretilmektedir.

Yüksek dayanımlı beton, üstün özelliklerine rağmen gevrekliği ile göze çarpan bir yapı malzemesidir. Bu olumsuz durum betonun enerji yutma yeteneği azaltmaktadır. Ayrıca yüksek dayanımlı betonlar geçirimsiz olduklarından yangına karşı dayanıksız oldukları bilinmektedir. Bu olumsuz özellikleri ortadan kaldırmak için yüksek performanslı betonlara çeşitli lifler katılması fikri ortaya çıkmıştır.

Yüksek performanslı beton üretiminde çelik lifler, sentetik lifler, polimer esaslı lifler ve cam lifleri gibi lifler kullanılmaktadır. Bu liflerin eklenmesiyle betonun mekanik özellikler önemli ölçüde artmaktadır. Lifli betonda lifsiz betona göre oluşan en önemli performans artışı, kırılma esnasında enerji yutma kapasitesinin artmasından kaynaklanmaktadır.

Bu tez çalışmasında farklı su/çimento oranlarındaki betonlara birbirlerinden farklı özellikteki naylon, makrosentetik ve çelik lifler farklı miktarlarda katılarak deney numuneleri üretilmiştir. Bütün karışımlar için standart basınç ve elastisite modülü deneyleri için 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde silindirik beton numuneleri üretildi. Yarmada çekme deneyleri için 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde silindirik numuneler 2'ye bölünerek ve kırılma enerjisi ve eğilme dayanımlarını belirlemek için üç noktalı eğilme deneyi uygulanmak üzere ise 600 mm uzunluğunda 150x150 mm kesitinde kırış numuneler hazırlandı.

Deneyler sonucunda elde edilen değerler Alman Beton Birliği Yönteminde belirtilen kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumu değerlerine göre hesaplandı.

Değişik oran ve özellikte lif içeren ve farklı su/çimento oranına sahip betonların basınç dayanımları, elastisite modülleri, yarmada çekme dayanımları, kırılma enerjileri, eğilme dayanımları lif içermeyen betonlarla karşılaştırılarak Alman Beton Birliği Yöntemine göre mekanik davranış ve özellikleri değerlendirildi.

Çelik lif kullanılarak üretilen betonların kırılma enerjileri ve eğilme dayanımlarının naylon ve makrosentetik lifler kullanılarak üretilen betonlara kıyasla çok daha fazla oldukları belirlenmiştir. Çelik lifli betonlarda lifin dayanımının artmasından çok lif içeriğinin artmasının sünekliği daha fazla arttırdığı gözlemlenmiştir. Naylon ve makrosentetik liflerin aynı oranda S/Ç oranı 0,60 olan numunelere katılmasının kırılma enerjisini aynı miktarda etkilediği belirlenmiştir.

MECHANICAL BEHAVIOR OF MACROSYNTHETIC AND STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

SUMMARY

In the recent years significant progresses have been recorded in concrete technology. Only 30-40 years ago, the maximum compressive strength was about 40 MPa. Nowadays, high strength concrete (60-115 MPa) can be produced and used commonly.

The main difference between high strength concrete and normal strength concrete relates to the compressive strength that refers to the maximum resistance of a concrete sample to applied pressure. High strengths are made possible by reducing porosity and microcracks in the hydrated cement paste and the transition zone. The densification of the interfacial transition zone allows for efficient load transfer between the cement mortar and the coarse aggregate, contributing to the strength of the concrete. For very high-strength concrete where the matrix is extremely dense, a weak aggregate may become the weakest part in concrete strength.

Low W/C ratios and the use of cementitious materials such as silica fume make concrete mixes significantly less workable, which can be a problem in high strength concrete applications. Typically high strength concretes have low water-cementing materials ratio of 0.20 to 0.45. To obtain higher strength mixtures with good workability, it is necessary to be careful to the cement composition and fineness and its compatibility with the chemical admixtures. Superplasticizing admixtures are added to high performance concrete mixtures to produce workable mixtures. In high strength concrete the aggregate plays an important role on the strength of concrete (esp. aggregate strength). High strength concrete can be produced with different types of aggregates, rounded aggregates may tend to exhibit aggregate bond failure at low strengths. Bond strength between smaller aggregates is greater than between larger aggregates and for that reason smaller size aggregates tend to give better results. The ultimate deformation of high strength concrete decreases with the increasing strength.

High performance concrete's properties are high strength, high early strength, high modulus of elasticity, high abrasion resistance, high durability and long life in severe environments, low permeability and diffusion, resistance to chemical attack, high toughness and impact resistance, volume stability, ease of placement, compaction without segregation, inhibition of bacterial and mold growth. On the other hand, high performance concrete that has high strength and durability have also some disadvantages. The most important disadvantage is brittleness. This problem is

related with high strength concrete has low energy absorption capacity. Also low fire resistant capacity is another disadvantage of high performance concrete because of low porosity. The other problem is the decreasing of strength over time. These problems can be handled by using different types and quantities of fibres in high strength concrete. Fibers are usually used in concrete to control cracking due to plastic and drying shrinkage. They also reduce the permeability of and thus reduce bleeding of water. Generally fibers do not increase the flexural strength of concrete, and so can not replace resisting or structural steel reinforcement. This reinforcement also effects positively the compressive and tensile strength of high performance concrete.

The most common used fibres are steel fibres, polypropylene and glass fibres. The addition of fibres significantly improves many of the mechanical properties of concrete, especially toughness. The performance of fibre reinforced concrete compared to its unreinforced counterpart comes from its improved capacity to absorb energy during fracture. In high performance concretes like steel, polymeric and glass fibers are used. The risk of spalling can be reduced by the addition of polypropylene or steel fibres to the concrete. Polypropylene fibres have been found to be particularly effective, although the mechanism by which they prevent spalling is not well understood. Under fire conditions the fibres will melt, but it has been suggested that they form voids or micro-cracks in the concrete which effectively relieve the pressure from the expanding steam and moisture mixture.

Steel fibres provide some reinforcement to the outer part of the concrete, tying it into the main body of the member and again limiting spalling. In addition, the behaviour of high strength concrete in fire is particularly influenced by the choice of aggregate. The uniform distribution of short fibers can increase the strength and ductility of the composite. Long fibers are needed to bridge discrete macrocracks at higher loads; however the volume fraction of long fibers can be much smaller than the volume fraction of short fibers. The presence of long fibers significantly reduces the workability of the mix.

Fiber reinforced concretes can be used for thin sheets, shingles, roof tiles, pipes, prefabricated shapes, shotcrete, curtain walls, slabs, vaults, impact resisting structures.

Polypropylene and nylon fibers can improve; mix cohesion, pumpability over long distances freeze-thaw resistance, resistance to explosive spalling, impact resistance, resistance to plastic shrinkage. Steel fibers can improve; structural strength, ductility, impact and abrasion resistance, freeze-thaw resistance, durability. At the higher dosage levels the macro synthetic fibers are designed to perform post-first crack relative to externally applied loads. Macro synthetic fibres can be used to provide the concrete with significant post-cracking capacity and hence can be used in some designs based on plastic analysis, such as for ground supported slabs and for rock support using sprayed concrete. When subjected to fire, macro fibres will soften as the temperature rises. They will lose their mechanical properties and will no longer provide structural capacity. It is important to avoid the use of macro synthetic fibres to provide structural capacity which may be lost in the event of fire. For both the modulus of elasticity and the standard compressive tests cylinders of 150 mm in diameter and 300 mm height were produced for all mixtures. Also cylinder specimens were used for the splitting tensile test. Disc specimens sizes are 150 mm in diameter and 300 mm in height were produced and the beams prepared for the

for the fracture energy tests were 600 mm in length and 150 mm x 150 mm in cross section.

The main objective of the research is to find out the mechanical behavior of concretes containing steel, nylon and macrosynthetic fibres with different volume fraction and two different water/cement ratio. Compressive strength, modulus of elasticity, splitting tensile strength, fracture energy and net bending strength of concretes with steel, nylon and macrosynthetic fibre are compared to plain concrete.

The fracture energy and bending strength are also compared with the fiber reinforced concrete method for steel of German Concrete Institute. Fracture energy of plain concrete (matrix) with the water/cement ratio of 0,38 increased up to 20 times owing to the addition of steel fibres. Fracture energy of concrete with nylon and macrosynthetic fibres also increased but at low levels according to steel reinforced concrete.

Thus, the steel reinforced concrete shows a behavior of enhanced toughness and ductility when compared to the matrix however the net bending strength does not effects notably. Compressive strength and elasticity modulus of the specimens do not effect with the addition of fibers. Splitting tensile strength increased with the addition of steel fibers to specimens which have W/C ratio of 0,38.

1. GİRİŞ

Beton en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. “Beton”, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir [1].

Betonun düşük maliyeti, kolaylıkla ulaşılabilir bir malzeme olması ve basınç dayanımının yüksek olması gibi üstün özelliklerinin yanında düşük çekme mukavemeti ve gevrek bir malzeme olması gibi sakıncalı mekanik özelliklere sahiptir.

Betonda yüksek dayanım tek başına yeterli bir ölçüt değildir. Yüksek dayanım özellikleri yanında, durabilite şartlarını da sağlayan yüksek performanslı beton tasarımı son yıllarda önem kazanmış ve bu konuda önemli gelişmeler kaydedilmiştir

Son yıllarda beton teknolojisinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Buna bağlı olarak günümüzde küp basınç dayanımları 200-800 MPa, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında değişen ve kırılma enerjileri 30000 J/m²'yi aşan yüksek performanslı betonlar üretilmektedir. Bu tür betonlar Reaktif Pudra Betonu (RPB) olarak adlandırılmakta, süneklikleri normal betonlarınkine kıyasla 300 kat daha fazla olabilmekte ve SIFCON' da ise (matrisi; ince kum, silis dumanı, su ve çimentodan oluşan hacmen %20'ye kadar çelik tel içeren beton) kırılma enerjisi normal betonunkinin 1350 katına kadar çıkmaktadır [2].

Yüksek dayanımlı betonların en büyük sorunu gevrekliktir. Reaktif pudra betonlarında, betona kısa kesilmiş çelik lif katılması ile yüksek dayanımın yanı sıra yüksek süneklik de elde edilebilir. Bu betonlarda, lif içeriğine ve lif narinliğine bağlı olarak çok yüksek kırılma enerjisine ve yüksek sünekliğe (şekil değiştirme yeteneği) erişilmektedir. Süneklikle birlikte darbe dayanımının ve enerji yutma kapasitesinin artması askeri yapılar, bazı önemli prefabrike elemanlar, endüstriyel zeminler, ağır

trafiğin söz konusu olduğu özel durumlarda reaktif pudra betonlarını cazip hale getirmektedir [3].

Ülkemizde ilk olarak lifli beton aktif olarak asbestli çimento kullanımıyla başlamıştır. Asbestin sağlığa zararlı bir malzeme olmasından dolayı asbestin yerine daha farklı liflerin kullanımı sonucunu doğurmuştur. Bununla beraber farklı lif çeşitlerinin betonun içerisindeki etkileri araştırılmıştır.

Bu tez kapsamında farklı miktar ve özellikteki çelik ve sentetik lifler kullanarak elde edilen kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için sabit su/bağlayıcı oranında farklı çelik lif dayanımına sahip liflerden farklı miktarlarda ayrı ayrı kullanarak çelik lifli beton numuneleri üretilmiştir. Çelik lifli beton numunelerinden farklı su/bağlayıcı oranına sahip makrosentetik ve naylon lifler kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir. Bu numunelere silindir basınç, yarmada çekme ve RILEM üç noktalı kırılma enerjisi deneyleri uygulanmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER

Beton; çimento, beton agregası, su ve uygun katkı maddelerinin hesaplar neticesinde, belirli oranlarda homojen olarak karıştırılması ile elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidrasyonu sebebiyle katılaşp, istenilen şekli alarak sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir [4].

1824 yılında Joseph Aspdin tarafından portland çimentosunun üretilmesiyle beraber beton ile ilgili çalışmalar XIX. yy başlarında başlamıştır.

Beton ve çeliğin birlikte kullanılması fikrini ilk ortaya atan kişi ABD’li T.Hyatt olmuştur. Hyatt, 1850’lerden itibaren betonarme üzerinde sürdürdüğü çalışmalarını 1877 yılında yayımlamış, bunu Avrupa’da bu alanda yapılan birçok çalışmanın sonuçlarının yayınlaması izlemiştir. Teller ve liflerle donatılı betonlarla ilgili ilk çalışmalar yine J.Lambot’un 1847 yılındaki patentlerine dayanmaktadır. Lifli betonla ilgili çalışmalar ise 1960’lı yıllarda A.Berard tarafından yapılmıştır [5].

Eski çağlarda insanlar bitkisel veya hayvansal kaynaklı lifleri yapılarda kullanmışlardır. Bunun en iyi örneklerinden biri kerpiçten yapılan evlerdir. Kerpiç malzemesinin üretiminde kullanılan killi çamura bitkisel lifler ilave edilerek malzemenin dayanımı artmaktadır.

2.1 Liflerle İlgili Genel Bilgiler

Lif; bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan her çeşit malzemeyi belirtmektedir. Lifler genelde yeterli basınç dayanımına sahip olan fakat çekme, darbe dayanımı, eğilme dayanımı gibi özellikleri zayıf olan malzemelerin bu olumsuz özelliklerinin güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu sayede kırılğan olan malzememiz daha sünek davranış gösterme özelliğine sahip olmaktadır.

Asbest lifleri çimentolu kompozitlerin güçlendirilmesinde bundan 100 yıl öncesinde, selülozik lifler 50 yıl öncesinde kullanılmaya başlanmıştır. Çelik, polipropilen ve cam lifleri ise son 30 yıldır kompozitlerin güçlendirilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [6].

Birçok sebepten dolayı betonda çatlaklar oluşabilir. Bunlar yapısal, çevresel ya da ekonomik sebepler gibi etmenlerden kaynaklanabilir. Fakat çoğu zaman malzemenin kendi iç yapısından kaynaklanan güçsüzlük sonucu çekme kuvvetlerine karşı gelememesinden kaynaklanmaktadır.

Liflerle kompozit malzemenin zayıf kalan çekme, eğilme, darbe dayanımları gibi özelliklerinin iyileştirilip malzemenin sünekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

2.1.1 Lif çeşitleri

Üretim biçimleri ve kullanım alanlarına göre farklı tipte lifler vardır. Lifler genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Doğal lifler
 - Bitkisel lifler
 - Hayvansal lifler
 - Mineral lifler
- Sentetik lifler
 - Polimer lifler
 - Metalik lifler
 - Seramik lifler

2.1.1.1 Doğal lifler

Lifli kompozitlerin en eski uygulama şekli doğal lifler kullanılarak elde edilenlerdir. Bu kompozitlerin elde edilmesinde ve yapısal anlamda kullanılabilen lifler; kenevir, saman, kenaf, pamuk, bambu, mantar, jüt, ahşap, şeker kamışı gibi liflerdir [7]. Çimento esaslı kompozitlerde kullanılan tahta lifler, şeker kamışı ve bambu ağacından elde edilmektedir. Bu lifler düşük maliyet gerektiren uygulamalarda tercih edilebilir. Bunun yanında bu lifler yapısal anlamda kullanıldıklarında alkali ortamlarda mekanik özelliklerini yitirmeleri en olumsuz özelliğidir. Bu olumsuz durumun önüne geçebilmek için betonun alkalinitesini azaltacak katkıları kullanmak gerekir. En az hacmin %3'ü kadar kullanılması durumunda bu durumun önüne geçilebilmektedir [7].

2.1.1.2 Metalik lifler

En başta metallerin plastik şekil değiştirme özelliğinin fazla olmasının avantajı kullanılarak metalik lifler birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Metalik lifler; uçaklarda, gaz borularında, petrol tesislerinde ve günlük hayatta birçok alanda kullanılmaktadır. Hammadde olarak alüminyum, karbon çeliği, paslanmaz çelik, bakır gibi metaller kullanılır. Yapısal anlamda betonla birlikte en çok kullanılan çelik liflerdir. Çelik lifin tipine ve üretim şekline bağlı olarak çekme dayanımları 345-2100 MPa arasında, nihai uzamaları ise %0,5-%35 arasında değişmektedir [8].

Çelik lif tipleri TS 10513'e göre şu şekilde sınıflandırılmıştır [9]:

A sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyli lifler

B sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş lifler

- Üzerinde çentikler olan lifler
- Uzunluğu boyunca dalgalı(kıvrımlı) lifler
- Ay biçimli dalgalı lifler

C sınıfı: Kancalı uçlu lifler

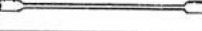
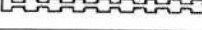
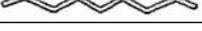
- İki ucu kancalı lifler
- Tek ucu kancalı lifler

TS 10513'de çelik liflerin özellikleri ile ilgili en önemli iki parametre:

- Liflerin çekme-kopma gerilmesinin ortalaması en az 345 N/mm² olmalıdır. Her bir lif için çekme-kopma gerilmesi 310 N/mm² 'den az olmamalıdır.
- 16±2 °C 'lık ortamda, 3.18 mm'lik bir iç çap çevresinde yapılan lif eğilmede, deneye tabi tutulan liflerin % 90'ının kırılmaksızın 90 derece eğilme yapabilmesi koşuludur.

Bu özellikler liflerin daha sünek ve çekme dayanımlarının daha yüksek olmasını sağlar.

Çizelge 2.1: Farklı çelik tip örnekleri

En kesit	Yuvarlak	
	Yassı	
	Yarı yuvarlak	
Biçim ve deformasyonlar	Düz	
	Dalgalı	
	Kancalı uçlu	
	Genişletilmiş uçlu	
	Çarpık	
	Yassı uçlu	
	Deforme edilmiş	
	Zikzak biçimli	

2.1.1.3 Polimerik (Sentetik) lifler

Polimerik lifler, 20.yy ikinci yarısında çok büyük ilerlemeler göstermiştir. Lif çağı olarak adlandırılabilir dönem 1930'ların sonları ve 1940'ların başlarında naylon ve polyester gibi sentetik liflerin keşfiyle başlamıştır.

Sentetik lifler özellikle petro-kimya ve tekstil endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıcaları; naylon, aramid, akrilik, karbon, polyester, polietilen ve polipropilen liflerdir.

Sentetik lifler çok yüksek dayanıma sahip olmalarına rağmen aramid dışında diğer liflerin elastisite modülleri düşük seviyelerdedir. Bu liflerin çaplarının mikro boyutlarda olması daha farklı alanlarda kullanım olanakları sağlamaktadır. Uzunlukları ise 12-50 mm arasında değişmektedir.

Aramid liflerin lifli betonların mekanik özelliklerini iyi düzeyde geliştirmektedir fakat maliyetinin yüksek olmasından dolayı kullanımı yaygın değildir.

Naylon, doğrusal poliamid tipi plastiklere verilen genel bir addır. Günümüzde betonda lif olarak kullanılan naylon 6 ve naylon 6.6 olmak üzere iki farklı lif tipi vardır.

Polipropilen lifler hidrofobik yapıda olmalarından dolayı betonda kullanılması durumunda çimento matrisi ile zayıf bağ meydana getirmesine neden olmaktadır. Ayrıca bu yapısından dolayı diğer sentetik liflere göre daha düşük elastisite modülüne sahiptir. Polipropilen liflerin bu olumsuz özellikleri yük etkisi altında plastik şekil değiştirme meydana gelmesine neden olurlar.

Doğal ve sentetik olarak polimerik lifler iki grupta değerlendirilebilir. Pamuk, kenevir, yün, deri gibi maddeler doğal liflere örnek olarak verilebilir. Bunlar genellikle doğada polimer yapıda bulunurlar.

Sentetik liflerin kompozit malzemeler içinde kullanım miktarları düşüktür (% 0,5-% 10). Harç ve betona katılmasıyla malzemenin çekme ve darbe dayanımı artar ve çatlak oluşumdan sonra sünek bir yapı gösterir [11].

Çizelge 2.2 : Çeşitli sentetik liflerin özellikleri [8].

Lif Tipleri	Çap (10^{-3} mm)	Özgül ağırlık (gr/cm^3)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Nihai Uzama (%)
Akrilik	20-350	1,16-1,18	0,2-1,0	14-19	10-50
Aramid(Kevlar)	10-12	1,44	2,3-3,5	63-120	2-4,5
Naylon	23-400	1,14	0,75-1,0	4,1-5,2	16-20
Polyester	10-200	1,34-1,39	0,23-1,2	10-18	10-50
Polietilen	25-1000	0,92-0,96	0,08-0,60	5,00	3-100
Polipropilen	20-400	0,9-0,95	0,45-0,76	3,5-10	15-25

2.1.1.4 Cam lifleri

Cam lifleri yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahip olmalarına rağmen kırılğan bir yapıdadır. Araştırmalar sonucunda hacimce %5'e kadar topraklanma olmadan cam liflerinin kum ve çimentodan yapılan harçlarda kullanım imkanı vardır.

Cam lifleri, korozyona dayanıklılık, sertlik ve diğer malzemelerle tepkimeye girmeme gibi özellikler gösterir. Yüksek dayanıma sahip olduklarından, lif yüzeyinde oluşan kusurlar hem sayıca az, hem de boyutça küçüktür. E tipi cam lifleri ekonomik olduklarından yüksek çekme dayanımı ve kimyasal direncin gerekli olmadığı yerlerde sıklıkla kullanılmaktadır. S tipi cam lifleri yüksek çekme

dayanımlarına sahip olmakla beraber E tipi cam liflerinden 4–5 kat daha pahalıdır. C tipi cam lifleri ise korozyona dayanım istendiğinde kullanılmaktadır.

Cam liflerinin özellikle E tipi cam lifinin alkali ortamlarda kullanılması dayanım ve süneklik özelliklerinin kaybolmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı alkalinitesi yüksek ortamlarda kullanılması için 1960’lı yıllarda %16 zirkonyum içeren cam lifi üretilmiştir ve ticari olarak 1971’de İngiltere’de satılmaya başlanmıştır. 1980’larda daha ise bu yüksek oranda zirkonyum içeren cam lifleri, alkali ortamlara karşı dayanıklı çimento ürünleri geliştirilip bu çimento ürünleri yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [7].

Çizelge 2.3 : Bazı cam liflerinin özellikleri [8].

Cam lif tipi	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E	2,54	1,7-3,5	69-72
S	2,48	2,0-4,5	85
C	2,48	1,7-2,8	70

2.2 Çimento Esaslı Kompozit Malzemeler

2.2.1 Normal dayanımlı betonlar

Normal dayanımlı betonlar genellikle yoğun beton agregası ile üretilen, etüv kurusu yoğunluğu 2,0-2,6 kg/dm³ arasında değişen betondur. Maliyetinin ucuzluğu, kolay ulaşılabilir olması gibi faktörlerden kullanımı en yaygın beton türüdür [4].

Normal betonlar basınç dayanımı 20 MPa-60 MPa, kırılma enerjileri 100-120 J/m² civarında olan, agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesi kullanılarak üretilen taşıyıcı yapı malzemesidir [12].

2.2.2 Yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonlar

Betonun sınıflandırılması zaman içerisinde bu alandaki gelişmeler neticesinde değişim göstermiştir. 1920’de 21 MPa, 1950’de 35 Mpa, 1970’de 40 MPa, son dönemde ise 60 MPa’dan fazla basınç dayanımına sahip betonlar yüksek dayanımlı

beton sınıfına dahil edilmektedir. Bu gelişme süperakışkanlaştırıcı katkıların ve özellikle silis dumanı gibi mikro incelikteki malzemelerin betonlarda kullanılmaya başlamasıyla başlamıştır. Bir betona yüksek dayanımlı/performanslı beton diyebilmek için yüksek dayanım, düşük geçirimlilik özelliklerini taşıması gerekmektedir.

Yüksek dayanımlı betonlar; iyi kalitede agrega, portland çimentosu ($450-550 \text{ kg/m}^3$), toplam bağlayıcı miktarının %5-15 arasında silis dumanı ve daima süperakışkanlaştırıcı katkı malzemesinin iyi bir şekilde karışımdan oluşmaktadır[13].

Normal dayanımlı betondan ziyade yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi maddelerin tane çapları çok küçük olduğundan çimento hamuru ve agrega arasındaki kılcal boşlukları gidermesi sonucu çimento hamuru ile agrega arasındaki aderansın daha artmasını sağlayarak betonun dayanımını arttırmaktadır. Geçirimliliği azaltmak için boşluk oranını düşürmek gerekmektedir bu da ancak karışımda silis dumanı gibi daha ince tanelerin kullanılmasıyla mümkün olmaktadır.

Düşük su/çimento oranından dolayı karışımın azalan işlenebilirliğini süperakışkanlaştırıcı katkı malzemeleri kullanılarak bu olumsuz durumun önüne geçilir [14].

Yüksek dayanımlı beton araştırmalarında; kırma taş agregasının akarsu agregalarına göre aderansının daha iyi olmasından dolayı basınç dayanımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu artışın, yaklaşık olarak %10 ile %30 arasında değiştiği belirtilmektedir. Kırma taş agregasının betonda kullanılması ile işlenebilirlik için ihtiyaç duyulan suyun yerine süper akışkanlık kazandırıcı katkı maddesi kullanılması zorunludur. Bu katkı maddeleriyle işlenebilmesi, yerleştirilmesi ve ilk günlerdeki dayanım artışının fazla olmasından dolayı kalıp alma süresi kısalmaktadır [4]. Yüksek dayanımlı betonların yapılarda kullanımı neticesinde yapının kolon boyutları azalacağından yapının taşıyıcı sistemi dışında daha fazla kullanım alanı kalacaktır [15]. Yüksek dayanımlı betonların düşük su/çimento oranına sahip olmalarından dolayı düşük geçirimliliğe sahip olan yüksek dayanımlı betonlar dış etmenlere karşı daha dayanımlı bir yapı gösterecek ve yapıların ekonomik ömürleri artacaktır [15].

Yüksek basınç dayanım yanında normal betona göre durabilitesi de daha fazla olan betondur. ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programına Göre Yüksek Performanslı Beton, dayanımı, durabilitesi ve su / bağlayıcı oranı bakımından aşağıdaki gibi tanımlanabilir : [16]

a) 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 dayanımlı beton)
- 28 günlük basınç dayanımı ≥ 70 MPa (çok yüksek dayanımlı beton)

b) Durabilite çarpanı $\geq \% 80$ (donma-çözülmenin 300 tekrardan sonra)

c) Su/bağlayıcı oranı $\leq 0,35$ olmalıdır [17].

Çizelge 2.4 : Normal dayanımlı beton (NDB) ve yüksek dayanımlı betonların (YDB) mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [12].

Mekanik Özellikler	NDB	YDB
Basınç Dayanımı (MPa)	20-60	60-115
Eğilme Dayanımı (MPa)	4-8	6-10
Kırılma Enerjisi (N/m)	100-120	100-130
Tepe noktasına karşı gelen şekil değiştirme (10^{-6})	1500-2000	2000-2500
Elastisite Modülü (GPa)	20-30	35-40

Yangına maruz kalan yüksek dayanımlı/performanslı betonlar geçirimsizliği yüksek olan çimento pastasında oluşan su buharının dışarı çıkışına izin veremedikleri için yangına karşı dayanıksızdır [14].

Bununla beraber yüksek dayanımlı betonların en önemli kusurlarından biri de yük altında gevrek kırılma özelliği göstermesidir. Bu olumsuz durum betona liflerin katılmasıyla betonun daha sünek davranış özelliği göstermesi sağlanarak ortadan kaldırılmaktadır.

2.3 Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitler

Normal beton çekme dayanımının düşük olmasının yanı sıra oldukça da kırılgan bir elemandır. Buna karşılık lifli beton içinde kullanılan liflerin sayesinde, beton çekme dayanımının artmakta dolayısı ile daha sünek bir malzeme haline gelmektedir [18]. ASTM C 1116-97'ye göre lif takviyeli betonlar 3'e ayrılmaktadır [19]:

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

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

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

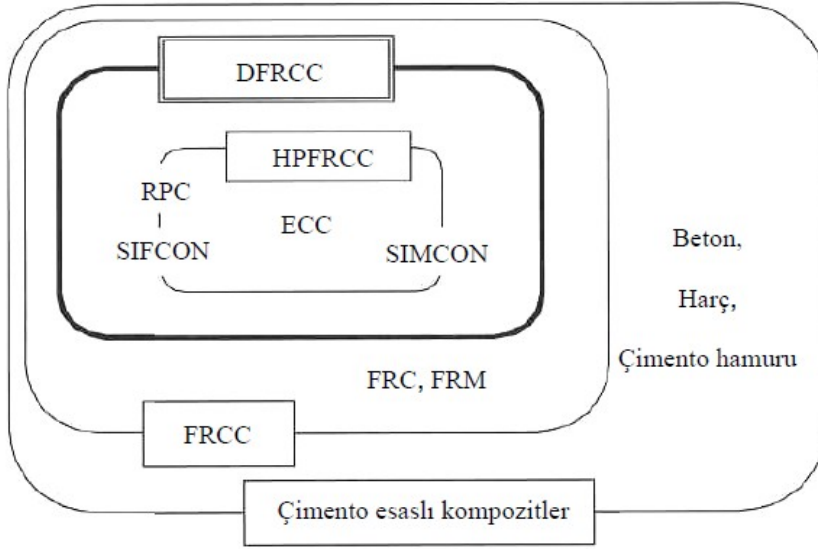
Çimento esaslı malzemelerle liflerin beraber kullanılmasıyla çimento matrisi güçlendirilir. Liflerin görevi, gerilme uygulanan çimento matrisindeki çatlak gelişimini engellemek veya geciktirmek, çatlağın hızlı ve kontrolsüz ilerleyişini yavaş ve kontrollü bir hale getirmektir [20]. Lif takviyesiyle darbe ve yorulma dayanımları artmakta, rötre miktarı düşmektedir [13].

Lifler betonun tokluğunu, eğilme dayanımını veya her ikisini birden arttırabilirler. Örneğin polipropilen lifler betonun tokluğunu dikkate değer bir şekilde artırırken çekme dayanımına çok az etki ederler, bununla birlikte polipropilen ve cam lifleri birlikte kullanılarak yüksek tokluk ve çekme dayanımına sahip betonlar üretmek mümkündür [5].

Lifli kompozitlerin özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden biri matris ve lif arasındaki etkileşimdir. Bu ilişkiyi şu parametreler etkilemektedir:

- Lif tipi
- Lif geometrisi
- Matrisin niteliği
- Lif yüzeyinin özellikleri
- Liflerin yönlendirilmesi
- Lif miktarı
- Yükleme hızı
- Matrisin elastisite modülüne göre lif elastisite modülünün kıyaslanması

Lif donatılı kompozitler en genel şekilde FRCC olarak ele alınabilir. FRCC hem lif takviyeli beton (FRC) ve lif takviyeli harç (FRM) gibi tüm lif donatılı malzemeleri kapsamaktadır.



Şekil 2.1: Çimento esaslı kompozitlerin sınıflandırılması [21].

FRCC'nin alt sınıfı olan sünek lif takviyeli çimento esaslı kompozitler (DFRCC) çekme ve basınç altında karmaşık çatlama gösteren bir sınıftır. Karmaşık çatlama süneklik, tokluk, kırılma enerjisi, şekil değiştirme kapasitesi ve çekme, basınç ve eğilme altındaki şekil değiştirme kapasitesi gibi özelliklerin gelişmesine yol açmaktadır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitler (HPFRCC) ise DFRCC sınıfının alt sınıfıdır. Mühendislik Özellikleri Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC), bileşimi mikromekanik esasına göre optimize edilmiş özel bir HPFRCC tipidir. ECC tipik olarak % 3'den daha fazla bir çekme şekil değiştirme kapasitesine sahiptir. Mikroyapı optimizasyonu sonucunda ECC'deki lif içeriği %2-3'den daha az olacak şekilde sınırlandırılmıştır [22]. Geleneksel lif donatılı çimento esaslı kompozitlerde lif hacmi genellikle %2 ile sınırlıdır. Yüksek oranda kesilmiş çelik lif içeren çimento harç bulamacı (SIFCON) ise lif hacmi %5'den %20'ye kadar değişen, özel bir lif donatılı kompozittir. Bu uygulamada çelik teller kalıpların içine yerleştirildikten sonra akışkan kıvamdaki matris fazı kalıpların içine doldurulmaktadır.

SIFCON bileşim olarak çimento, çimento-uçucu kül, çimento-silis dumanı, çimento-kum-uçucu kül veya çimento-kum-silis dumanı içerebilir, bu kompozit malzemenin matris fazı iri agrega içermemektedir. Geleneksel betonla karşılaştırıldığında SIFCON, 1500 kata varan oranlarda daha fazla enerji yutabilir. Yüksek oranda ağ şeklinde çelik tel içeren çimento bulamacı (SIMCON) üretiminde ise, farklı olarak çelik lif yerine ağ şeklindeki çelik tel önceden kalıba yerleştirilmektedir [22].

Lif donatılı betonlar günümüzde kaldırımlar ve yol kaplamaları, endüstriyel zeminler, su yapıları, köprülerin üst kaplamasında, güvenlik gerektiren yapılarda ve onarım amacıyla birçok alanda kullanılmaktadır [23].

2.3.1 Çelik tel donatılı betonlar

Gevrek bir malzeme olan beton genel olarak yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı, çatlak oluştuktan sonraki yük taşıma dayanımı ve enerji yutma kapasitesi açısından zayıftır [14].

Yüksek basınç dayanımına sahip yüksek performanslı betonların sakıncası gevrek bir yapıya sahip olmalarıdır. Betonun sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini arttırmak için kullanılabilecek yöntemlerden bir tanesi betona lif eklenmesidir [24].

Betonun üretimi sırasında karışıma eklenen çelik teller beton içinde uniform olarak ve rastgele yönlerde dağılırlar. Çelik teller birbirlerine su ile temasta kolaylıkla çözülebilen tutkalla bağlı olduklarından bu süre içinde beton içinde homojen dağılırlar.

Çelik teller betonun işlenebilirliğini etkiler ve çökme kaybına yol açabilir. Uygulamada, genellikle hacimce %0,25 ile %1 arasında değişen miktarlarda kullanılan çelik teller, yalın betonun çökme değerinin 25 mm ile 102 mm arasında değişen düzeyde azaltır [25].

Çelik tellerin betonda kullanımının yararları genel olarak şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton elde edilmesi
- Etkin çatlak kontrolü
- Donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin sağlanması
- Dayanıklılık
- Donatı işçiliğinde belirgin azalma

Çelik lif takviyeli betonlar için en önemli özellik eğilme altındaki davranışlarıdır. Çünkü çoğu uygulamalarda kompozit çeşitli eğilme yüküne maruz kalır. Lif katılması ile normal betonun eğilme direnci artırılır. Bütün durumlarda eğilme dayanımındaki artış, basınç ve yarmada çekme dayanımından fazladır. Lif miktarı ve narinliği bu artışta önemli rol oynar. Uzun lifler numune boyunca daha iyi yönlendirilerek, daha fazla dayanım artışına neden olurlar. Belirli lif tipinde daha yüksek narinlik oranına sahip olan lif, dayanımı daha çok artırır [22].

Lifsiz betonda başlangıçta gerilmenin artması ile meydana gelen çatlakların yayılması için gerekli enerji düşüktür ve genellikle böyle bir çatlakların başlatılması için gereken enerjinin yarısı kadardır. Beton içerisinde lif bulunması halinde ise başlangıçtaki mikro çatlak meydana getiren enerji lifler aracılığı ile çatlakların yanındaki sağlam çimento hamuru fazı bölgelerine aktarılır. Bu nedenler çatlakların yayılması ve büyümesi için daha fazla enerji gerekir. Böylece bir enerjinin bulunması bile bu enerjinin büyük bir bölümü lifler tarafından taşınır ve bu taşıma, liflerin çimento hamuru matrisinden çekilip sıyrılması için gerekli enerji seviyesine kadar devam eder. Bu enerjinin sağlanması için çok büyük bir kuvvet gereklidir. Nihai yüke ulaşıldıktan (beton kırıldıktan) sonra bile, bir miktar daha fazlasını da taşımaya devam ederler [5].

Farklı boyuttaki lifler mekanik özelliklerde farklı etkiler oluşturabilir. Örneğin, kısa boylu liflerin eklenmesi basınç dayanımında belirgin bir artış sağlarken yarma dayanımında bu artış düşük miktarda kalmaktadır [26].

Çelik teller beton içinde yüzey ve kenarlar da dahil olmak üzere homojen bir biçimde dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında, hidrasyon süreci malzeme içinde sayısız küçük rötre çatlaklarına neden olabilir. Çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına çelik teller karşı koyar; rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önlenir. Çelik tellerin betondaki esas etkisi ise çatlak sonrası davranışta görülmektedir. Eğer uygun bir karışım tasarlanırsa; ilk çatlak oluşuktan sonra matristeki rastgele dağılmış olan kısa çelik teller köprüleme etkisi ile çatlakların ilerlemesini önler. Tellerin betondan sıyrılması sırasında, çatlak genişlemesi geciktirilmiş ve çatlakların ilerlemesi önlenmiş olur. Tellerin matristen sıyrılarak çıkması fazla enerji gerektirdiğinden toklukta belirgin bir artış elde edilir [22]. Yüksek performanslı lifli betonlar da en büyük yük, ilk çatlak yükünü belirgin biçimde aşmakta olup, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında şekil değiştirme

sertleşmesi sergilenmektedir. Bunlara tipik örnek olarak reaktif pudra betonu (RPC) örnek olarak verilebilir. RPC'ler üstün mekanik ve fiziksel özelliklere, mükemmel sünekliğe ve aşırı derecede düşük geçirimsizliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı çelik tel içeren kompozitlerdir. Reaktif Pudra Betonları küp basınç dayanımları 200 ve 800 MPa arasında, çekme dayanımları 25 ve 150 MPa arasında ve kırılma enerjileri yaklaşık 30000 J/m^2 ve birim hacim ağırlıkları $2500\text{-}3000 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişen yeni kuşak betonları temsil etmekte olup, bu betonların süneklikleri normal betona kıyasla dikkate değer eğilme dayanımına ve oldukça yüksek sünekliğe sahiptirler [22].

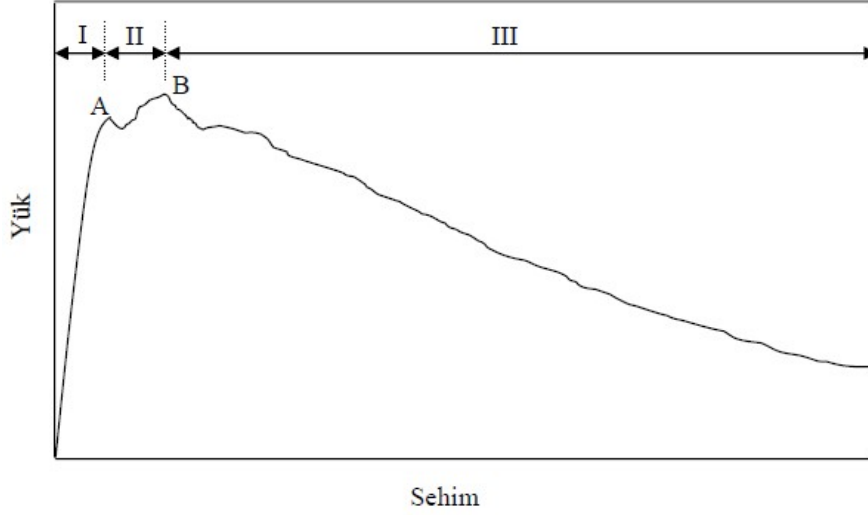
Şekil 2.2' de görülebilen ve eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisi üç kısımda incelenebilir:

1. Kısım: A noktasına kadar hemen hemen doğrusal bir davranış görülmektedir. Bu kısımdaki davranış tel-matris arayüz yardımıyla matristen tellere aktarılan gerilme transferini içermektedir. Bu bölgede gerilmeler, ilk çatlak dayanımı (orantılık sınırı) denilen ve matrisin çatladığı noktayı ifade eden yere kadar matris ve çelik teller tarafından taşınır.

2.Kısım: A noktası ve maksimum yükün olduğu B noktası arasında doğrusal olmayan bir geçiş bölgesi vardır. Çatlak sonrası oluşan bu bölgede gerilmeler tamamen çelik tellere aktarılır. Yükün artmasıyla çelik teller, B noktasındaki nihai eğilme dayanımına ulaşıncaya kadar doğrusal olmayan yük-sehim davranışı sergileyerek matristen sıyrılma eğilimi gösterirler. Bu nokta “tepe yükü” olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede şekil değiştirmeler belirgin biçimde yerelleşmektedir.

3.Kısım: Tepe yükü sonrası yük-sehim eğrisinin azalan kısmı tipik şekil değiştirme yumuşaması sergiler. Bu kısmın davranışı ve sehimin artmasıyla dayanımdaki ani olmayan azalma, çelik tellerin enerji yutma kapasitelerinin bir göstergesidir. Bu bölgenin davranışı ÇTDB'ları yalın betonlardan ayıran en önemli özelliktir.

Çelik tel ile beton dayanımının ÇTDB'ların eğilmede tepe yükü sonrası davranışındaki kalan dayanımları üzerinde önemli etkileri olduğu bilinmektedir. Şekil 2.2'de 2. Kısımda da görüldüğü gibi yüksek performanslı lifli betonlarda en büyük yük, ilk çatlak yükünü belirgin biçimde aşmakta olup, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında şekil değiştirme sertleşmesi sergilenmektedir.



Şekil 2.2 : CTDB için tipik yük-sehim eğrisi [27].

2.3.1.1 Çelik tel tipi

Betonlarda kullanılan çelik telleri sınıflandıran ASTM A 820-96'da çelik lifler 4 farklı sınıfta şu şekilde gruplandırılmıştır:

- Tip 1: Soğuk Çekilmiş Lifler
- Tip 2: Plakadan Kesilmiş Çelik Lifler
- Tip 3: Eritilip Çekilmiş Çelik Lifler
- Tip 4: Diğer Lifler

TS 10513'e göre ise 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

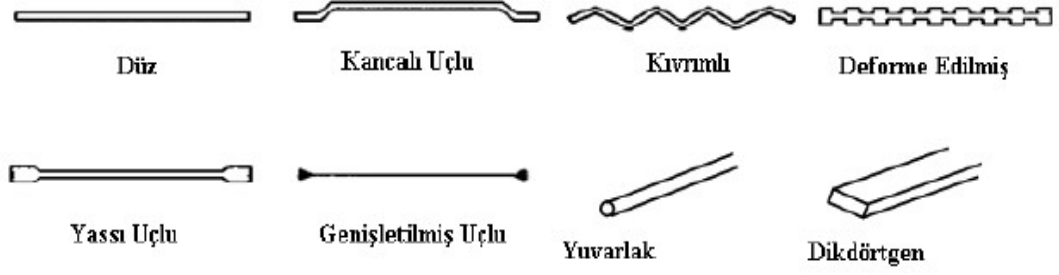
Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller

Tip 3: Ay biçimli dalgalı teller

C Sınıfı: Kancalı uçlu teller

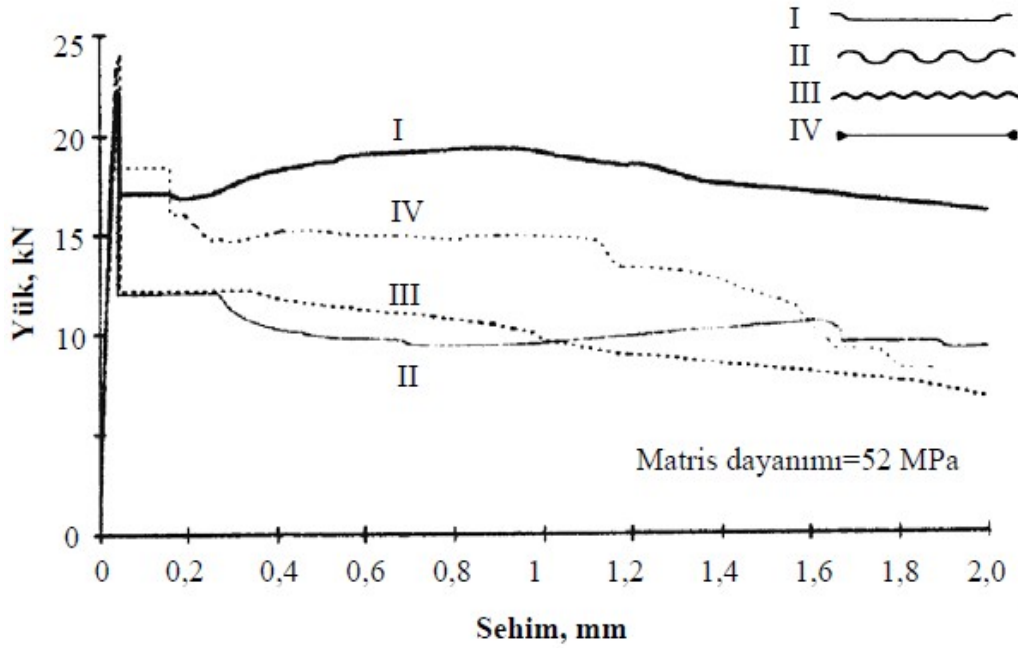
Tip 1: İki ucu kancalı teller

Tip 2: Tek ucu kancalı teller



Şekil 2.3 : Farklı çelik lif tipleri [28].

Yapılan çalışmalarda uçları kancalı liflerin enerji yutma kapasitesinin düz liflere oranla daha fazla olduğu belirlenmiştir. Uçları kancalı liflerin şekil değiştirme kapasitesinin, diğer liflerden daha fazla olmasından bu sonuç ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.4’ te de görüldüğü gibi aynı matris dayanımında kancalı uçlu çelik telin tokluğunun daha fazla olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.4 : ÇTDB’da kullanılan çelik tel tipinin yük-sehim eğrisine etkisi [29].

2.3.1.2 Çelik tel içeriği ve narinliği

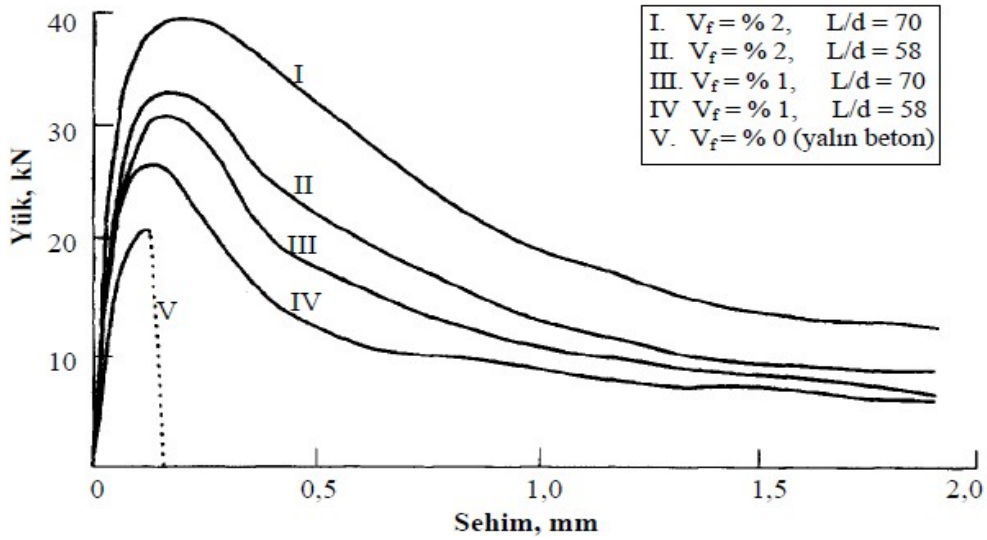
Betonda kullanılan çelik teller soğukta işlenmiş çeliklerden, çelik levhalardan veya diğer çeliklerden elde edilmektedirler. Bunların uzunlukları 75 mm ye kadar ulaşabilmekte olup narinlikleri de 20-100 arasında değişmektedir. Narinlik, çelik tel

boyunun tel çapına bölünmesiyle elde edilir ve telin beton ile temas yüzeyini ifade etmektedir [23].

Çelik tel tipi, tel narinliği (boy/çap), tel hacmi, tellerin matris içindeki yönlenmesi ve tellerin çekme dayanımı matris özellikleri ile birlikte çelik tel donatılı betonların performansını etkiler.

Deney sonuçları narinlik arttıkça işlenebilirliğin azaldığını fakat lif türünün işlenebilirliğe etkisinin dikkate alınmayacak kadar az olduğunu göstermektedir. İşlenebilirlik problemi ile karşılaşmamak için tel narinliğinin 100, tel içeriğinin ise %2 ile sınırlandırılması önerilmektedir [30].

Narinliği yüksek ve uzun tellerin kullanılması çatlama sonrası tokluğun daha fazla artmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.5 : Çelik tel donatılı betonlarda tel içeriği ve tel narinliğinin yük-sehim eğrisine etkisi [31].

Betonda tek tip ve boyutta lif kullanımı yerine birden fazla tip ve boyutta lif kullanılarak da çelik tel donatılı betonlar üretilmektedir. Karma lifli beton üretiminde amaç yük altında 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 numune veya yapının boyutlarına göre çok küçük olan çatlak, makro çatlak ise uzunluğu numune veya yapının boyutlarına göre fazla küçük

olmayan çatlaktır [32]. Yüksek dayanımlı makro lifler büyük çatlakları, zayıf mikro lifler ise mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol eder.

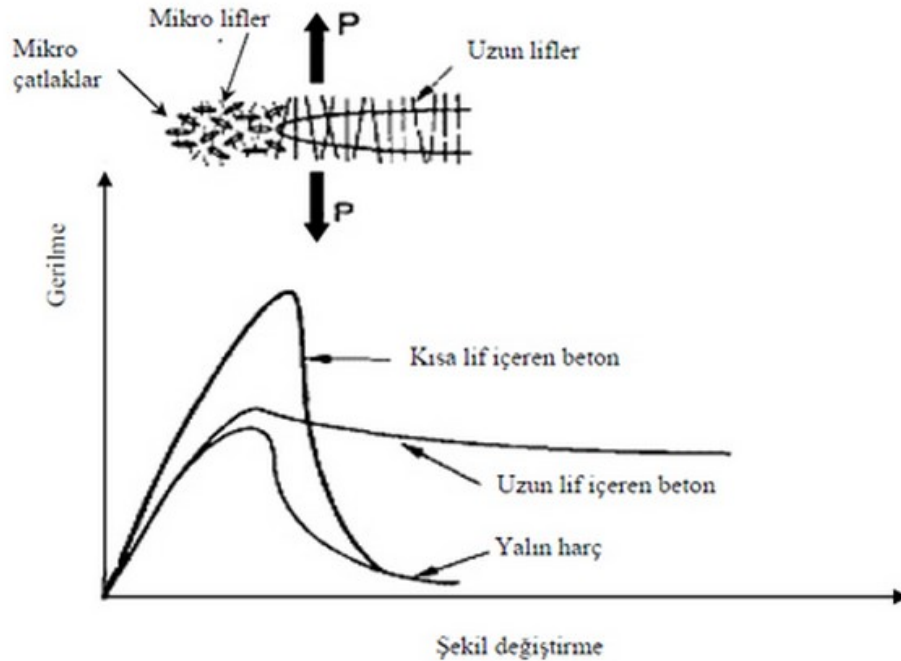
Mikro lifler;

- 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 [33].

Matristeki çatlaklar mikro düzeyde başlar. Büyük boyutlu lifler arasında mesafe fazla olduğu için bu lifler mikro çatlaklar için etkili olamazlar. Büyük boyutlu lifler ancak çatlaklar gelişip makro düzeye ulaştıklarında etkili olur. Buna karşın mikro lifler, çatlaklar mikro düzeyde iken arada köprü görevi görerek çatlakları durdururlar. Mikro lifler mikro çatlakları kritik çatlak haline gelmeden durdururlar.



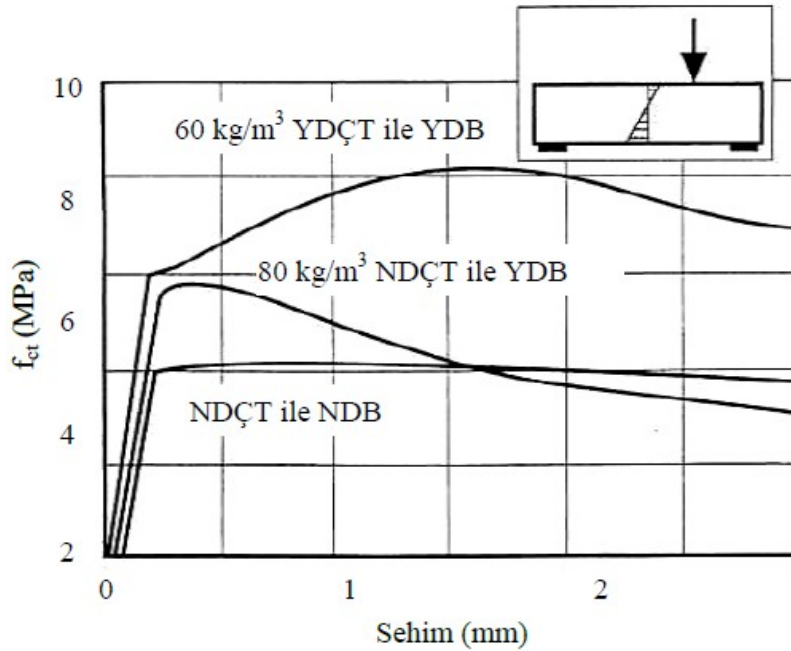
Şekil 2.6 : Çatlak köprülenmesine farklı tel boyutlarının etkisi [34].

Şekil 2.6'dakine benzer biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler (kısa kesilmiş çelik teller) harç fazını ve uzun çelik teller ise betonu güçlendirmektedir.

Bundan dolayı betonun kırılma enerjisinin artırılmasında uzun çelik tellerin narinliğinin de önemli katkısı vardır.

2.3.1.3 Çelik telin çekme dayanımı

Son yıllarda çekme dayanımı 2500 MPa'a varan çok yüksek dayanımlı çelik lifler üretilmektedir. Normal dayanımlı liflerin yerine yüksek dayanımlı bu liflerin kullanılmasının sağladığı üstünlük şu şekilde açıklanabilir: betonun dayanımı arttıkça lif ile aderansı daha yüksek olacağından çatlak oluştuğunda liflerin betondan sıyrılmaları güçleşir ve sıyrılarak ayrılma yerine kopma oluşur. Böylece, yüksek dayanımlı betonda, yüksek dayanımlı lifler kullanılması ile tepe yükü sonrasındaki davranış büyük ölçüde iyileştirilebilir [22].



Şekil 2.7 : Farklı tipteki çelik tellerle üretilmiş beton kirişlerin yük sehim eğrileri [35].

Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı bakımından en iyi sonuçlar, yüksek dayanımlı betonda yüksek dayanımlı çelik lif kullanılması ile elde edilmiştir [16]. Bu durum lif ile matrisin aderansının yüksek olması sonucunda, çelik liflerin kapasitelerine ulaşarak yüksek performans elde edilmesi ile açıklanabilir. Lif hacmi fazla olmasına rağmen, yüksek dayanımlı betonda normal dayanımlı çelik lif kullanılması sonucunda, maksimum yük sonrası davranış istenilen performans düzeyinin altında kalmaktadır. Bu durum, yüksek dayanımlı betonda aderansın kuvvetli olması ve çelik

lifin dayanımının yetersiz kalması ile betondan koparak ayrılmasından kaynaklanmaktadır [35].

2.3.2 Sentetik lifli betonlar

Lifler, beton içerisinde homojen olarak dağılmaları sonucu taze betonda oluşabilecek rötre çatlakları engellerler. Sertleşmiş betonda ise mikro çatlakların makro düzeye geçmelerine köprü işlevi görerek izin vermeyerek sünekliğin artmasını sağlarlar.

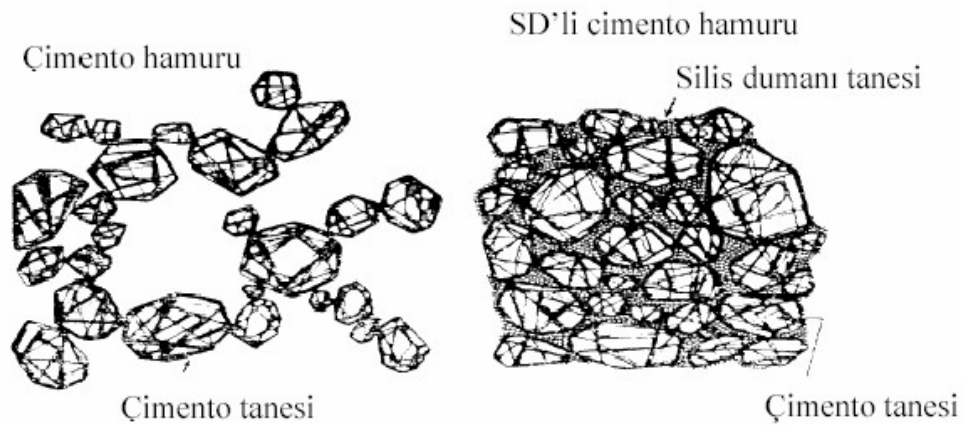
Yapılan araştırmalar sonucunda polimerik lifler beton içerisinde en çok % 0,1 oranında kullanılmaktadır. Bu oranda polimerik liflerin kullanılması betonun basınç dayanımında bir artış sağlamamaktadır. % 0,5 oranında kullanıldığında betonun basınç dayanımı %5 ile %10 arasında azalmaktadır.

Yüksek dayanımlı betonlarda kullanımı sonucu eğilme dayanımında ise polimerik lifler çelik lifler kadar sünekliği arttırmamaktadır [23].

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 [36].

Silis dumanı betonlarda yüksek dayanım ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için kullanılmaktadır.



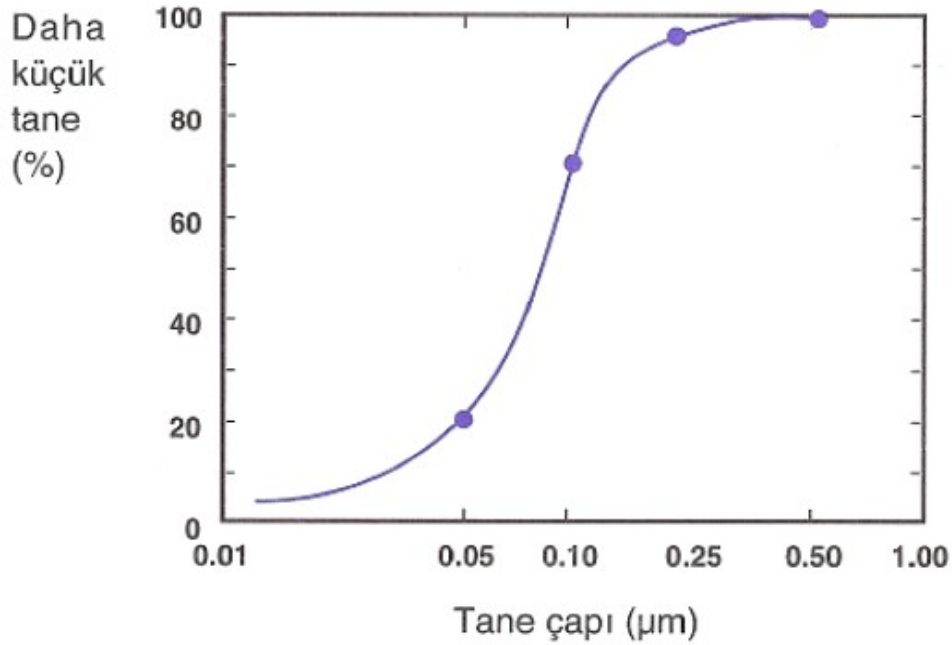
Şekil 2.8 : Çimento hamurunda silis dumanının doldurma etkisi [37].

Yüksek inceliğe sahip silis dumanı (SD) içeren çimento hamurunda SD çok etkilidir ve sıkı bir diziliş sağlar.

Çizelge 2.5 : Çeşitli malzemelerin incelikleri [38].

Malzeme	Yöntem	Özgöl Yüzey (m ² /kg)
Portland çimentosu	Blaine	300-400
Uçucu kül	Blaine	400-700
Granüle yüksek fırın cürufu	Blaine	350-600
Silis dumanı	Bet	13000-20000

Silis dumanı içeren betonlar üzerine ilk deneyler 1950’li yılların başlarında Norveç Teknoloji Enstitüsü’nde yapılmıştır. Bir ilk uygulama olarak silis dumanının betonda kullanımı 1971’de yine Norveç’te gerçekleştirildi. Az miktarda silis dumanının yeni tip süperakışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanımı, betonda işlenebilirlikle beraber basınç dayanımlarının da ciddi olarak artmasını sağlamış oldu.



Şekil 2.9 : Silis dumanı tane boyu dağılımı [38].

Silis dumanı yüksek performanslı beton ve harçların önemli bir bileşeni olup işlenebilmeyi arttırır, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamuru ve agrega taneleri arasındaki aderansı arttırır, sonuçta betonun dayanımı ve durabilitesi artar. Ancak SD'nın betonda kullanılmasındaki 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 [22].

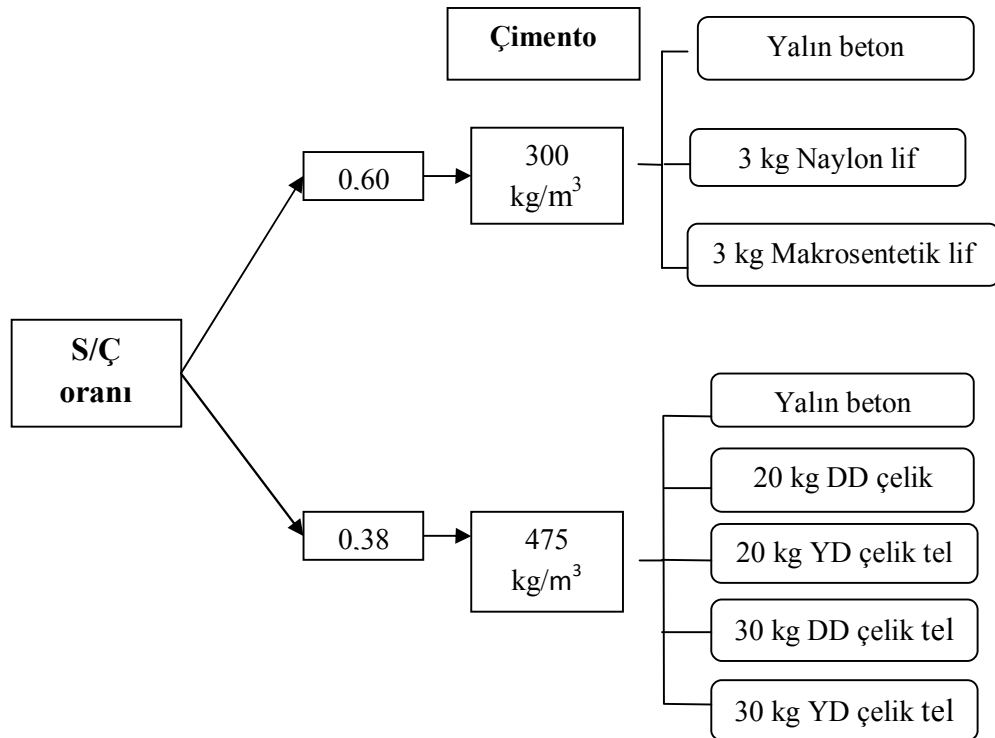
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı ve İçeriği

Bu tez çalışmasında makrosentetik, naylon ve çelik lif kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Yüksek dayanımlı ve düşük dayanımlı olmak üzere 2 farklı tip çelik tel, 1 m³'te 20 kg ve 30 kg olmak üzere iki farklı dozajda kullanılmıştır.

Diğer lifli numunelerin üretiminde naylon ve makrosentetik olmak üzere 2 farklı tip lif kullanılmıştır. Makrosentetik ve naylon lifler numunelerde 3 kg/m³ miktarında kullanılmıştır. Numuneler üretildikten sonra tüm beton gruplarında basınç, yarmada çekme, elastisite modülü ve üç noktalı kiriş eğilme deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.1 : Deneysel programın şematik gösterimi.

3.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler

3.2.1 Çimento

Çelik lifli numunelerde kullanılan çimento CEM I 42.5 R olup Nuh Çimento fabrikasında üretilmiştir. Bu numunelerin üretiminde kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri çizelge 3,1’de verilmektedir. Sentetik lifli betonlarda kullanılan çimento CEM I 42.5 R olup Akçansa Çimento fabrikasında üretilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan çimentonun özellikleri.

Fiziksel Özellikler	
Özgül Yüzey (Blaine), cm^2/g	3718
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	3,15
Priz Başlangıcı (dakika)	167
Priz Sonu (dakika)	213
Mekanik Özellikler (MPa)	
Basınç Dayanımı (2.gün)	27,9
Basınç Dayanımı (28.gün)	58,9
Kimyasal Özellikler	
Cl- (%)	0,0082
SO ₃ (%)	2,57
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,78
Kızdırma Kaybı (%)	1,45

3.2.2 Silis dumanı

Çelik lifli numunelerin üretiminde kullanılan silis dumanının özellikleri çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 : Numunelerde kullanılan silis dumanının özellikleri.

Bileşen (%)	
SiO ₂	96,25
Al ₂ O ₃	0,41
Fe ₂ O ₃	0,36
CaO	0,15
MgO	0,19
SO ₃	0,17
K ₂ O	0,3
H ₂ O	0,18
Kızdırma kaybı	1,4
Özgül ağırlık (gr/cm^3)	2,19

3.2.3 Agregalar

Üretilen karışımlarda kum, taş tozu, kırma taş I ve kırma taş II olmak üzere 4 tip agrega kullanılmıştır. Hem sentetik lifli hem de çelik lifli beton bileşimlerinde agrega granülometrisi kendi içerisinde sabit tutulmuştur.

Çelik lifli betonlarda kullanılan agregaların fiziksel özellikleri çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Çelik lifli betonların üretiminde kullanılan agregaların özellikleri.

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	Karışım oranları (%)
Kum	2,64	1,4	25
Taş tozu	2,74	1,1	25
Kırma taş I	2,77	0,5	25
Kırma taş II	2,71	0,5	25

Sentetik lifli betonlarda kullanılan agregaların fiziksel özellikleri çizelge 3.4'te verilmiştir.

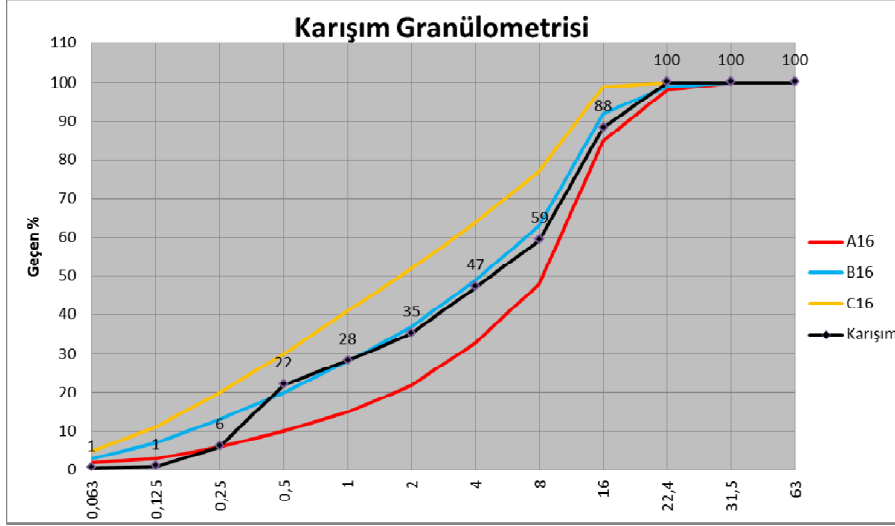
Çizelge 3.4 : Sentetik lifli betonların üretiminde kullanılan agregaların özellikleri.

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	Karışım oranları (%)
Kum	2,6	1,5	25
Taş tozu	2,74	1,1	22
Kırma taş I	2,73	0,6	27
Kırma taş II	2,68	0,6	26

Kırma taş I, kırma taş II, kum ve taş tozundan belirli oranlarda alınarak karışımın granülometri eğrisi şekil 3.2'de verilmiştir.

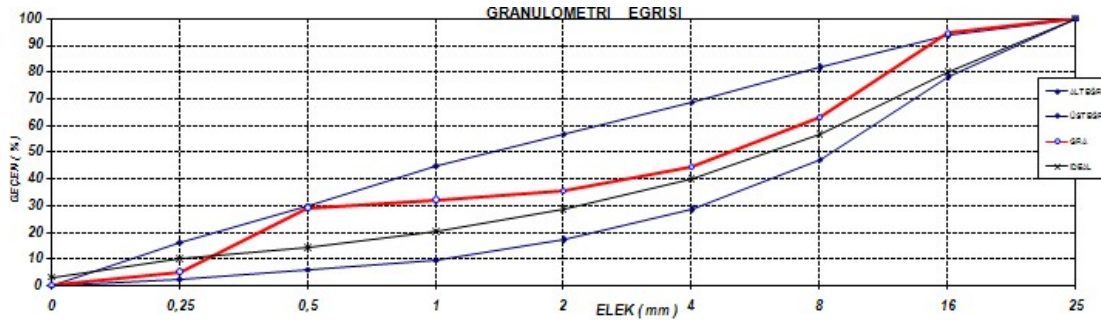
Çizelge 3.3'te de gösterildiği üzere S/B oranı 0,38 olan çelik lifli numunelerin üretiminde kullanılan agregalardan eşit karışım oranlarında kullanılmıştır.

S/B oranı 0,60 olan sentetik lifli numunelerin üretiminde kullanılan kum, taş tozu, kırma taş I ve kırma taş II agregalarından sırasıyla çizelge 3.4'te gösterildiği gibi % 25, %22, %27 ve %26 oranlarında kullanılmıştır.



Şekil 3.2 : Çelik lifli betonlarda kullanılan agregaların granülometri eğrisi.

Farklı tip sentetik lif kullanılarak üretilen numunelerde kullanılan agregaların özellikleri çizelge 3.4'te, agregalara ait granülometri eğrisi şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 : Sentetik lifli numunelerde kullanılan agregaların granülometri eğrisi.

3.2.4 Hiperakışkanlaştırıcı

Çelik lifli numunelerin üretiminde özgül ağırlığı 1,10 gr/cm³ olan ERCA Fluxer GTS 35 IPR hiperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesi kullanılmıştır. Kullanım miktarları taze beton özelliklerinin bulunduğu çizelgede belirtilmiştir.

3.2.5 Çelik lif

Çelik lifli beton numunelerinin üretiminde 2 farklı tip kancalı uçlu çelik lif kullanılmıştır. Bunlar düşük dayanımlı çelik lif olan Dramix 80/60 BN ve yüksek dayanımlı çelik lif olarak ise Dramix 80/60 BP. Düşük dayanımlı çelik liflerin çekme dayanımları en az 1050 N/mm², yüksek dayanımlı çelik liflerin çekme dayanımı ise en az 2300 N/mm²'dir.

Çizelge 3.5 : Düşük dayanımlı kancalı uçlu çelik telin özellikleri.

Boy (mm)	60
Çap (mm)	0,75
Narinlik (l/d)	80
Çekme dayanımı (N/mm ²)	1050

Çizelge 3.6 : Yüksek dayanımlı kancalı uçlu çelik telin özellikleri.

Boy (mm)	60
Çap (mm)	0,71
Narinlik (l/d)	85
Çekme dayanımı (N/mm ²)	2300

3.3 Beton Karışımları ve Numune Kodları

Su/bağlayıcı oranı 0,38 olan referans betonlara, 1 m³ bileşimde 20 kg ve 30 kg olmak üzere iki farklı oranda yüksek ve düşük dayanımlı çelik teller ayrı ayrı eklenerek 5 adet beton karışımı elde edilmiştir.

W38 kodlu seride su/bağlayıcı oranı 0,38 olarak alınıp çimento miktarı 475 kg/m³ 'tür. Bağlayıcı ağırlığının % 10'u civarında silis dumanı kullanılmıştır.

Yüksek ve düşük dayanımlı çelik lifler 20 kg ve 30 kg olarak iki farklı oranda ayrı ayrı eklenmiştir. Bunlar yüksek dayanımlı çelik lifler HS20 ve HS30 olarak, düşük dayanımlı çelik lifler ise LS20 ve LS30 olarak kodlanmıştır. S0 kodu şahit numuneleri temsil etmektedir.

Üretilen çelik lifli serilerin numune kodları ve lif miktarları aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir.

Diğer beton karışımlarında 2 farklı lif kullanılmıştır. Bunlar naylon ve makrosentetik liflerdir. Naylon ve makrosentetik lifli numunelerde ise lif miktarı 3 kg/m³. Sentetik lif içeren numunelerin s/ç oranı 0,60'dır. Lif tipi ve miktarlarına bağlı olarak numunelere kodlar verilmiştir.

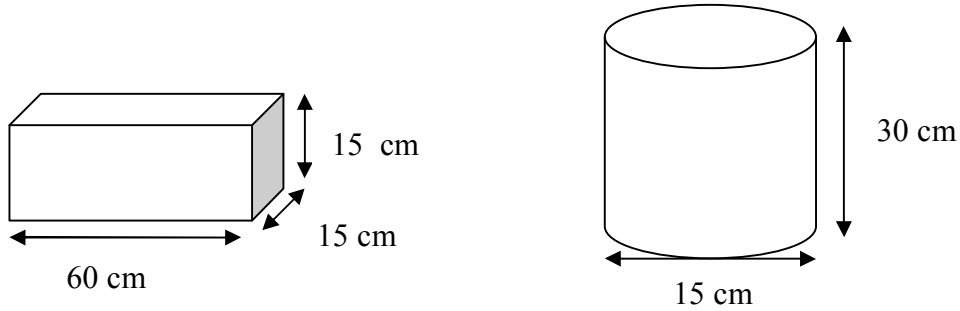
3 kg/m³ makrosentetik lif içeren numuneler W60MS3 ile, 3 kg/m³ naylon lif içeren numuneler ise W60N3 olarak isimlendirilmiştir. Çelik lifli numunelerde kullanılan çelik lif miktarları çizelge 3.7' de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Çelik lifli numunelerde kullanılan çelik tel miktarları.

Numune Kodu	Su/Bağlayıcı	Düşük dayanımlı çelik tel (kg/m^3)	Yüksek dayanımlı çelik tel (kg/m^3)
W38S0	0,38	-	-
W38LS20	0,38	20	-
W38LS30	0,38	30	-
W38HS20	0,38	-	20
W38HS30	0,38	-	30

3.4 Numune Boyutları

Eğilme dayanımları ve kırılma enerjilerini hesaplamak için 15X15X60 cm boyutlarında 3 adet prizma numune, basınç dayanımı ve elastisite modüllerini belirlemek amacı ile 15x30 cm boyutlarında 4 adet silindir numune, yarma-çekme dayanımlarını tespit etmek amacı ile 15x30 cm boyutlarında 4 adet silindir üretilmiştir. Yarma-çekme dayanımlarını belirlemek amacı ile üretilen silindirler daha sonra ikiye bölünerek 15x15cm boyutlarında 8 adet silindir numune elde edilmiş ve bu silindir numuneler üzerinde yarma-çekme deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.4 : Numunelerin boyut ve şekilleri.

3.5 Karışım Oranları

Üretilen betonların karışım oranları ve çökme değerleri çizelge 3.8 ve 3.9’da verilmektedir.

Çizelge 3.8 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin gerçek beton bileşimleri.

Kullanılan Malzeme (kg/m³)	W38S0	W38LS20	W38LS30	W38HS20	W38HS30
Çimento	475	475	475	475	475
Silis Dumanı	48	48	48	48	48
Su	199	199	199	199	199
Kum	407	407	407	407	407
Taş Tozu	413	413	413	413	413
Kırma Taş I	421	421	421	421	421
Kırma Taş II	421	421	421	421	421
Çelik Lif	0	20	30	20	30
Hiperakışkanlaştırıcı	4,71	4,71	4,71	4,71	4,71
Su/bağlayıcı oranı	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	2325	2340	2342	2300	2347
Çökme (cm)	15	15	14	16	14

Çizelge 3.9 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin gerçek beton bileşimleri.

Kullanılan malzeme (kg/m³)	W60F0	W60N3	W60MS
Çimento	300	300	300
Su	180	180	180
Kum	458	458	458
Taş tozu	419	418	418
Kırma taş I	516	515	515
Kırma taş II	495	494	494
Lif	0	3	3
Süperakışkanlaştırıcı	4,5	5,7	5,7
Su / bağlayıcı (%)	0,6	0,6	0,6
Birim ağırlık (kg/m ³)	2370	2360	2352
Çökme (cm)	20	17	17

3.6 Taze Beton Deneyleri

Üretilen numunelerde slump (çökme) miktarını ve betonların taze birim hacim ağırlıklarını belirlemek için slump ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu değerler gerçek beton bileşimlerini içeren çizelgede verilmiştir.

3.6.1 Birim hacim ağırlık deneyi

Üretilen numuneler kalıplara yerleştirilmeden önce, hacmi belirli olan bir kap içerisine vibrasyonla yerleştirildi ve taze betonun ağırlığı bulundu. Elde edilen bu

ağırlık değerinin hacime bölünmesiyle TS EN 12350-6'ya göre birim ağırlıklar elde edildi. Birim hacim ağırlık değerleri çizelge 3.8 ve 3.9'da belirtilmiştir.

3.6.2 Slump (Çökme) deneyi

Taze betonun kıvamı ve işlenebilirliği hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla yapılmıştır. Çökme konisi içerisine beton üç kademedede şişlenerek yerleştirildikten sonra çökme konisinin yukarı kaldırılması ve betonun kendi ağırlığıyla yayılması sonrasında ilk konumuna göre yükseklik farkı ölçülerek çökme miktarı TS EN 12350-2'ye göre belirlenmiştir.

Taze betonların çökme değerleri çizelge 3.8 ve 3.9'da belirtilmiştir.

3.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri İTÜ yapı malzemesi laboratuvarında yapılmıştır.

3.7.1 Silindir basınç deneyi

Basınç deneyleri 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindir numuneler üzerinde yapıldı. Deneyler 500 ton kapasiteli kapalı çevrimli deformasyon kontrollü basınç presi kullanılarak yapılmıştır. Çerçevenin her iki yanına numunenin boyundaki kısılmayı ölçen 2 adet LVDT yerleştirilmiş buradan alınan deformasyon değerlerinin ortalaması alınarak şekil değiştirme değerlerine ulaşılmıştır.

Deney sırasında okunan yük değerlerini numunenin en kesit alanına bölerek gerilme değerleri hesaplanarak 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 yararlanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır.

3.7.2 Yarma çekme deneyi

Silindir yarmada çekme deneyi için 150 mm yüksekliğinde, 300 mm çapında silindir numuneler 2'ye bölündü. Numunelere çizgisel yük uygulanarak deneyler sonucunda yarma kuvvetleri TS EN 12390-6 'ya göre hesaplandı.

$$f_{ct} = (2 * P) / (\pi * d * l) \quad (3.1)$$

f_{ct} : Yarma-çekme dayanımı (MPa)

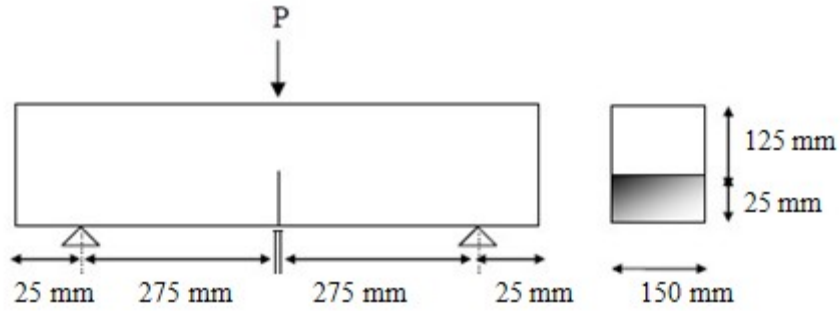
P: Kırılma yükü (N)

l: Numunenin yükleme parçasına temas çizgisinin uzunluğu(mm)

d: Numunenin seçilen en kesit ölçüsünü (mm)

3.7.3 Üç noktalı eğilme deneyi

Kırılma enerjisini belirlemek için beton kiriş numunelere yük, maksimum kapasitesi 100 kN olan Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi ile uygulanmıştır. Deneyden önce numunelerin yan yüzeyine yapıştırılan levhaya sehim ölçmek amacı ile bir adet LVDT yerleştirildi. Numunelerin ortasına kırılmanın kontrollü olabilmesi amaçlı 25 mm' lik çentikler açıldı ve böylelikle numune etkin kesit alanı 150x125 mm olarak seçildi. Yalın betonlarda yükleme hızı 0,02 mm/dk, lifli betonlarda ise 0,05 mm/dk olarak seçildi. Yapılan deneylerle farklı miktar ve dayanımda çelik liflerin kullanılması betonun eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesine etkileri araştırıldı. Bu deney düzeneği ile uygulanan yükler ve bu yüklere karşılık gelen sehim değerleri alıcılardan bilgisayara aktarılarak yük-sehim grafikleri elde edildi. Böylelikle lif çeşidi, özelliği ve miktarının numunelerin eğilme dayanımı ve kırılma enerjilerine etkileri belirlendi.



Şekil 3.5 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.

3.7.4 Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımının belirlenmesi

Yük- sehim eğrisinin altında kalan alan yardımıyla kırılma enerjisi RILEM 50-FMC'nin önerdiği denklem 3.2 ile bulunmuştur.

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

W_0 : Yük-sehim eğrisi altında kalan alan (Nm)

m : Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığını (kg)

g : Yer çekim ivmesi

δ_0 : Kirişin göçme anındaki son sehim değeri

A_{lig} : Etkin kesit alanı (m^2)

Numunelerin eğilme dayanımı değerleri denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

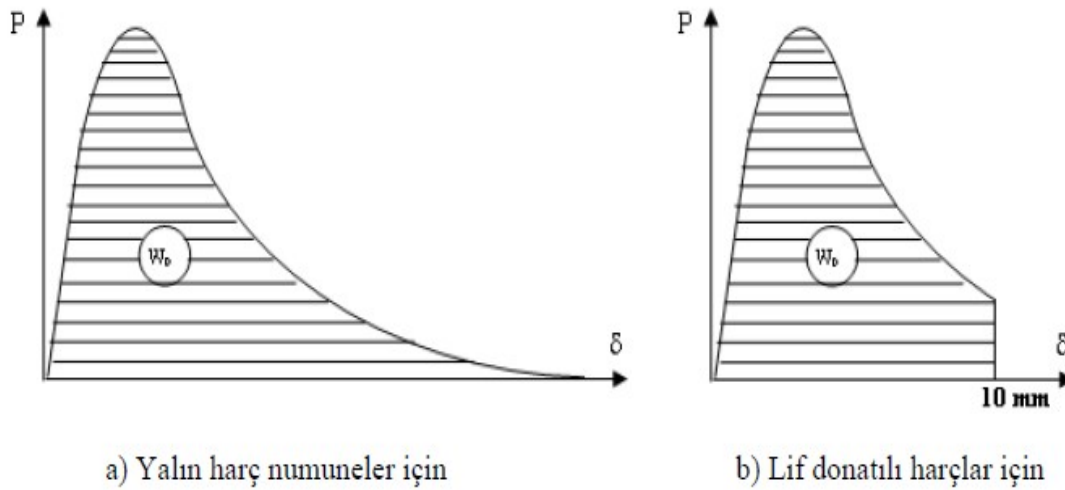
$$f_{net} = (3PL) / BD^2 \quad (3.3)$$

P : Kırılma yükü (N)

L : Mesnetler arası mesafe (mm)

B : Numunenin kesit genişliği (mm)

D : Numunenin kesit yüksekliği (mm)



Şekil 3.6 : Yük-sehim eğrisinin temsili gösterimi.

4. ÇELİK LİF DONATILI BETONLARIN PERFORMANSA BAĞLI TASARIMI

Çelik lif donatılı betonlar üzerinde yapılan çalışmalarda, çelik liflerin eklenmesiyle lifli betonun mekanik özelliklerini ve özellikle yalın betona göre ilk çatlak sonrası şekil değiştirme kapasitesini önemli oranda arttırdığı bilinmektedir. Çelik lifli betonların bu üstün özelliğinden dolayı yapısal tasarımda ve uygulamada kullanılması amacıyla çeşitli Avrupa ülkelerinde performansa dayalı tasarımlar geliştirilmeye başlanmıştır. Bazı ülkelerde (Almanya, Avusturya), çelik lif donatılı betonların tasarımında kullanılan eşdeğer eğilme dayanımlarına (çatlamamış ve çatlak kontrollü) ve çevresel etki sınıflarına göre, (yangına dayanıklı) karışım tasarımları ve resmi olmayan performans sınıfları belirlenmiştir [16].

Çelik tel donatılı betonların performans sınıflarını belirlemek için eşdeğer eğilme-çekme dayanımları hem Kullanılabilirlik Sınır Durumuna (KSD), hem de Taşıma Gücü Sınır Durumuna (TSD) göre hesaplanmalıdır.

Lif donatılı betonun tokluğu genel olarak eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisi altındaki alan ile belirlenen enerji yutma kapasitesi olarak kabul edilir. ACI Komitesi tarafından tokluk indisi, bir lifli beton kirişi kırmak için gerekli enerji miktarına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Genel olarak çelik lif donatılı betonların performansa dayalı tasarım yöntemleri, çelik lif donatılı betonun şekil değiştirme kapasitesinin belirlenmesinde yapılan kabuller nedeniyle farklılıklar göstermektedir. Tokluk ölçüm yöntemlerinin bazıları şunlardır: [39]

- 1) ASTM C1018 Standardı (Üç noktalı eğilme yüklemesi kullanılarak lif donatılı betonun ilk çatlak dayanımı ve eğilme tokluğu için deney yöntemi),
- 2) Almanya Beton Birliği Yöntemi (DBV 1996)
- 3) JSCE-SF4 Standardı (Çelik lifle donatılmış beton için deney yöntemi, eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu standardı)
- 4) Belçika Standardı (NBN B15-238)

Bu tez kapsamında performansa dayalı tasarım Almanya Beton Birliği Yöntemi'ne göre yapılmıştır.

4.1 Almanya Beton Birliği Yöntemi

Almanya Beton Birliği [40] tarafından çelik lif donatılı zemin betonlarının tasarımı için iki farklı tasarım yöntemi verilmektedir. Bu tasarım yöntemlerinin birisi elastik teoriye göre diğeri enerji yutma kapasitesine göre yapılmaktadır. ABBY'de çelik lif donatılı betonların performansa dayalı tasarımı, enerji yutma kapasitesi yöntemi esas alınarak eşdeğer eğilme çekme dayanımına göre yapılmaktadır. Bu yöntemde eşdeğer eğilme dayanımları, kullanılabilirlik (KSD) ve taşımacı (TSD) sınır durumları için tanımlanan iki farklı şekil değiştirme bölgesine bağlı olarak hesaplanan enerji yutma kapasitelerine göre belirlenmektedir. Çelik lif donatılı betonlar için ABBY'ye göre tanımlanan şekil değiştirme bölgeleri, çizelge 4.1' de verilmiştir [39].

Çizelge 4.1 : Çelik lif donatılı betonlar için ABBY'ye göre şekil değiştirme bölgeleri.

Şekil Değiştirme Bölgesi	Sınır Durumu	Sehim (mm)
I (küçük sehim durumu)	Kullanılabilirlik (KSD)	$\delta_1 = \delta_0 + 0,65$
II (büyük sehim durumu)	Taşıma Gücü (TSD)	$\delta_2 = \delta_0 + 3,15$

ABBY'ye göre karakteristik eşdeğer eğilme dayanımı denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

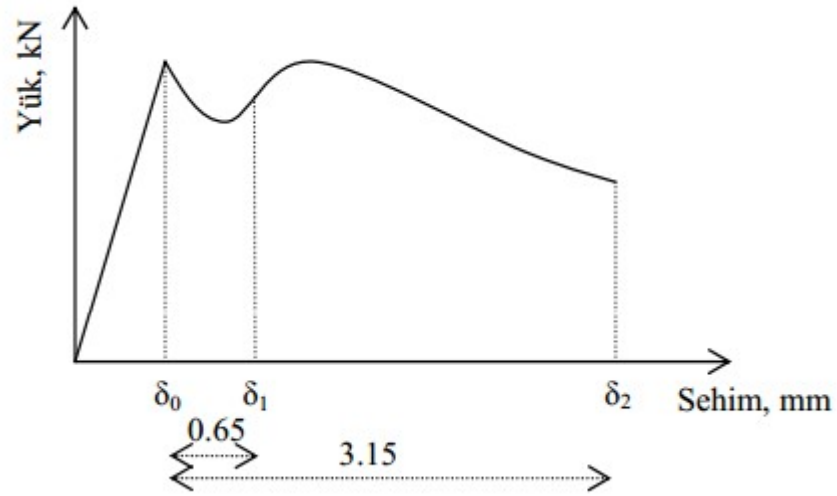
$$f_{eş} = \frac{T_i}{\delta_i} \cdot \frac{S}{bh^2} \quad (4.1)$$

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

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

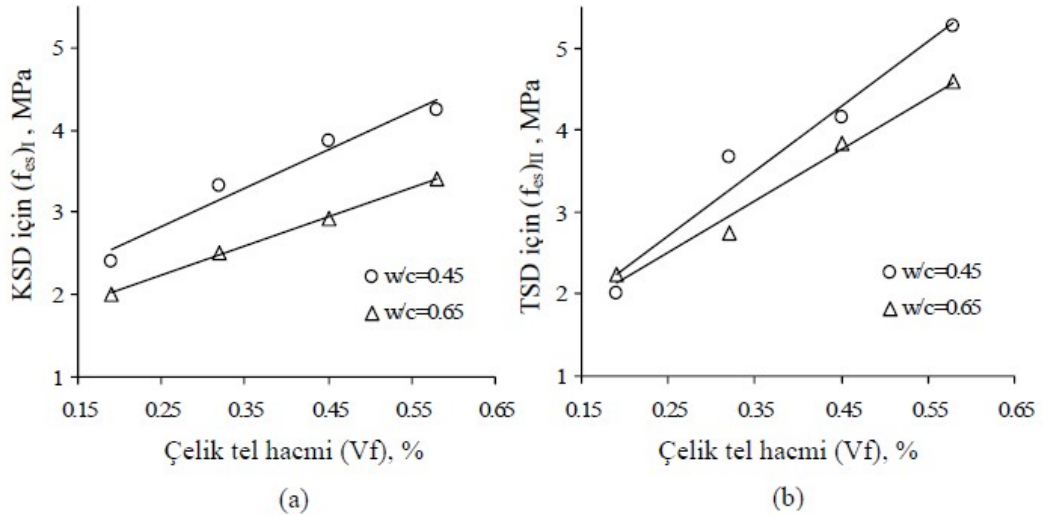
$b \times h$: Kiriş kesit alanı (genişlik x yükseklik), mm

S : Kiriş açıklığı, mm



Şekil 4.1 : ABBY'ye göre tanımlanan şekil değiştirme bölgeleri [40].

Almanya Beton Birliği, çelik lif donatılı betonlar için performansa dayalı tasarıma göre performans sınıfı kodlamalar kullanmaktadır. Örneğin; C30/37 F 0,9/0,7 performans sınıfı çelik lif donatılı betonda; C30/37 ifadesi betonun 28 günlük silindirik/küp basınç dayanımını, F 0,9/0,7 ifadesi ise kullanılabilirlik/taşıma gücü sınır durumu için eşdeğer eğilme dayanım sınıfını belirtmektedir [39].

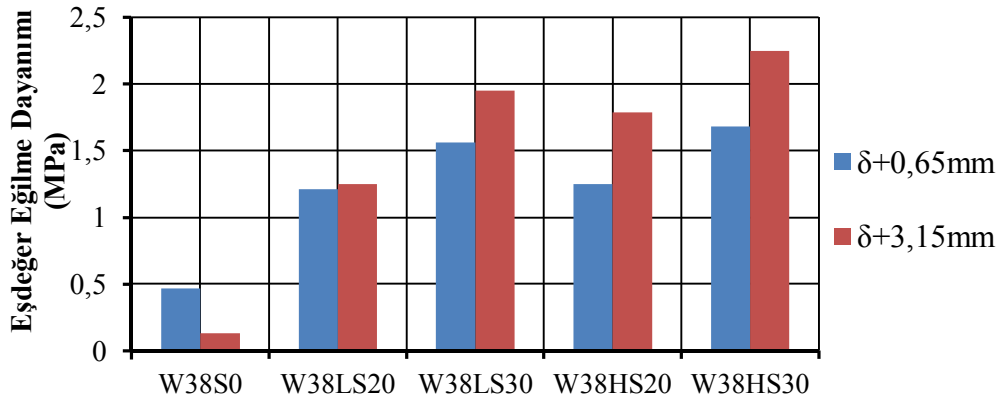


Şekil 4.2 : Farklı su/çimento oranları için, (a) KSD ve (b) TSD için eşdeğer eğilme dayanımı – çelik tel hacmi grafikleri [41].

4.2 Deney Sonuçlarının Alman Beton Birliği Yöntemi'ne Göre Değerlendirilmesi

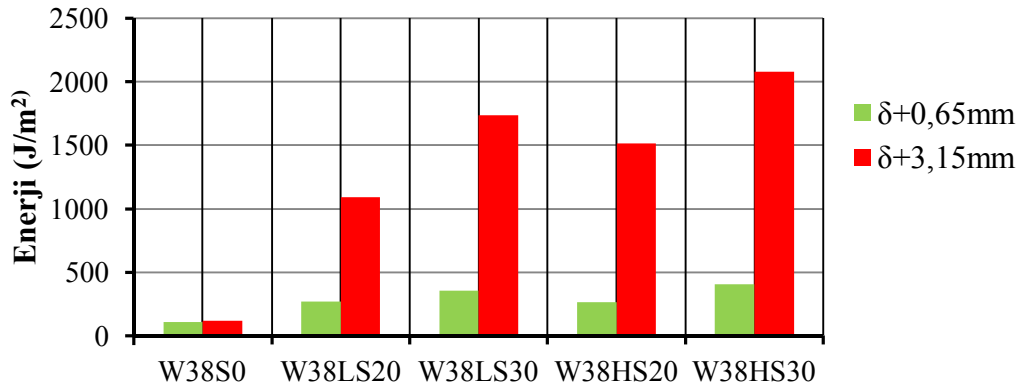
Çelik lifler kullanılarak üretilen prizma numunelere üç noktalı eğilme testi uygulanması sonucunda ABBY'ye göre hesaplanan Kullanılabilirlik Sınır Durumu ve Taşıma gücü Sınır Durumu değerleri, enerji ve eğilme dayanımlarına bağlı olarak Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi lif miktarı ve lif dayanımının artmasının eğilme dayanımıyla beraber KSD ve TSD değerlerinin artmasını sağlamıştır.



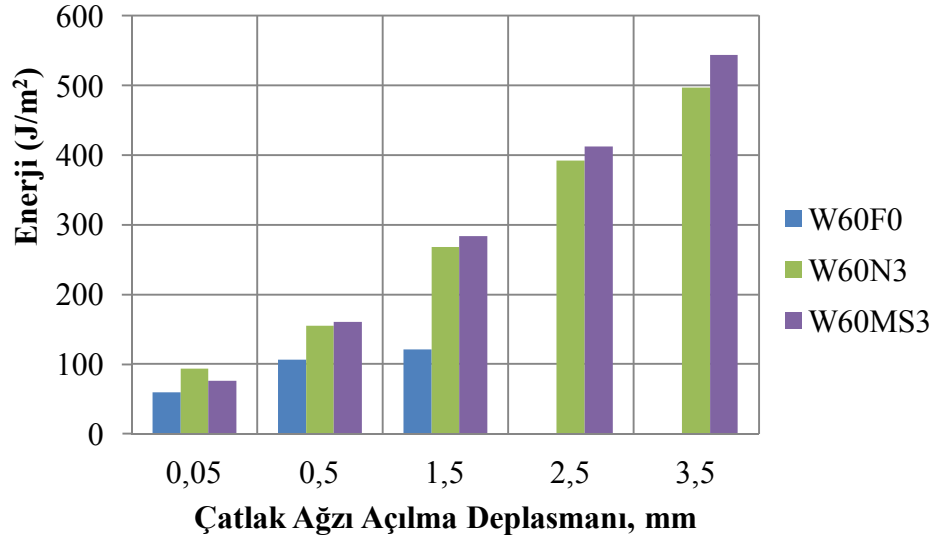
Şekil 4.3 : Su/çimento oranı 0,38 olan çelik lifli kiriş numunelerinin KSD ve TSD değerleri-eşdeğer eğilme dayanımı grafiği.

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere lif içeriği ve miktarının artması KSD için hesaplanan enerji miktarını çok fazla etkilemeyip TSD için hesaplanan enerji miktarını belirgin bir şekilde arttırmıştır.



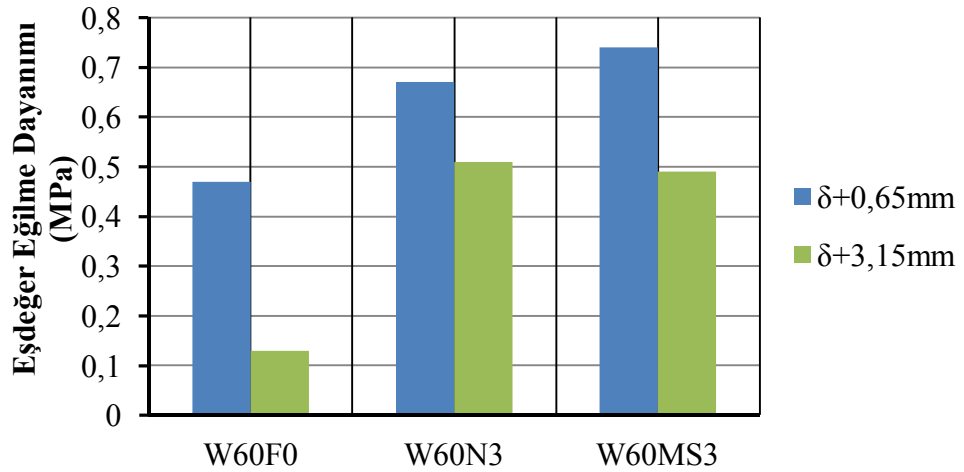
Şekil 4.4 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin KSD ve TSD değerleri enerji grafiği.

Su/çimento oranı 0,60 olan şahit, naylon lifli ve makrosentetik lifli prizma numunelere üç noktalı eğilme deneyi uygulanmasıyla elde edilen çatlak ağzı açılma deplasmanlarına göre hesaplanan enerji değerleri şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Su/çimento oranı 0,60 olan kiriş numunelerinin enerji grafiği.

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi lif eklenmesiyle eğilme dayanımında artış meydana gelmiştir. Kullanılabilirlik sınır durumundaki eğilme dayanımı değerleri tüm numunelerde taşıma gücü sınır durumundaki değerden daha fazladır.

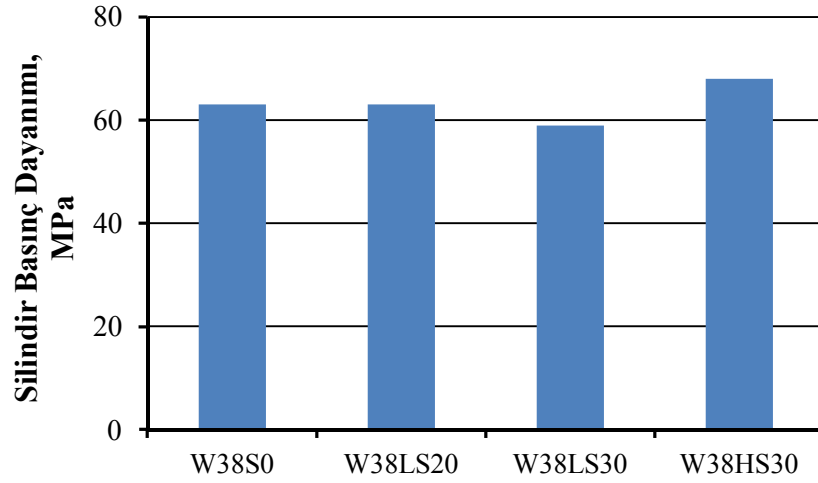


Şekil 4.6 : Su/çimento oranı 0,60 olan kiriş numunelerinin KSD ve TSD'ye göre eğilme dayanımı grafiği.

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

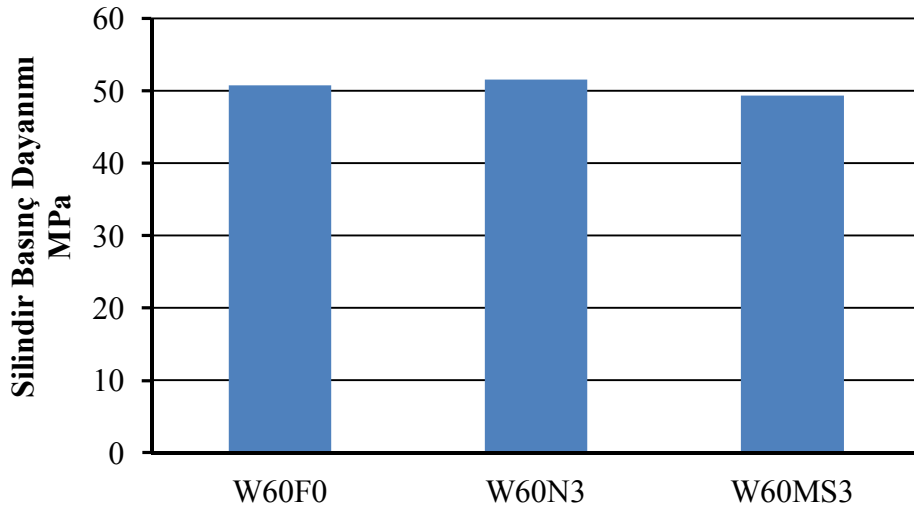
5.1 Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri her numune için EK B’de verilmiştir. Basınç dayanımı değerlerinin ortalaması Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre S/B oranı 0,38 olan yalın numunelerin ortalama silindir basınç dayanımı 63 MPa iken düşük dayanımlı 20 kg/m³ miktarında çelik lif eklenmesiyle basınç dayanımında herhangi bir değişiklik olmamıştır. 30 kg/m³ miktarında yüksek dayanımlı ve düşük dayanımlı çelik lif eklenmesiyle basınç dayanımları sırasıyla 68 MPa ve 59 MPa olarak bulunmuştur ve lifsiz betona göre önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür.



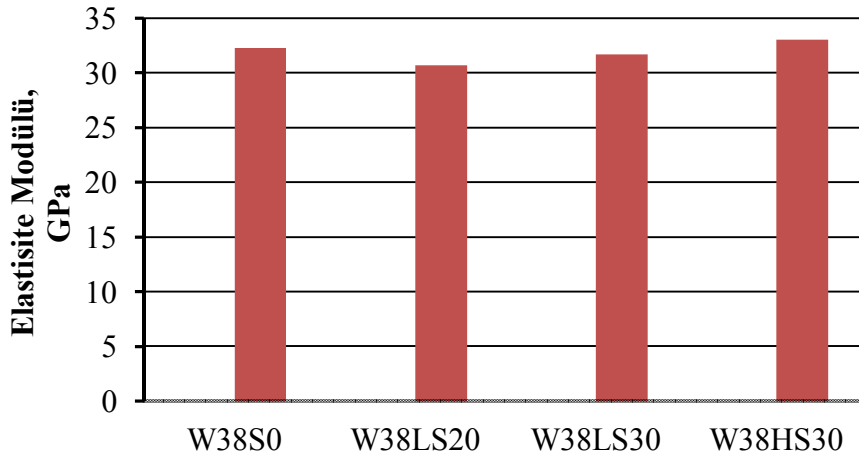
Şekil 5.1 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin silindir basınç deney sonuçları.

Deney sonuçlarına göre S/B oranı 0,60 olan yalın numunelerin ortalama silindir basınç dayanımı 51 MPa iken ayrı ayrı naylon ve makrosentetik lif eklenmesiyle de basınç dayanımlarında belirgin bir değişim olmamış ve sırasıyla 51 MPa ve 49 MPa olarak bulunmuştur.



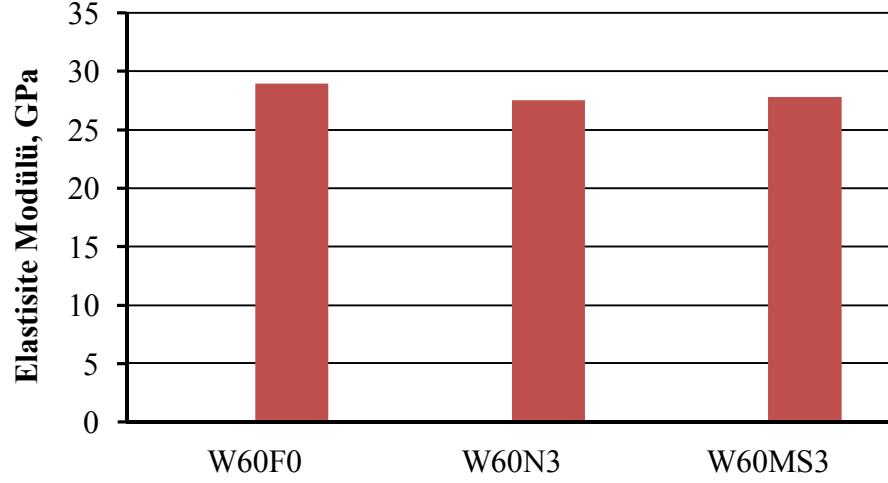
Şekil 5.2 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin silindir basınç deney sonuçları.

Silindir basınç deneyinden elde edilen elastisite modülü değerlerine göre, betona lif eklenmesinin elastisite modülüne belirli bir etkisi yoktur. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te görüldüğü gibi karışımların elastisite modüllerinde anlamlı bir değişiklik görülmemiştir. S/B oranı 0,38 olan numunelerde elastisite modülü ortalama 32 GPa, S/B oranı 0,60 olan numunelerde ise elastisite modülü ortalama 28 GPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.3 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin elastisite modülü sonuçları.

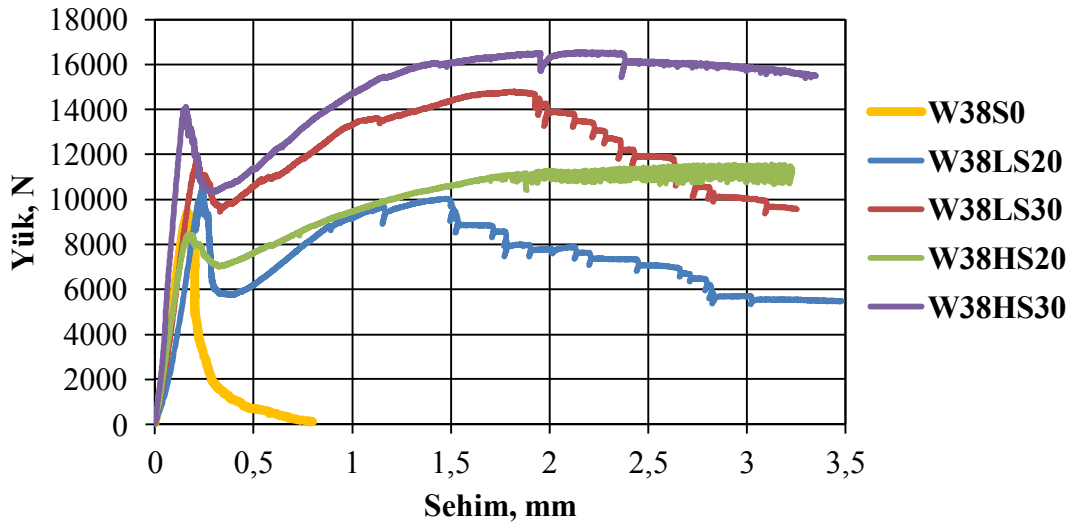
Şekil 5.3'te de görüldüğü üzere S/B oranı 0,38 olan numunelerde en büyük elastisite modülü değeri yüksek dayanımlı çelik liflerin 30 kg/m³ miktarında kullanılmasıyla 33 GPa olarak elde edilmiştir.



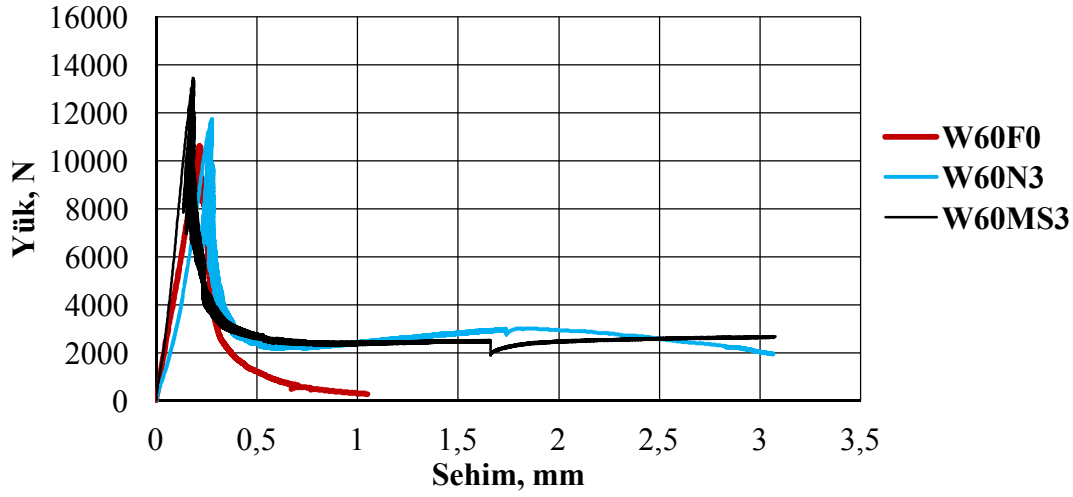
Şekil 5.4 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin elastisite modülü sonuçları.

5.2 Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre betona lif eklenmesi kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımını büyük oranda arttırmaktadır. Böylelikle gevrek bir yapıya sahip olan yüksek dayanımlı betonlar lif eklenmesiyle daha sünek davranış göstermektedir. Deneylerden elde edilen yük sehim eğrileri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bu deneyler sonucunda her numune için elde edilen grafikler ve değerler Ek A'da verilmiştir.

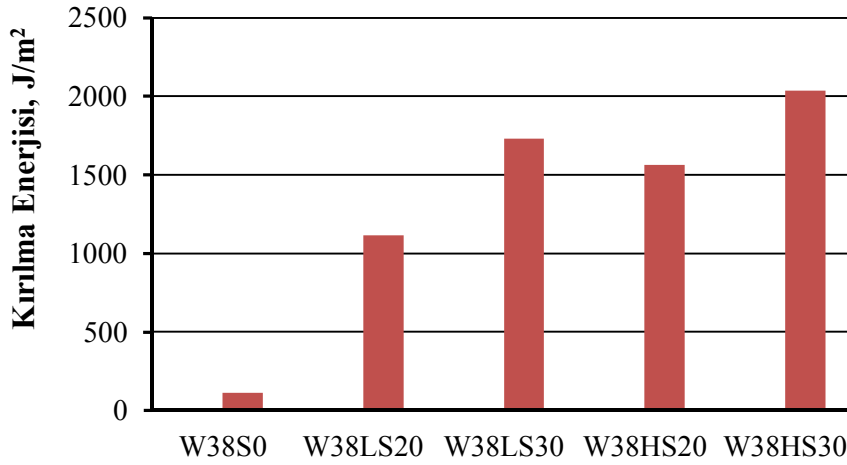


Şekil 5.5 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin yük-sehim eğrileri.



Şekil 5.6 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin yük-sehim eğrileri.

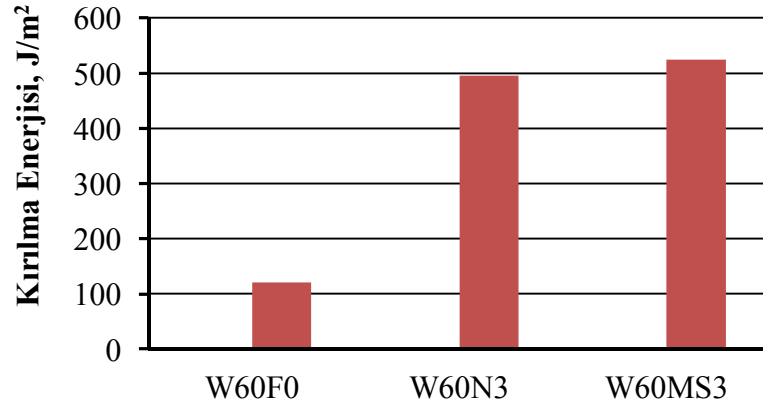
Deneyler sonucunda hesaplanan ortalama kırılma enerjileri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de gösterilmiştir. S/B oranı 0,38 olan yalın betonun kırılma enerjisi 113 J/m^2 iken düşük dayanımlı çelik lifin 20 kg/m^3 miktarında eklenmesiyle kırılma enerjisi 1115 J/m^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.7 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri.

Kırılma enerjisindeki en büyük artış ise yüksek dayanımlı çelik liflerin 30 kg/m^3 miktarında eklenmesiyle elde edilmiştir. Bu karışımdaki kırılma enerjisi yalın betona oranla yaklaşık 20 kat artmış ve 2037 J/m^2 olarak bulunmuştur.

S/B oranı 0,60 olan yalın betonun kırılma enerjisi 121 J/m^2 iken 33 kg/m^3 miktarında naylon lif eklenmesiyle 495 J/m^2 , 3 kg/m^3 miktarında makrosentetik lif eklenmesiyle ise 525 J/m^2 olarak hesaplanmıştır.



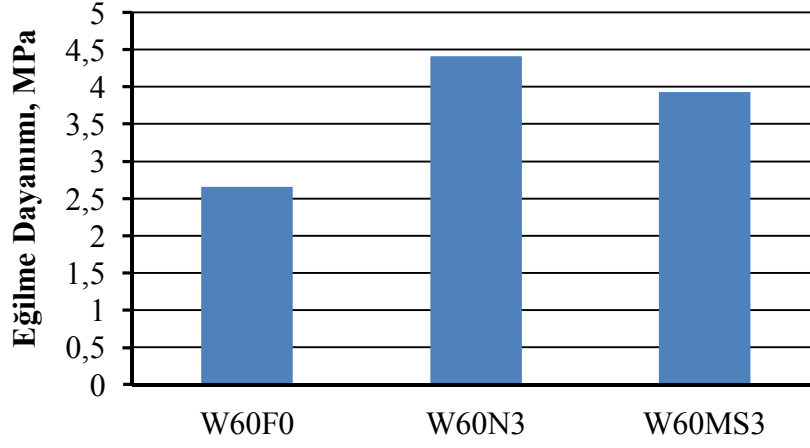
Şekil 5.8 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin kırılma enerjisi değerleri.

Kiriş numunelerine 3 noktalı eğilme deneyleri uygulanması sonucunda elde edilen maksimum yük değeri kullanılarak eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerin ortalamaları Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilmiştir. Karışımlarda lif kullanılması sonucu eğilme dayanımları artmıştır. S/B oranı 0,38 olan yalın betonda eğilme dayanımı 2,47 MPa olarak bulunmuştur. Düşük dayanımlı çelik lifin 20 kg/m³ miktarında kullanılması eğilme dayanımını çok fazla değiştirmemiş ve 2,75 MPa olarak bulunmuştur. Eğilme dayanımdaki en fazla artış yüksek dayanımlı çelik lifin 30 kg/m³ miktarında eklenmesiyle olmuştur ve 3,83 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.9 : S/B oranı 0,38 olan numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.

S/B oranı 0,60 olan yalın betonun eğilme dayanımı 2,66 MPa olarak hesaplanmıştır. Eğilme dayanımındaki en fazla artış karışıma naylon lifin 3 kg/m³ oranında eklenmesiyle meydana gelmiştir ve 4,41 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.10 : S/B oranı 0,60 olan numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- Çelik veya makrosentetik lif eklenmesi sonucu silindir basınç dayanımlarında belirgin bir değişiklik olmamıştır. Literatürde de belirtildiği gibi basınç dayanımı $\pm \%10$ aralığında etkilenmiştir. Kararlı bir değişiklik söz konusu değildir.
- Çelik lif ve makrosentetik liflerin katıldığı numunelerin elastisite modülleri de etkilenmemiştir. Su/bağlayıcı oranının artması ile elastisite modülü değerleri azalmıştır.
- S/B oranı 0,38 olan karışımlara bağıl olarak düşük dayanımlı çelik liflerin 20 kg/m³ miktarında eklenmesiyle numunelerin yarma çekme dayanımı % 25 oranında artmıştır. Bağıl olarak düşük dayanımlı çelik liflerin 30 kg/m³ miktarında kullanılmasının 20 kg/m³ kullanılmasına göre yarma çekme dayanımlarını % 22 oranında arttırdığı görülmüştür.
- Yüksek dayanımlı çelik liflerin 30 kg/m³ eklenmesiyle numunelerin yarma çekme dayanımı % 75 oranında artmıştır. Lif dayanımının artmasıyla beraber çelik liflerin 30 kg/m³ kullanılması yarma çekme dayanımlarını % 15 oranında arttırmıştır.
- Bağıl olarak düşük dayanımlı 20 kg/m³ çelik lif kullanılarak üretilen kiriş numunelerinin eğilme dayanımlarında önemli bir değişiklik olmamıştır. Lif miktarının 30 kg/m³ olarak kullanılmasıyla birlikte numunelerin eğilme dayanımı da %35 civarında artmıştır.
- Yüksek dayanımlı çelik lifler 20 kg/m³ ve 30 kg/m³ kullanıldıklarında ise eğilme dayanımındaki artış % 20 mertebesinde dir. Kiriş numunelerde eğilme Dayanımındaki artış lif dayanımındaki değişimden çok, lif miktarının artmasıyla daha fazla oranda artmaktadır.

- Betona çelik lif eklenmesi ile kırılma enerjisinde meydana gelen artışlar lif miktarına göre değişmektedir. Bağlı olarak düşük dayanımlı 30 kg/m³ miktarında çelik lif kullanımı sonucu kırılma enerjisi, yüksek dayanımlı 20 kg/m³ miktarında çelik lif kullanımı sonucu oluşan kırılma enerjisinden fazla olduğu görülmüştür. Bu noktadan hareketle, lif dayanımını arttırmak yerine lif içeriğini arttırmanın kırılma enerjisini daha fazla arttırdığı görülmüştür.
- Düşük dayanımlı çelik lifli numunelerin kullanılabilirlik sınır durumundaki eğilme dayanımlarındaki artış lif içeriğinin artmasıyla % 20 civarında olmakla beraber taşıma gücü sınır durumundaki artış % 55 civarındadır. Bu durum yüksek dayanımlı çelik liflerde ise bu durum kullanılabilirlik sınır durumunda % 34 iken taşıma gücü sınır durumunda %25 mertebesinde kalmıştır.
- Lif miktarının artmasıyla kiriş numunelerinin Alman Beton Birliği Yöntemi'ne göre hesaplanan kullanılabilirlik sınır durumundaki (KSD) eğilme dayanımları fazla artmamakta iken taşıma gücü sınır durumundaki (TSD) eğilme dayanımlarında belirgin bir artış olmuştur.
- S/B oranı 0,60 olan kiriş numunelerine naylon ve makrosentetik numunelerin ayrı ayrı 3 kg/m³ lif eklenerek üretilen kiriş numunelerinin kırılma enerjileri arasında belirgin bir fark yoktur.
- Bağlı olarak naylon liflerin numunelere eklenmesi eğilme dayanımlarında % 66'ya varan, makrosentetik liflerin eklenmesi ise % 50 civarında artış sağlamıştır. Naylon lifi numunelerin eğilme dayanımları makrosentetik lifli numunelerin eğilme dayanımlarından yaklaşık %10 fazladır.
- Çelik lifli numunelerden KSD ve TSD'ye göre elde edilen eşdeğer eğilme dayanımları, naylon ve makrosentetik liflerden elde edilen eşdeğer eğilme dayanımlarından belirgin ölçüde fazladır.
- Çelik lifli numunelerin kırılma enerjileri makrosentetik ve naylon lifli numunelerin kırılma enerjilerinin 20 kg/m³ düşük dayanımlı çelik lif kullanıldığında 2 katı, 30 kg/m³ düşük dayanımlı çelik lif kullanıldığında 3 katı, 20 kg/m³ yüksek dayanımlı çelik lif kullanıldığında 3 katı, 30 kg/m³ yüksek dayanımlı çelik lif kullanıldığında ise 4 katına çıkmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Erdoğan, T. Y.** (2003). Beton, ODTÜ geliştirme vakfı Yayıncılık A.Ş, Ankara
- [2] **Richard, P. ve Cheyrezy, M. H.** (1994). Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, American Concrete Institute, ACI SP-144.
- [3] **Bayramov, F.** (2004). Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Şimşek, O.** (2009). Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık.
- [5] **Kurt, G.** (2006). Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [6] **Hannant, D.J.** (2003): Advanced Concrete Technology, Elsevier Ltd.
- [7] **Cement&ConcreteInstitute.**(2010).Fibre reinforced concrete, Cement&Concrete Institute, Midrand.
- [8] **Bentur, A. ve Mindess, S.** (2007). Fibre Reinforced Cementitious Composites, 2nd Edition Taylor&Francis Group.
- [9] **TS 10513.** (1992). Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [10] **Bayramov, F.** (2004). Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] **Chawla, K.K.** (1998). Fibrous Materials, Cambridge University Press, Cambridge.
- [12] **Taşdemir, M.A. ve Bayramov F.** (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, *İTÜ dergisi*, Cilt 1, Sayı 2, 125-144.
- [13] **Neville, A.M. ve Brooks, J.J.** (2010). Concrete Technology, Pearson Education.
- [14] **Neville, A.M.** (2008). Properties of Concrete, Pearson Education.
- [15] **Mindness, S. ve Young, J. Darwin, D.** (2003). Concrete, Second edition, Pearson Education.
- [16] **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.
- [17] **SHRP-C/FR-91-103.** (1991). High Performance Concretes, A State of the Art Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC.

- [18] **Arisoy, B.** (2005). Lifli Hafif Betonların Optimum Karışım Tasarımı, Deprem sempozyumu, Kocaeli.
- [19] **ASTM C 1116.** (1997). Standart specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete, The American Society for Testing and Materials, U.S.A
- [20] **Aral, M.** (2006). Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir Optimum Tasarım, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [21] **JCI-DFRCC Committee.** (2003). “DFRCC Terminology and Application Concepts”, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No.3.
- [22] **Taşdemir, M., A., Şengül, Ö., Şengül, C.** (2013). Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı, İstön Teknik Rapor, İTÜ.
- [23] **Balaguru P,B. ve Shah, S.P.** (1992). Fiber-Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill,Inc.
- [24] **ACI Committee 544,** (1996) State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.1R-96.
- [25] **Uğur, A.** (2007). Lif Donatıların Yüksek Dayanımlı Betonlarda Yarma Dayanımı-Basınç Dayanımı İlişkisine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26] **Xiaokang, S. ve Yadong, X.** (2011). Summary Behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete, Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE) International Conference, 22-24 Nisan.
- [27] **Kiremitçi, C. A.** (2008). Çelik Tel Donatılı Ultra Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [28] **Bayasi, Z. ve Soroushian P.** (1991). Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete, ACI Materials Journal, 88, 129-134.
- [29] **Banthia, N. ve Trottier, J.F.** (1995). Concrete reinforced with deformed steel fibers Part II:Toughness characterization, ACI Materials Journal, 146-154.
- [30] **Gebman, M.,** (2001). Application of steel fiber reinforced concrete in seismic beamcolumn joints, MSc Thesis, San Diego State University, San Diego.
- [31] **Gao, J., Sun, W. ve Morino, K.** (1997). Mechanical properties of steel fibre reinforced, high-strength, lightweight concrete, Cement and Concrete Composites, 307-313.
- [32] **Rossi, P.** (2000). Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concretes(UHPFRC) An Overwiev, Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes(FRC), Lyon, France, 13-15 September. 87-100.
- [33] **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.

- [34] **Betterman, L. R., Ouyang, C., Shah, S. P.,** (1995). “Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar”, *Advanced Cement Based Materials*, 53-61.
- [35] **Sarı, D. S.** (2008). Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Davranışına Lif İçeriğinin ve Dayanımının Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [36] **Yeğınobalı, A.** (2002). Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB/ARGE Enstitüsü, Ankara.
- [37] **FIP.** (1988). Condensed Silica Fume in Concrete , State of Art Report, 37 p, Thomas Telford, London
- [38] **ACI Committee 234.** (2000). Guide for the use of silica fume in concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [39] **Yalçın, M.** (2009). Çelik Lif Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı ve Optimizasyonu, *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [40] **DBV.** (1996). Recommendation: Basis for the design of industrial floor slabs out of steel reinforced concrete, Eingenverlag, Wiesbaden, Germany.
- [41] **Yalçın, M., Taşdemir, C., Gökalp, İ., Ekim, H. ve Yerlikaya, M.,** (2007). Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanılabilirlik ve Taşıma Gücü Sınır Durumlarına Göre Tasarımı, 7.Ulusal Beton Kongresi, 28-30 Kasım, İstanbul, 353-362.

EKLER

EK A: Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar ve Grafikler

EK B: Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

EK C: Yarmada Çekme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar

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

Çizelge A.1 : Kiriş numunelerinden elde edilen kırılma enerjisi değerleri.

Numune Kodu	Kırılma Enerjisi (J/m ²)	Ortalama (J/m ²)
W38S0-1	127	113
W38S0-2	111	
W38S0-3	100	
W38LS20-1	1105	1115
W38LS20-2	944	
W38LS20-3	1297	
W38LS30-1	1723	1732
W38LS30-2	1983	
W38LS30-3	1489	
W38HS20-1	1426	1564
W38HS20-2	1540	
W38HS20-3	1725	
W38HS30-1	2184	2037
W38HS30-2	2003	
W38HS30-3	1923	

Çizelge A.2 : Kiriş numunelerinden elde edilen eğilme dayanımı değerleri.

Numune Kodu	Eğilme dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
W38S0-1	2,50	2,47
W38S0-2	2,66	
W38S0-3	2,26	
W38LS20-1	3,07	2,75
W38LS20-2	2,32	
W38LS20-3	2,87	
W38LS30-1	3,62	3,74
W38LS30-2	4,22	
W38LS30-3	3,37	
W38HS20-1	2,82	3,1
W38HS20-2	3,18	
W38HS20-3	3,30	
W38HS30-1	4,05	3,83
W38HS30-2	3,73	
W38HS30-3	3,71	

Çizelge A.3 : Kiriş numunelerinden elde edilen KSD ve TSD'ye göre eşdeğer gerilme, dayanım sınıfı ve artık gerilme değerleri.

Numune Kodu	Eşdeğer Gerilme (f_{es})		Artık Gerilme (MPa)		Residuel Dayanım Sınıfı
	KSD	TSD	fr1 (ÇAAD= 0,5mm)	fr2 (ÇAAD=3,5mm)	
W38S0-1	0,52	0,14	0,33	0	FL 0,5/0
W38S0-2	0,45	0,14	0,25	0	
W38S0-3	0,44	0,12	0,28	0	
Ortalama	0,47	0,13	0,29	0	
W38LS20-1	1,34	1,25	2,16	1,17	FL 2.0/1.5
W38LS20-2	0,98	1,04	1,54	1,16	
W38LS20-3	1,30	1,47	2,33	1,65	
Ortalama	1,20	1,25	2,01	1,33	
W38LS30-1	1,58	1,95	2,78	2,34	FL 3.0/2.5
W38LS30-2	1,82	2,24	3,50	2,65	
W38LS30-3	1,28	1,65	2,26	1,93	
Ortalama	1,56	1,95	2,85	2,31	
W38HS20-1	1,17	1,67	2,01	2,78	FL 2.0/3.0
W38HS20-2	1,21	1,78	2,10	3,10	
W38HS20-3	1,37	1,91	2,60	3,15	
Ortalama	1,25	1,79	2,24	3,00	
W38HS30-1	1,78	2,39	3,08	3,79	FL 3.0/3.5
W38HS30-2	1,54	2,16	2,95	3,49	
W38HS30-3	1,73	2,21	3,17	3,14	
Ortalama	1,68	2,25	3,07	3,47	

Çizelge A.4 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerinden elde edilen çatlak ağzı açılma deplasmanlarına göre kırılma enerjisi değerleri.

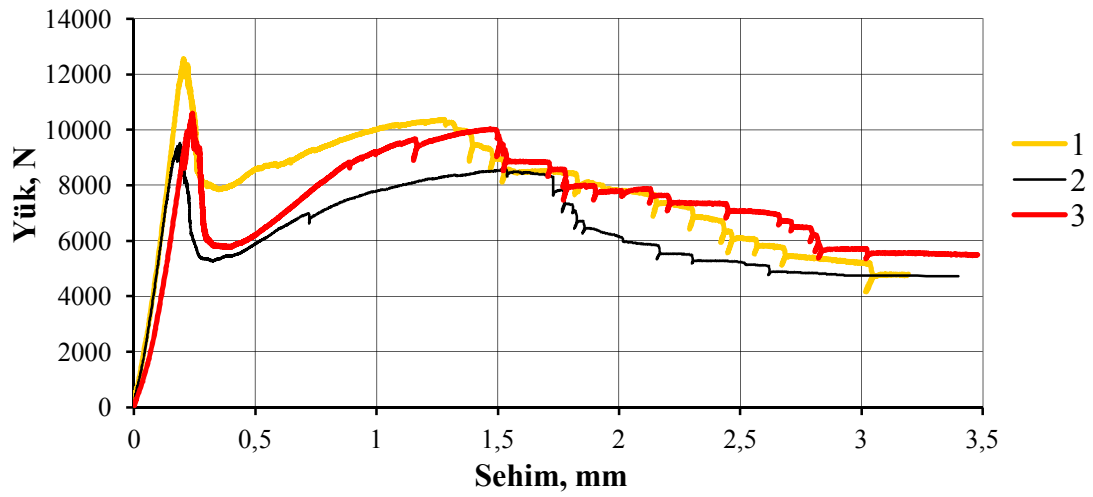
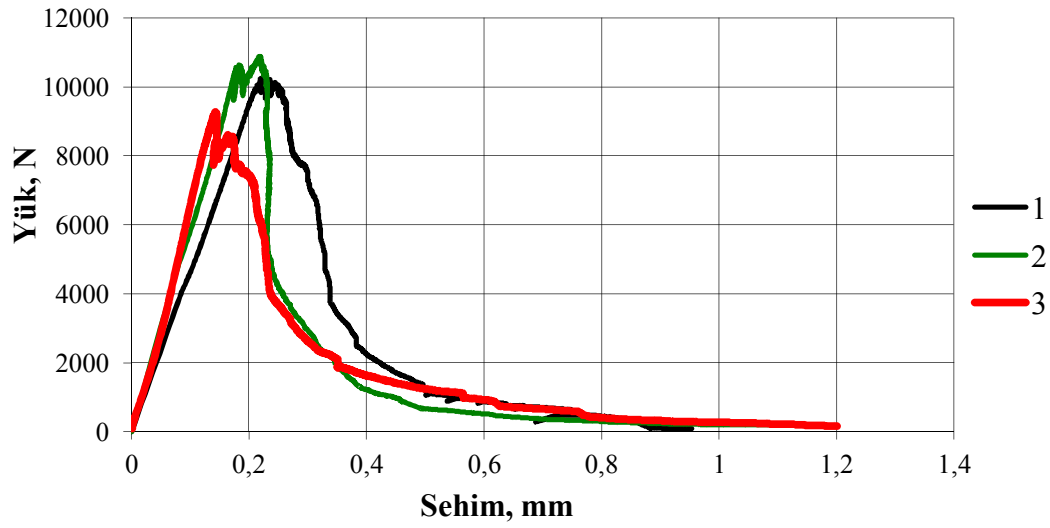
Numune Kodu	Kırılma Enerjisi (Joule/m ²)				
	Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı, mm				
	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
W60F0-1	54	103	118	0	0
W60F0-2	63	99	112	0	0
W60F0-3	64	118	133	0	0
Ortalama	60	107	121	0	0
W60N3-1	90	152	264	392	499
W60N3-2	98	164	267	375	456
W60N3-3	93	149	273	409	536
Ortalama	94	155	268	392	497
W60MS3-1	64	143	266	395	518
W60MS3-2	85	188	310	435	570
W60MS3-3	80	151	275	406	543
Ortalama	76	161	284	412	544

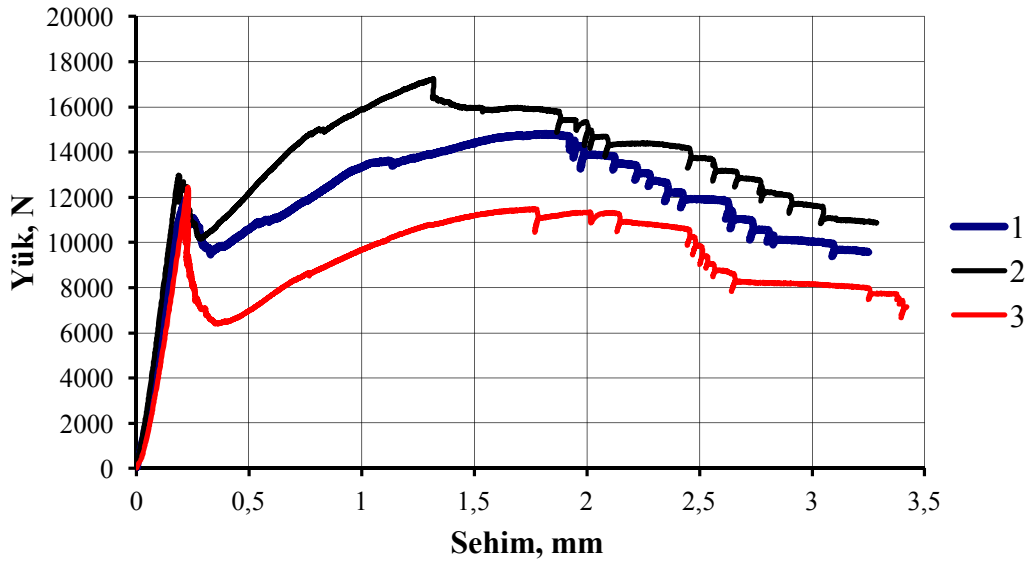
Çizelge A.5 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerinden elde edilen çatlak ağzı deplasmanlarına göre kalan eğilme dayanım ve net eğilme dayanımları değerleri.

Numune Kodu	Kalan Eğilme Dayanımı (MPa)					Net Eğilme Dayanımı (MPa)
	Çatlak Ağız Açılma Deplasmanı (mm)					
	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5	
W60F0-1	2,67	0,33	0,04	0	0	2,67
W60F0-2	2,60	0,29	0,07	0	0	2,60
W60F0-3	2,71	0,31	0,03	0	0	2,71
Ortalama	2,66	0,31	0,05	0	0	2,66
W60N3-1	3,38	0,82	0,99	0,99	0,69	4,13
W60N3-2	4,03	0,81	0,87	0,79	0,40	4,51
W60N3-3	3,43	0,95	1,03	1,04	0,74	4,58
Ortalama	3,61	0,86	0,96	0,94	0,61	4,41
W60MS3-1	3,37	1,04	1,01	1,10	1,14	3,77
W60MS3-2	3,73	1,16	1,02	1,03	1,06	3,81
W60MS3-3	3,75	1,08	0,99	1,04	1,06	4,20
Ortalama	3,62	1,09	1,01	1,06	1,09	3,93

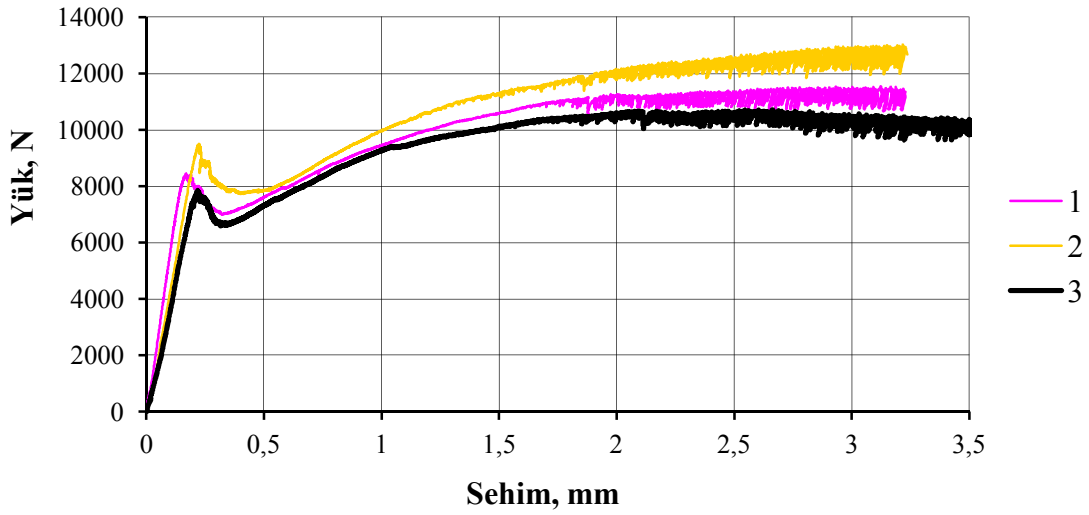
Çizelge A.6 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerinden elde edilen KSD ve TSD'ye göre eşdeğer gerilme, dayanım sınıfı ve artık gerilme değerleri.

Numune Kodu	Eşdeğer Gerilme (feş)		Artık Gerilme (MPa)		Residuel Dayanım Sınıfı
	KSD	TSD	fr1(0,5)	fr2(3,5)	
W60F0-1	0,49	0,14	0,5	0	FL 0,5/0
W60F0-2	0,45	0,14	0,3	0	
W60F0-3	0,51	0,15	0,31	0	
Ortalama	0,48	0,14	0,37	0	
W60N3-1	0,74	0,55	0,98	0,70	FL 1.0/1.0
W60N3-2	0,65	0,49	0,82	0,69	
W60N3-6	0,61	0,49	0,95	0,74	
Ortalama	0,67	0,51	0,92	0,71	
W60MS3-1	0,64	0,41	0,74	0,73	FL 1,5/1.0
W60MS3-2	0,80	0,55	0,93	1,01	
W60MS3-3	0,77	0,51	3,21	0,94	
Ortalama	0,74	0,49	1,62	0,89	

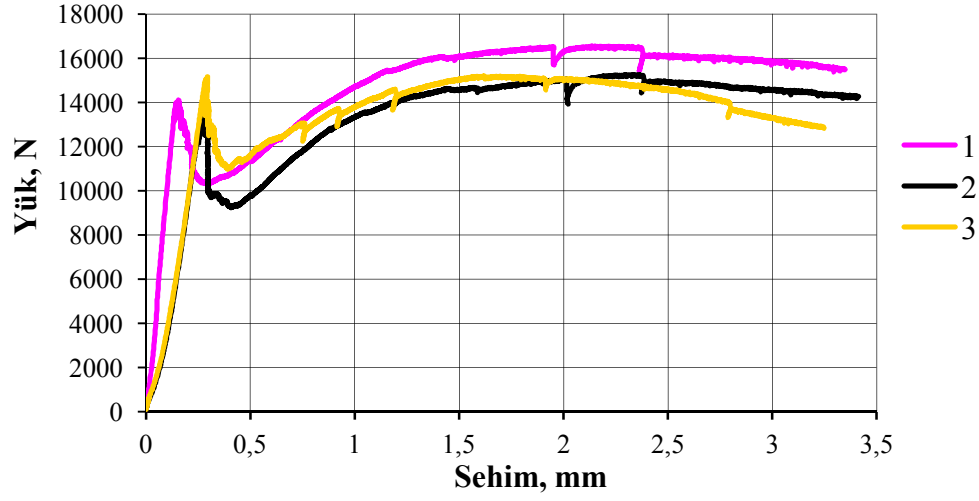




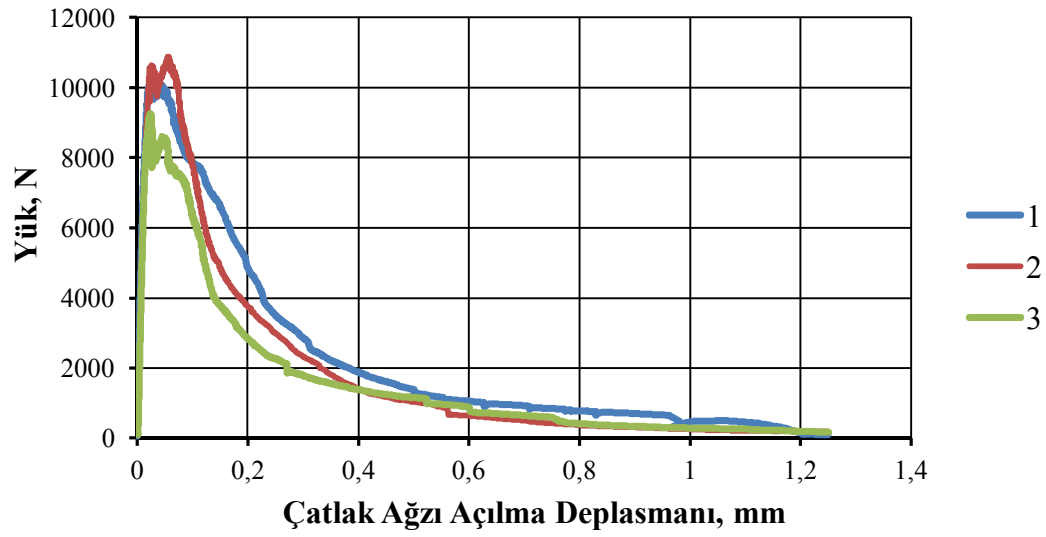
Şekil A.3 : Su/çimento oranı 0,38 olan 30 kg düşük dayanımlı çelik tel içeren numunelere ait yük-sehim grafikleri.



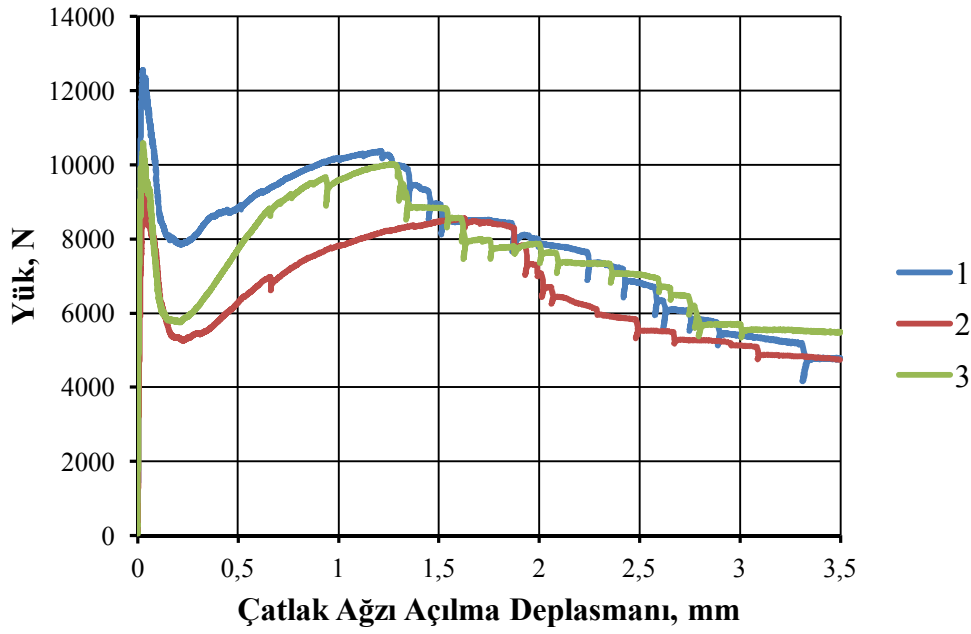
Şekil A.4 : Su/çimento oranı 0,38 olan 20 kg yüksek dayanımlı çelik tel içeren numunelere ait yük-sehim grafikleri.



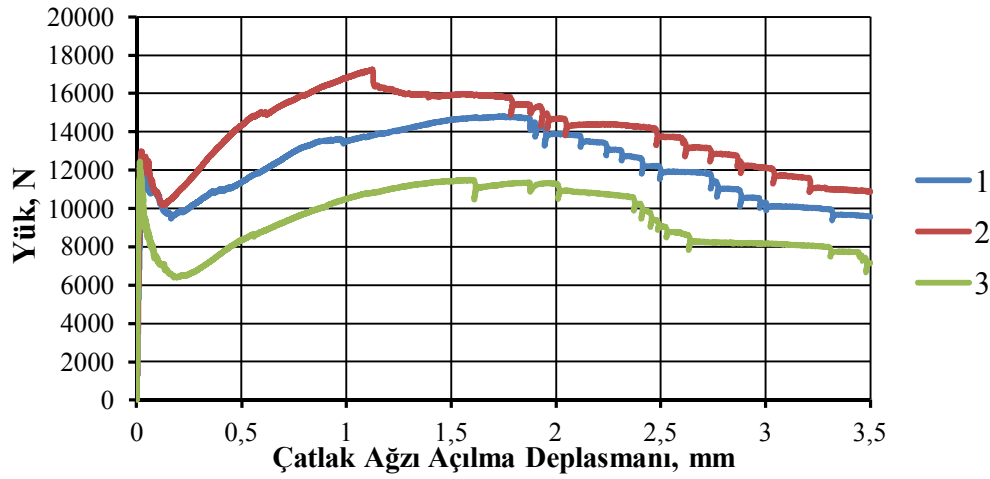
Şekil A.5 : Su/çimento oranı 0,38 olan 30 kg yüksek dayanımlı çelik tel içeren numunelere ait yük-sehim grafikleri.



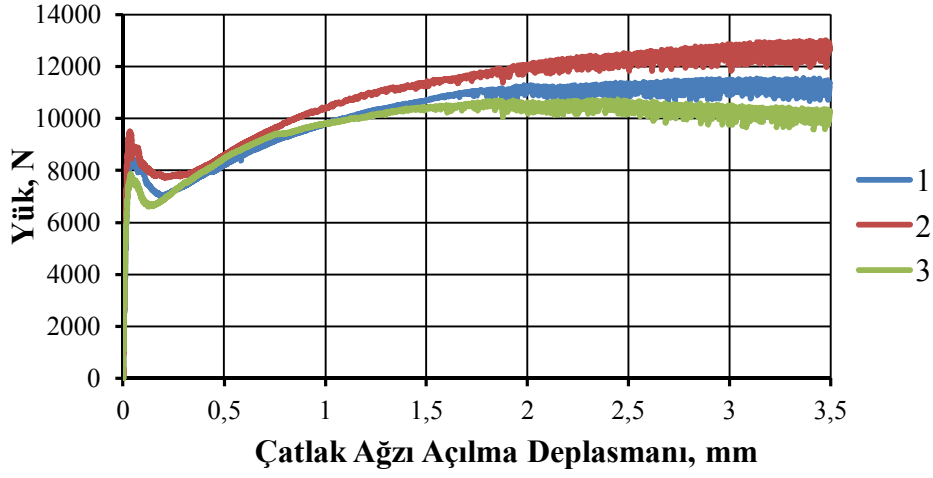
Şekil A.6 : Su/çimento oranı 0,38 olan yalın kiriş numunelerinin yük- çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri.



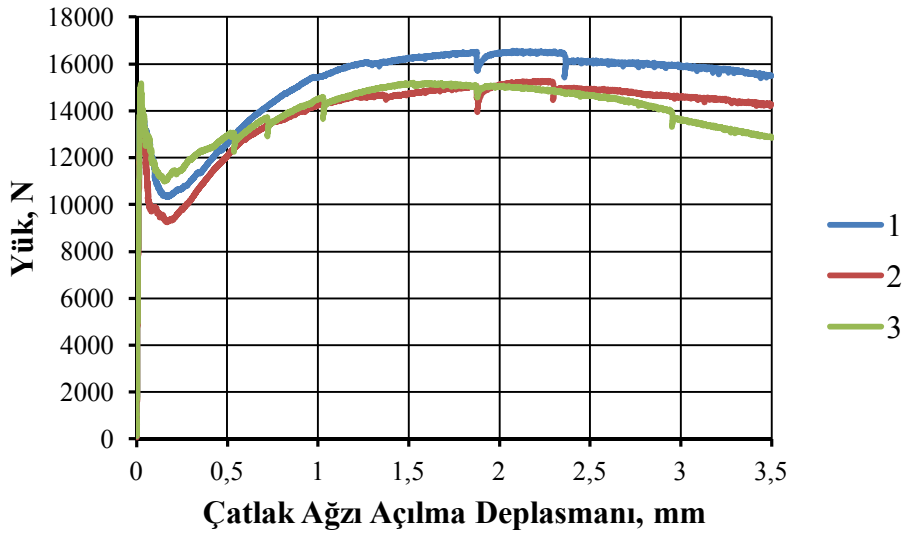
Şekil A.7 : Su/çimento oranı 0,38 olan 20 kg düşük dayanımlı çelik tel içeren kiriş numunelerinin yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



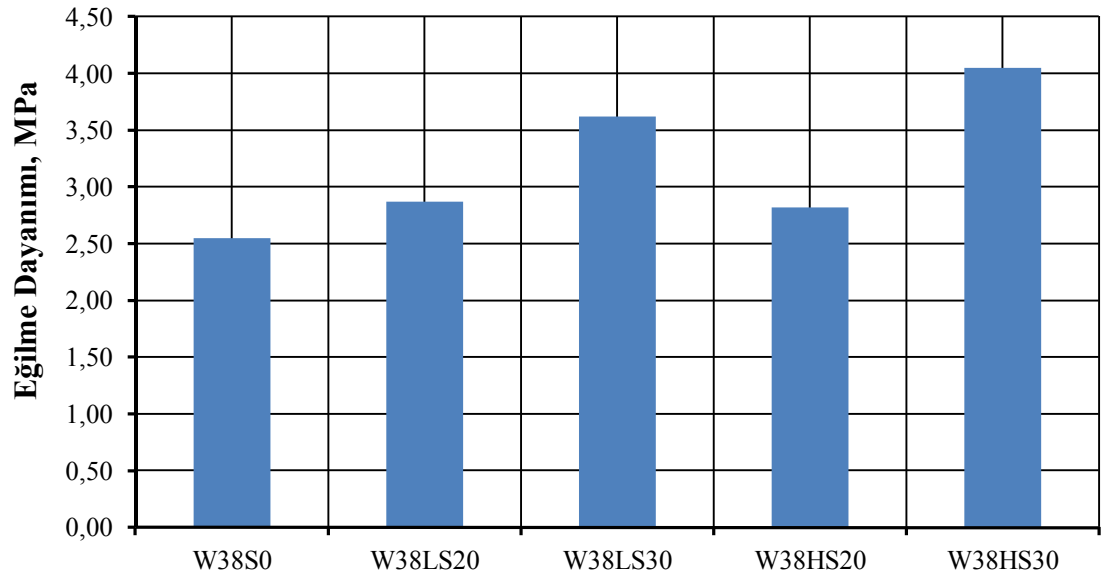
Şekil A.8 : Su/çimento oranı 0,38 olan 30 kg düşük dayanımlı çelik tel içeren kiriş numunelerinin yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



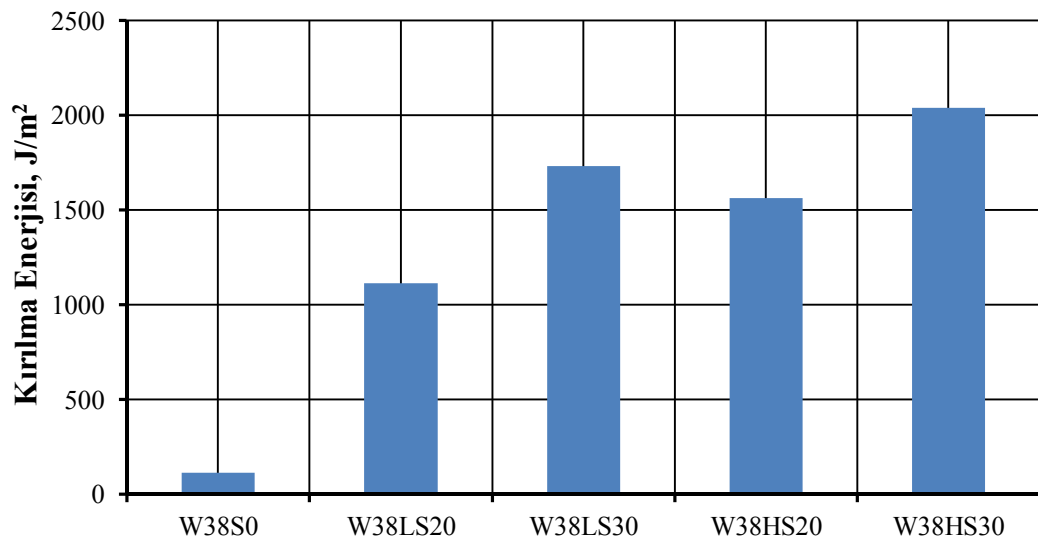
Şekil A.9 : Su/çimento oranı 0,38 olan 20 kg yüksek dayanımlı çelik tel içeren kiriş numunelerinin yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



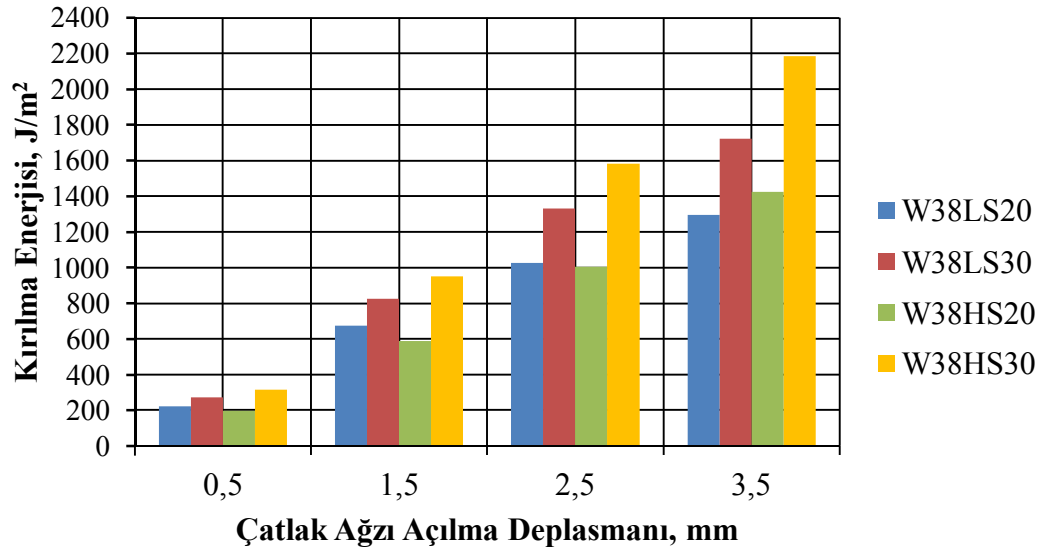
Şekil A.10 : Su/çimento oranı 0,38 olan 30 kg yüksek dayanımlı çelik tel içeren kiriş numunelerinin yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



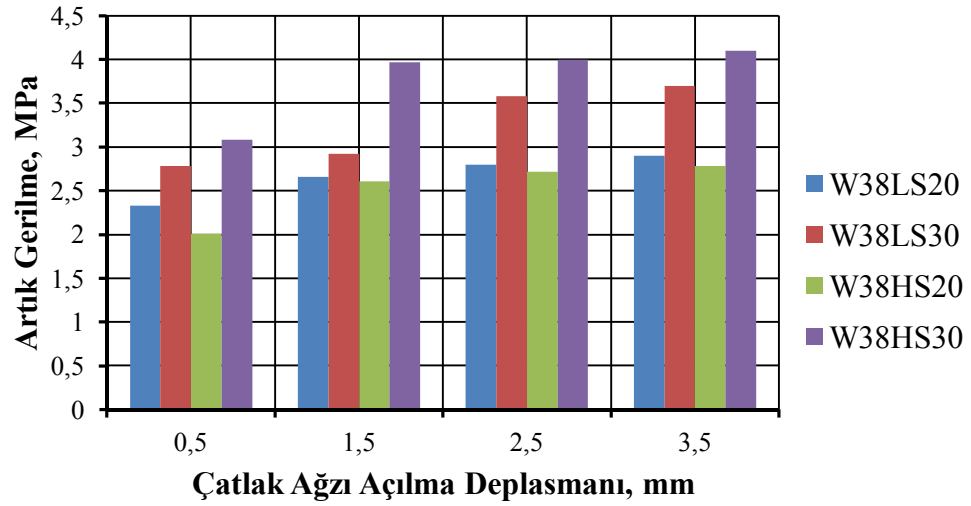
Şekil A.11 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin eğilme dayanımlarının grafikleri.



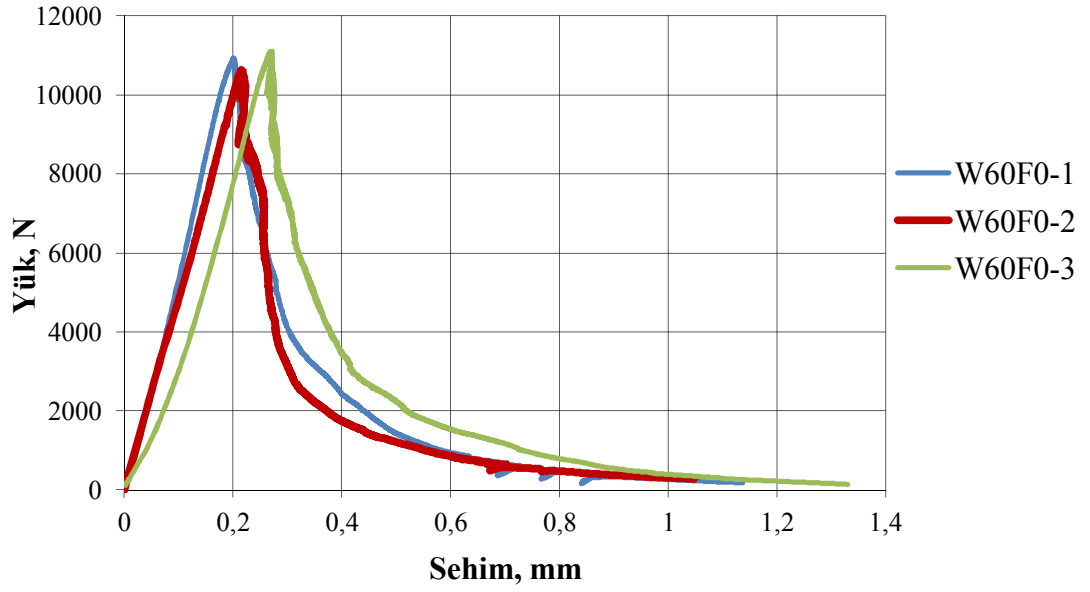
Şekil A.12 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin enerjilerinin grafikleri.



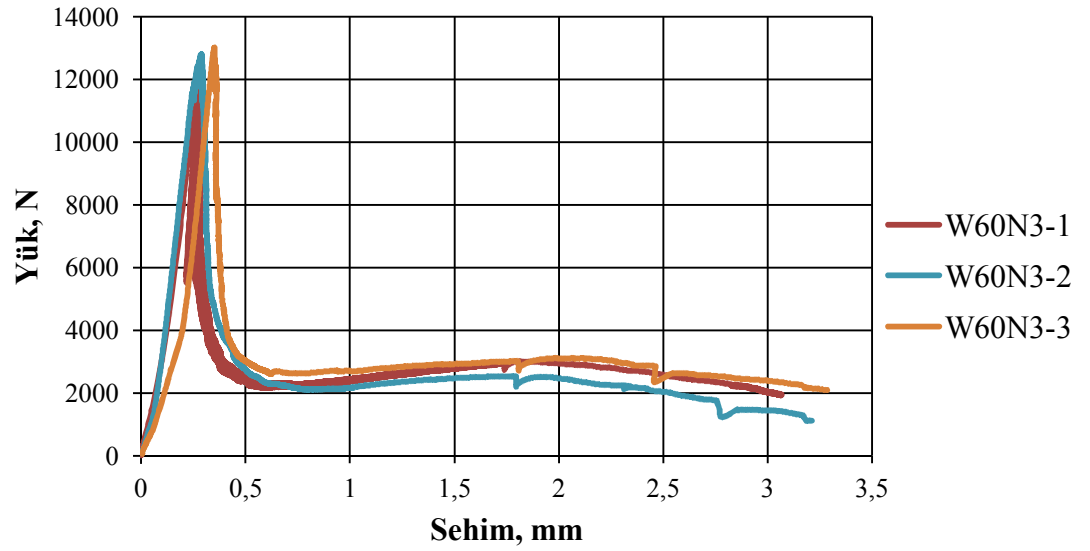
Şekil A.13 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin enerji - çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



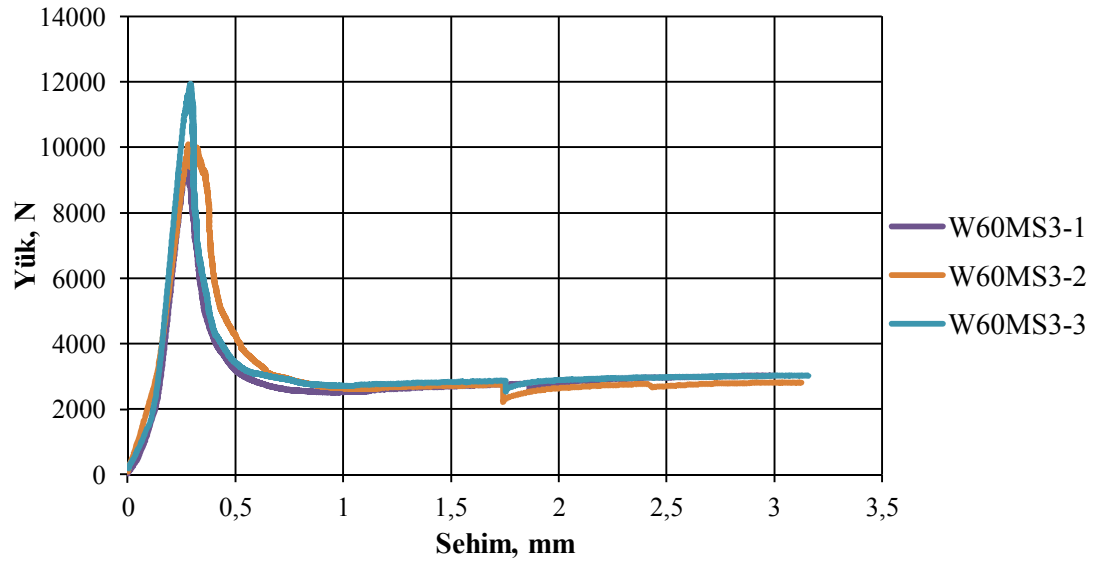
Şekil A.14 : Su/çimento oranı 0,38 olan kiriş numunelerinin artık gerilme – çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



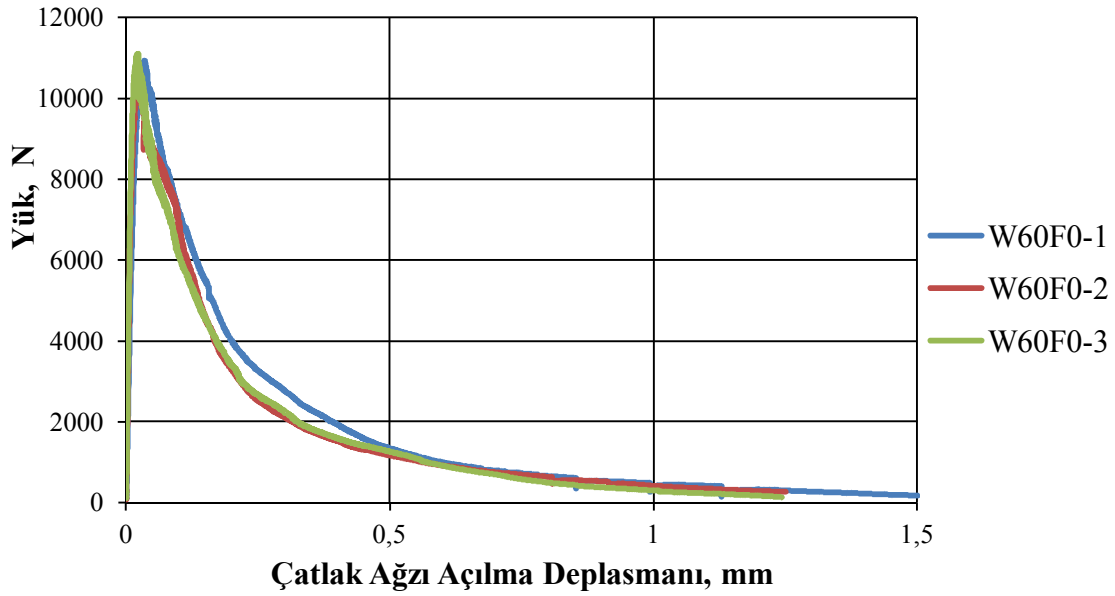
Şekil A.15 : S/Ç oranı 0,60 olan lifsiz kiriş numunelerine ait yük- sehim grafiği.



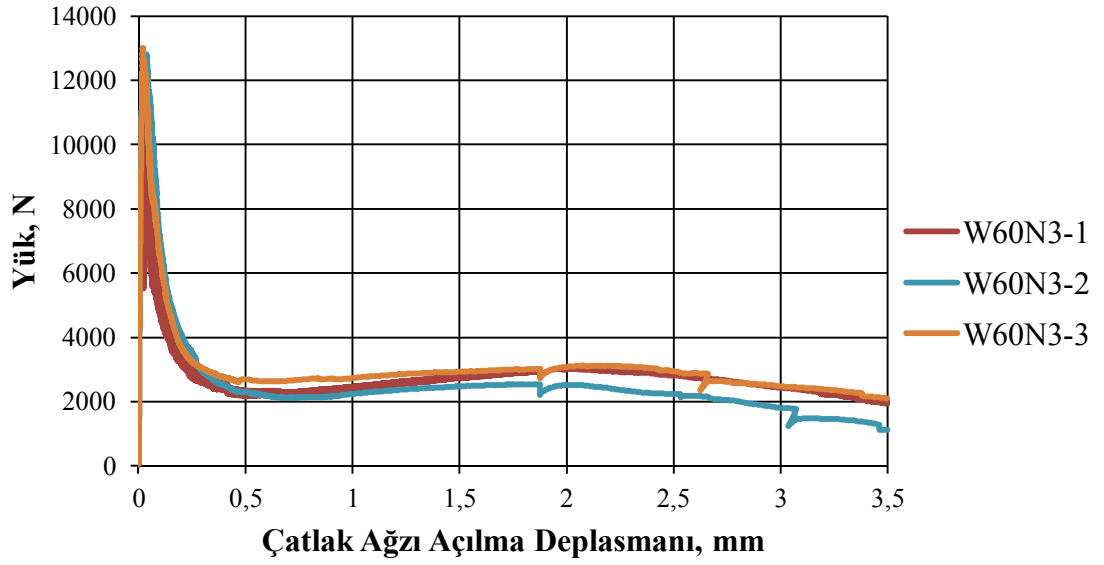
Şekil A.16 : S/Ç oranı 0,60 olan naylon lifli kiriş numunelerine ait yük- sehim grafiği.



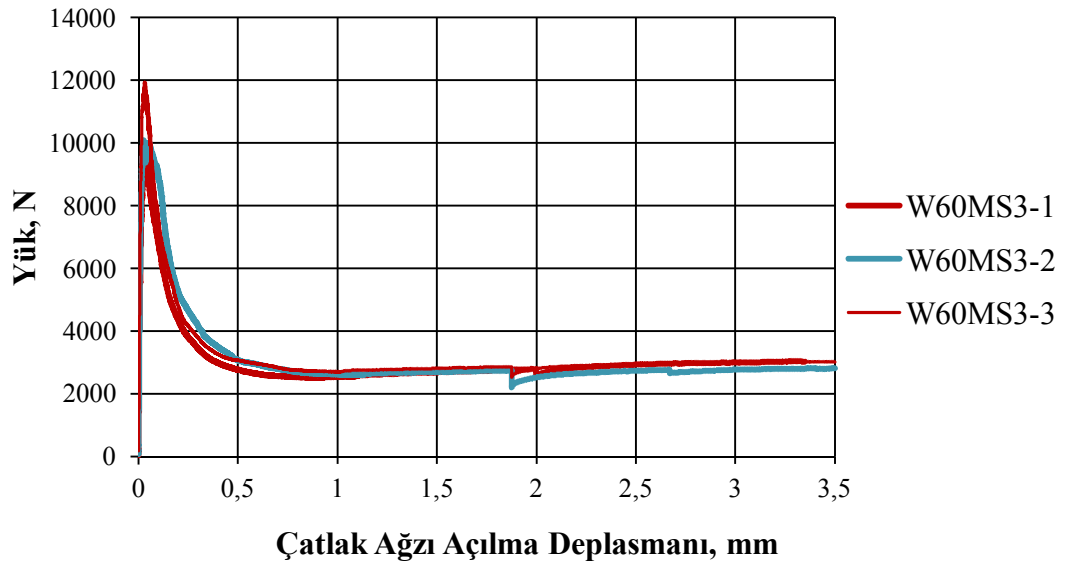
Şekil A.17 : S/Ç oranı 0,60 olan makrosentetik lifli kiriş numunelerine ait yük-sehim grafiği.



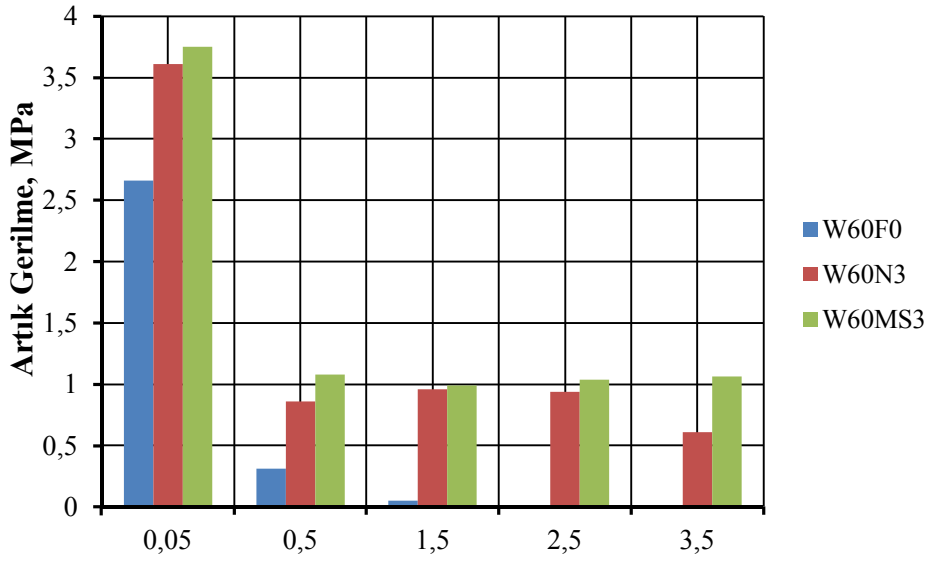
Şekil A.18 : S/Ç oranı 0,60 olan lifsiz kiriş numunelerine ait yük- çatlak ağız açılma deplasmanı grafiği.



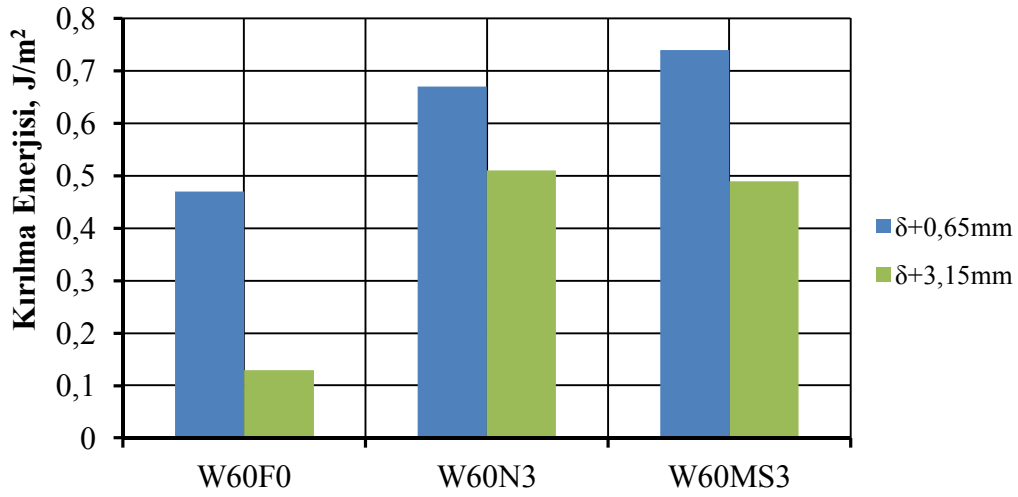
Şekil A.19 : S/Ç oranı 0,60 olan naylon lifli kiriş numunelerine ait yük- çatlak ağız açılma deplasmanı grafiği.



Şekil A.20 : S/Ç oranı 0,60 olan makrosentetik lifli kiriş numunelerine ait yük- çatlak ağız açılma deplasmanı grafiği.



Şekil A.21 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerine ait çatlak ağzı açılma deplasmanına göre artık gerilme grafiği.



Şekil A.22 : S/Ç oranı 0,60 olan kiriş numunelerine ait KSD ve TSD'ye göre kırılma enerjileri grafiği.

EK B: Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar

Çizelge B.1 : S/Ç oranı 0,38 olan çelik lifli betonlara ait silindir basınç dayanımı değerleri.

Numune Kodu	Gerilme (MPa)	Ortalama (MPa)
W38S0-1	58	63
W38S0-2	66	
W38S0-3	64	
W38S0-4	62	
W38LS20-1	63	63
W38LS20-2	65	
W38LS20-3	65	
W38LS20-4	59	
W38LS30-1	59	59
W38LS30-2	61	
W38LS30-3	59	
W38LS30-4	57	
W38HS30-1	71	68
W38HS30-2	66	
W38HS30-3	65	
W38HS30-4	68	

Çizelge B.2 : S/Ç oranı 0,38 olan çelik lifli betonlara ait elastisite modülü değerleri.

Numune Kodu	Elastisite modülü (GPa)	Ortalama (GPa)
W38S0-1	32,45	32,27
W38S0-2	30,92	
W38S0-3	33,44	
W38LS20-1	31,01	30,68
W38LS20-2	31,84	
W38LS20-3	29,19	
W38LS30-1	32,12	31,68
W38LS30-2	31,12	
W38LS30-3	31,79	
W38HS30-1	34,11	33,03
W38HS30-2	32,04	
W38HS30-3	32,95	

Çizelge B.3 : S/Ç oranı 0,60 olan lifli betonlara ait silindir basınç dayanımı değerleri.

Numune Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
W60F0-1	52,66	50,74
W60F0-2	50,85	
W60F0-3	51,99	
W60F0-4	51,81	
W60F0-5	47,19	
W60F0-6	49,96	
W60N3-1	51,85	51,48
W60N3-2	51,94	
W60N3-3	52,27	
W60N3-4	52,31	
W60N3-5	49,41	
W60N3-6	51,07	
W60MS3-1	50,71	49,32
W60MS3-2	48,73	
W60MS3-3	49,61	
W60MS3-4	49,72	
W60MS3-5	47,74	
W60MS3-6	49,41	

Çizelge B.4 : S/Ç oranı 0,60 olan lifli betonlara ait elastisite modülü değerleri.

Numune Kodu	Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama
W60F0-1	29,29	28,96
W60F0-2	28,55	
W60F0-3	29,65	
W60F0-4	28,35	
W60N3-1	28,1	27,53
W60N3-2	25,97	
W60N3-3	28,12	
W60N3-4	27,93	
W60MS3-1	27,91	27,78
W60MS3-2	27,9	
W60MS3-3	27,25	
W60MS3-4	28,05	

Çizelge C.1 : S/Ç oranı 0,38 olan çelik lifli betonlara ait yarmada çekme dayanımı değerleri.

Numune Kodu	Yarma-Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
W38S0-1	3,37	3,56
W38S0-2	3,67	
W38S0-3	3,43	
W38S0-4	3,99	
W38S0-5	3,15	
W38S0-6	3,75	
W38LS20-1	4,23	4,44
W38LS20-2	4,51	
W38LS20-3	5,26	
W38LS20-4	4,87	
W38LS20-5	4,20	
W38LS20-6	3,57	
W38LS30-1	5,41	5,4
W38LS30-2	5,09	
W38LS30-3	6,62	
W38LS30-4	5,71	
W38LS30-5	4,80	
W38LS30-6	4,79	
W38HS30-1	7,38	6,2
W38HS30-2	5,86	
W38HS30-3	5,26	
W38HS30-4	6,28	

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Cihat akır

Doğum Yeri ve Tarihi: Adana/1987

E-posta: cihcakir@gmail.com

Lisans: Erciyes Üniversitesi (2010)

