

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TİPTEKİ LİFLERİN BETONUN MEKANİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mertcan SARI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EKİM 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TİPTEKİ LİFLERİN BETONUN MEKANİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mertcan SARI
(501101066)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA

EKİM 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101066 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mertcan SARI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**FARKLI TİPTEKİ LİFLERİN BETONUN MEKANİK DAVRANIŞINA ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÖKÇE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **6 Eylül 2013**
Savunma Tarihi: **7 Ekim 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 Araş.Gör. Cengiz Şengül'e, deneysel çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitimim boyunca her zaman her konuda büyük desteklerini gördüğüm aileme ve yanımda olan bütün arkadaşlarıma özellikle Ebru ÖZEN' e, iş arkadaşım ve ağabeyim Mustafa KARMİL' e ve tezimin her aşamasında yanımda olan meslektaşım, arkadaşım İnş. Yük. Müh. Cihat ÇAKIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ekim 2013

Mertcan SARI
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
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 Çimento Esaslı Kompozitler	3
2.1.1 Normal betonlar	3
2.1.2 Yüksek dayanımlı betonlar	3
2.2 Lifler Hakkında Genel Bilgi	5
2.2.1 Lif çeşitleri.....	7
2.2.1.1 Doğal lifler	8
2.2.1.2 Metalik lifler.....	8
2.2.1.3 Sentetik lifler	10
2.2.1.3.1 Akrilik lif	10
2.2.1.3.2 Aramid lif	11
2.2.1.3.3 Naylon lif.....	11
2.2.1.3.4 Polyester lif.....	11
2.2.1.3.5 Polipropilen lif.....	12
2.2.1.3.6 Poliolefin lif.....	12
2.2.1.4 Cam lifler.....	13
2.3 Lif Özelliklerinin Kompozitin Özelliklerine Etkisi	13
2.2.1 Lif geometrisinin etkisi.....	13
2.2.2 Lif boyunun etkisi.....	14
2.2.3 Lif narinlik oranı ve lif yüzdesinin etkisi	15
2.4 Lif Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri	17
2.4.1 Çelik lif takviyeli kompozitlerin özellikleri	17
2.4.2 Polimer lif takviyeli kompozitlerin özellikleri	19
2.4.3 Naylon lif takviyeli kompozitlerin özellikleri	20
2.4.4 Cam lifi takviyeli kompozitlerin özellikleri	20
2.5 Lifli Kompozitlerin Kullanım Alanları	21
2.6 Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkileri	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25
3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler	25
3.1.1 Çimento.....	25
3.1.2 Agregalar	25
3.1.3 Süper akışkanlaştırıcı kimyasal	27

3.1.4 Çelik lif	27
3.1.5 Makro Sentetik Lifler.....	27
3.2.5.1 Poliolefin lif	27
3.2.5.2 Kopolimer lif	27
3.1.6 Bazalt lif	28
3.2 Deneysel Çalışmanın Amacı ve İçeriği	28
3.3 Beton Karışımları ve Numune Kodları	29
3.4 Numune Boyutları	30
3.5 Taze Beton Deneyleri	30
3.5.1 Birim hacim ağırlık deneyleri	30
3.5.2 Slump(çökme) deneyi	30
3.6 Sertleşmiş Beton Deneyleri	31
3.6.1 Silindir basınç deneyi	31
3.6.2 Yarma çekme deneyi	31
3.6.3 Üç noktalı eğilme deneyi	32
3.6.4 Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımının belirlenmesi	33
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	35
4.1 Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi ..	35
4.2 Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	36
4.3 Alman Beton Birliğine Göre Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	41
5. GENEL SONUÇLAR	45
KAYNAKLAR	47
EKLER	51
ÖZGEÇMİŞ	69

KISALTMALAR

ABBY	:Almanya Beton Birliği Yöntemi
ÇAAD	:Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı
ÇTDB	:Çelik Tel Donatılı Beton
DD	:Düşük Dayanımlı
ECC	:Tasarlanmış çimento esaslı kompozit
FRC	:Lif donatılı beton
FRCC	:Lif donatılı çimento esaslı kompozit
FRM	:Lif donatılı harç
GPa	:Giga Paskal
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
S/B	:Su/Bağlayıcı oranı
TS	:Türk Standartları
YD	: Yüksek Dayanımlı
YDB	:Yüksek Dayanımlı Beton
YDÇT	:Yüksek Dayanımlı Çelik Tel
PP	:Polipropilen
PE	:Polietilen
PO	:Poliiolefin
KP	:Kopolimer

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1 : Normal dayanımlı beton(NBD), yüksek dayanımlı beton(YDB) ve reaktif pudra betonlarının(RPC) mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	4
Çizelge 2.2 : Farklı türdeki liflere ait fiziksel özellikler	7
Çizelge 2.3 : Bazı metalik liflere ait fiziksel ve mekanik özellikler	9
Çizelge 2.4 : Sentetik liflerin özellikleri	12
Çizelge 2.5 : Bazı cam liflerine ait fiziksel ve mekanik özellikler.....	13
Çizelge 2.6 : Farklı çelik lif tipi örnekleri	14
Çizelge 2.7 : Lif takviye betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri.....	17
Çizelge 2.8 : Cam elyafı üretilen çeşitli camların bazı özellikleri.....	21
Çizelge 2.9 : Çeşitli lif tiplerinin kullanım alanları..	22
Çizelge 3.1 : Kullanılan çimento özellikleri	25
Çizelge 3.2 : Üretimde kullanılan agregaların elek analizi.....	26
Çizelge 3.3 : Üretimde kullanılan agregaların özellikleri.....	26
Çizelge 3.4 : Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri.	27
Çizelge 3.5 : Düşük dayanımlı kancalı uçlu çelik telin özellikleri.	27
Çizelge 3.6 : Poliolefin lifin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	27
Çizelge 3.7 : Kopolimer lifin fiziksel ve mekanik özellikleri.	28
Çizelge 3.8 : Bazalt lifin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	28
Çizelge 3.9 : Karışımların gerçek beton bileşimleri	29
Çizelge 3.10 : Yalın ve lifli betonların taze beton deney sonuçları.....	31
Çizelge 4.1 : Lif içerikli betonlar için ABBY'ye göre şekil değiştirme bölgeleri.....	42
Çizelge A.1 : Yalın ve lifli betonların silindirik basınç dayanımı değerleri.....	52
Çizelge A.2 : Yalın ve lifli betonların elastisite modülü değerleri.....	53
Çizelge B.1 : Yalın ve lifli betonların kırılma enerjisi değerleri.	54
Çizelge B.2 : Yalın ve lifli betonların eğilme dayanımı değerleri.....	55
Çizelge B.3 : Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen KSD ve TSD' ye göre eşdeğer gerilme, dayanım sınıfı ve kalan eğilme dayanımı değerleri... 56	
Çizelge B.4 : Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen çatlak ağzı açılma deplasmanlarına göre kırılma enerjisi değerleri.....	57
Çizelge B.5: Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen çatlak ağzı açılma deplasmanlarına göre kalan ve net eğilme dayanımı değerleri.....	58
Çizelge C.1 : Yalın ve lifli betonlara ait yarma çekme dayanımı değerleri.	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme şekil değiştirme eğrisi	1
Şekil 2.1 : Liflerin gerilme kuvvetlerini bir köprü gibi aktarması	6
Şekil 2.2 : Lifli betonun tipik gerilme şekil değiştirme diyagramı	6
Şekil 2.3 : Çatlak köprülemesine farklı tel boyutlarının etkisi	15
Şekil 2.4:Farklı narinliğe sahip çelik tellerle donatılmış betonların özgül kırılma enerjisinin, tel içeriği ile değişimi	15
Şekil 2.5 : Çelik tel içeriğinin beton basınç gerilmesi ile düşey şekil değiştirme ilişkisine etkisi.....	18
Şekil 2.6 : Lif içeriğinin eğilme çekme davranışına etkisi.....	19
Şekil 3.1 : Deney numunelerinin üretiminde kullanılan agrega granülometrisi.	26
Şekil 3.2 : Deneysel programın şematik gösterimi.	28
Şekil 3.3 : Numunelerin boyut ve şekilleri.....	30
Şekil 3.4 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni.....	32
Şekil 3.5 : Yük-sehim eğrisinin temsili gösterimi.....	33
Şekil 4.1 : Yalın ve lifli betonların silindirik basınç deney sonuçları.	35
Şekil 4.2 : Yalın ve lifli betonların elastisite modülü değerleri	36
Şekil 4.3 : Yalın ve lifli betonların yük-sehim eğrileri	37
Şekil 4.4 : Yalın ve lifli betonların kırılma enerjisi değerleri.	37
Şekil 4.5 : Yalın ve lifli betonların eğilme dayanımı değerleri.....	38
Şekil 4.6 : Yalın ve lifli betonların çatlak ağzı açılma deplasmanı-yük eğrileri.....	39
Şekil 4.7 : Yalın ve lifli betonların çatlak ağzı açılma deplasmanlarına göre eğilme değerleri grafiği	40
Şekil 4.8 : Yalın ve lifli betonların çatlak ağzı açılma deplasmanlarına göre eğilme değerleri grafiği.	40
Şekil 4.9 : ABBY' ye göre tanımlanan şekil değiştirme bölgeleri.....	42
Şekil 4.10 : Yalın ve lifli betonların KSD ve TSD değerleri-eşdeğer eğilme dayanımı grafiği.	43
Şekil 4.11 : Yalın ve lifli betonların KSD ve TSD değerleri enerji grafiği.	44
Şekil B.1 : Yalın beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.	59
Şekil B.2 : Bazalt lifli beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.	59
Şekil B.3 : Kopolimer lifli beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.	60
Şekil B.4 : Poliolefin lifli beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.....	60
Şekil B.5 : 20 kg/m ³ çelik lif içeren beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.....	61
Şekil B.6 : 35 kg/m ³ çelik lif içeren beton numunelere ait yük-sehim grafikleri	61
Şekil B.7 : Yalın beton numunelere ait yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri	62
Şekil B.8 : Bazalt lifli beton numunelere ait yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri	62

Şekil B.9 : Kopolimer lifli beton numunelere ait yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri	63
Şekil B.10 : Poliolefin lifli beton numunelere ait yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri	63
Şekil B.11 : 20 kg/m ³ çelik lif içeren beton numunelere ait yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri	64
Şekil B.12 : 35 kg/m ³ çelik lif içeren beton numunelere ait yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri	64
Şekil B.13 : Sehim – çatlak ağzı açılma deplasmanı korelasyonu ve grafiği.....	65

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

FARKLI TİPTEKİ LİFLERİN BETONUN MEKANİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

ÖZET

Beton uzun yıllardan beri en sık kullanılan yapı malzemesidir. Betonun yaygın kullanım alanı araştırmacıları beton üzerinde daha çok gelişime sevk etmiştir. 20-30 yıl öncesine kadar uygulamalarda basınç dayanımı 40 MPa düzeyini geçemeyen beton, günümüzde yüksek dayanım ve dayanıklılığı ile karşımıza çıkmaktadır.

Günümüzde pek çok mega yapıda (Yüksek bina, köprü, tünel, vb.) artık yüksek performanslı betonlar kullanılmaya başlanmıştır. Normal betonların, yüksek dayanımlı ve dayanıklı betonların en büyük kusuru gevrek bir mekanik davranış sergilemeleridir. Gevrek davranış, betonun basınç dayanımı ne kadar yüksek olursa olsun betonun enerji yutma kapasitesini hep düşük seviyede tutar. Yüksek performanslı betonların tek zaafı gevreklik değil, yangın durumunda iyi performans sergileyememesidir.

İlerleyen beton teknolojisi betonu mükemmeliğe taşıyan bir çözüm olan lif donatılı betonu geliştirmiştir. Betona katılacak lifler, betonu gevreklik zaafından kurtarıp sünekliliğe taşımakla kalmamış, aynı zamanda basınç dayanımına ve betonun durabilitesine katkı sağlamıştır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda 4 farklı lif ile 5 farklı karışım üretilmiştir. Bütün karışımlar için standart basınç ve elastisite modülü deneyleri için 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde silindir numuneler üretilmiştir. Yarma çekme deneyleri için 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindeki silindir numuneler 2' ye kesilerek 150 mm çapında 150 mm yüksekliğinde numuneler hazırlanmıştır. Kırılma enerjisi ve eğilme dayanımlarını belirlemek için üç noktalı eğilme deneyi uygulanmak üzere 600 mm uzunluğunda 150x150 mm kesite sahip kiriş numuneler üretilmiştir. Üç noktalı eğilme deneyinde kiriş numuneler üzerinde sehim ve çatlak ağzı açılma deplasman değerleri ölçülmüştür. Sehim değerleri "Lvdt", çatlak ağzı açılma deplasmanları ise "Çatlak ağzı açılma deplasmanı ölçer" ile ölçülmüştür.

Farklı oranlarda ve özellikte lif içeren betonların basınç dayanımları, elastisite modülleri, yarma çekme dayanımları, kırılma enerjileri ve eğilme dayanımları hesaplanarak yalın betonlarla kıyaslandı. Ayrıca eğilme deneylerindeki çatlak ağzı açılma deplasmanı ile sehim arasındaki korelasyon kurulup, EN 14651 standardı ile kıyaslanarak deneylerin doğruluğu kontrol edilmiştir.

Deneyler sonucunda elde edilen değerler Alman Beton Birliği Yöntemi' nde belirtilen kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumu değerlerine göre hesaplandı ve karışımların ABBY' ne göre mekanik davranış ve özellikleri değerlendirildi.

Çelik lif kullanılarak üretilen betonların kırılma enerjileri ve eğilme dayanımlarının hacimce aynı oranda kullanılan iki farklı makro sentetik ve bazalt lifli betonlara

kıyasla daha yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. elik lif oranının artması ile betonun tüm mekanik özelliklerinde iyileşme görülmüştür. Makrosentetik liflerin ise numunelerde ayrı ayrı kullanılmasının kırılma enerjisine ve eğilme dayanımına etkisi aynı seviyelerde olmuştur.

Sonuçların Alman Beton Birliği' ne göre değerlendirilmesi sonucunda bazalt lifli ve yalın betonların taşıma gücü sınır durumu için öngörülen sehim değerlerine erişemediği gözlenmiştir. Makrosentetik liflerde kullanılabilirlik sınır durumundaki eş değer eğilme dayanımlarının taşıma gücü sınır durumundaki eş değer eğilme dayanımlarından daha yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. elik lifli betonlarda ise makro sentetik liflerin tersine kullanılabilir sınır durumundaki eş değer eğilme dayanımları, taşıma gc sınır durumundaki eş değer eğilme dayanımlarına göre daha dşk değerler almıştır.

EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF FIBERS TO CONCRETE'S MECHANICAL BEHAVIOUR

SUMMARY

As a building material concrete has been used frequently. Because of this too many research has been made for years. 20-30 years before concrete's maximum compressive strength was about 40 MPa but today high strength and high performance concretes are used in structural applications.

High-performance concrete exceeds the properties and constructability of normal concrete. Normal and special materials are used to make these specially designed concretes that must meet a combination of performance requirements. Special mixing, placing, and curing practices may be needed to produce and handle high-performance concrete. Extensive performance tests are usually required to demonstrate compliance with specific project. High-performance concrete has been primarily used in tunnels, bridges, and tall buildings for its strength, durability, and high modulus of elasticity. It has also been used in shotcrete repair, poles, parking garages, and agricultural applications.

High-performance concrete characteristics are developed for particular applications and environments; some of the properties that may be required include high 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 resistance to frost and deicer scaling damage, toughness and impact resistance, volume stability, ease of placement, compaction without segregation, inhibition of bacterial and mold growth.

Fiber reinforced concrete which has better mechanical properties was found out with the developments in concrete technology. The fibers not only makes concrete ductile but also have positive effect on compressive strength and durability.

Fibers are usually used in concrete to control cracking due to plastic shrinkage and to drying shrinkage. They also reduce the permeability of concrete and thus reduce bleeding of water. Some types of fibers produce greater impact, abrasion, and shatter resistance in concrete. Generally fibers increase the flexural strength of concrete, but cannot replace structural steel reinforcement.

The amount of fibers added to a concrete mix is expressed as a percentage of the total volume of the composite (concrete and fibers), termed "volume fraction" (V_f). V_f typically ranges from 0.1 to 3%. The aspect ratio (l/d) is calculated by dividing fiber length by its diameter. Fibers with a non-circular cross section use an equivalent diameter for the calculation of aspect ratio. If the fiber's modulus of elasticity is higher than the matrix (concrete or mortar binder), they help to carry the load by increasing the tensile strength of the material. Increasing the aspect ratio of the fiber usually segments the flexural strength and toughness of the matrix. However, fibers that are too long tend to "ball" in the mix and create workability problems.

The most common used fibers in high performance concretes are steel, polymeric and glass fibers. The addition of fibers 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. The risk of spalling can be reduced by the addition of fibers to the concrete. Under fire conditions the fibers 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 fibers can improve structural strength, ductility, impact and abrasion resistance, freeze-thaw resistance, durability. There are many types of steel fibers. 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. Also the presence of long fibers significantly reduces the workability of the mixture.

Synthetic fibers can improve; mix cohesion, freeze-thaw resistance, resistance spalling, impact resistance, resistance to plastic shrinkage. At the higher dosage levels the macro synthetic fibers are designed to perform post-first crack relative to externally applied loads. Macrosynthetic fibers 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. It is important to avoid the use of macro synthetic fibers to provide structural capacity which may be lost in the event of fire. When subjected to fire, macro fibers will soften as the temperature rises. They will lose their mechanical properties and will no longer provide structural capacity.

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

The main objective of the research is to find out the mechanical behaviour of concretes containing steel, basalt and two types of macrosynthetic fibers. Concrete mixes have same water / cement ratio and same fiber volume fraction except one of the steel reinforced concrete. There are two different concretes with two different steel fiber volume fraction. One of them is the same fiber volume fraction as the basalt and macrosynthetic fibers, the other mix has includes steel fiber approximately half value as the other fiber volume fraction.

For both the modulus of elastisity and the standard compressive tests cylinders of 150 mm indiameter and 300 mm height were produced for all mixtures. Also cylinder specimens were used for the splitting tensile test. Disc specimens sizes were 150 mm in diameter and 150 mm in height. Beams prepared for the fracture energy tests were 600 mm in length and 150 mm x 150 mm in cross section.

Concretes which include different types of fibers are compared with each other after determining the compressive strength, elasticity modulus, splitting tensile test results, fracture energy and bending strength results.

The fracture energy and bending strength are also compared with the fiber reinforced concrete method of German Concrete Institute. Fracture energy of plain concrete (matrix) increased up to 10 times owing to the addition of steel fibers.

Fracture energy of concrete with macrosynthetic fibers also increased up to 4 times owing to the addition of steel fibers.

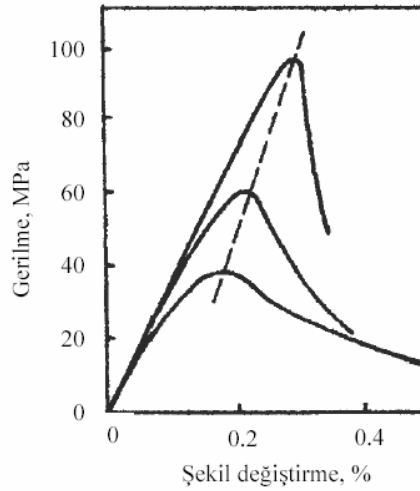
Basalt fiber reinforced concrete's fracture energy doesn't alter according to plain concrete.

The steel fiber reinforced concretes show a behavior of enhanced toughness and ductility when compared to the matrix however the net bending strength was not affected. Compressive strength and elasticity modulus of the specimens were not affected with the addition of fibers.

1. GİRİŞ

Beton kolay işlenebilirliği, düşük maliyeti ve kolay bulunabilmesi ile günümüzün en sık kullanılan yapı malzemesidir. Geleneksel beton; agrega, çimento, ve suyun karıştırılmasıyla üretilir.

Beton, üzerinde yapılan çalışmalarla basınç mukavemeti günden güne artan ve bu özelliğinden fazlasıyla yararlanılan bir malzemedir. Ancak artan basınç dayanımı betonun diğer mekanik kusurlarını kapatmamaktadır. Yüksek dayanımın yanında boşluk oranının minimuma indirilmesiyle basınç dayanımı ve durabilitesi artan betonun çekme dayanımı hep düşük seviyelerde kalmıştır. Bununla beraber artan basınç mukavemetleri betonu daha da gevrek bir malzeme haline getirmiştir.



Sekil 1.1: Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi [1]

Betonda dayanım arttıkça eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta, tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve gevrek bir kırılma meydana gelmektedir [1].

Betonun gelişen basınç mukavemeti ve durabilite özelliklerinin yanında tek zaafı olan çekme mukavemetini arttırmak adına ilk çalışmaları yapan 1850' lerin başında ABD' li Hyatt olmuştur. Hyatt beton ve çeliğin eğilme halinde birlikte kullanılmasını

öne süren ilk kişi olmuştur. Daha sonraları J. Lambot tellerle ve liflerle donatılı betonların patentini alan kişi olmuştur. Lambot' nun çalışmaları sürekli teller ve tel kafes donatıları ile ilgilidir. 1874 yılında liflerle donatılı betonun ilk patentini A. Berard almıştır. Günümüzdeki farklı lifli betonların kullanımları 1960' lı yıllarda başlayan çalışmalar sonucu gelişmiştir.

Lifli kompozitler, özellikle harç ve betonlar konusundaki çalışmalar, başlangıçta Danimarka' da West ile Krenchel, ABD' nde Romualdi, İngiltere' de Yapı Araştırma Kurumu' nda Nurse ve Majumdar' ın öncülüğünde başlamış ve çeşitli ülkelerde bu alandaki araştırmacıların çalışmalarıyla devam etmiştir [2]. Bu alışmalar sonucunda beton matris olarak kabul görüp, günümüzde sıkça kullanılan elik, naylon, polipropilen gibi liflerle donatılmış kompozit malzemeler ortaya ıkmiştır.

Bu tez kapsamında farklı oranlarda elik lif ve farklı tipteki sentetik lifler kullanılarak elde edilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Su / imento oranları aynı tutularak hazırlanan karışımlarda farklı oranlarda elik lif ve aynı oranlarda naylon, bazalt, kopolimer (polipropilen ve polietilen) ve poliolefin kökenli lifler kullanılarak lifli betonlar üretilmiştir. Üretilen lifli betonların silindir basınç, yarma çekme, ve üç noktalı kırılma enerjisi gibi sertleşmiş beton deneylerinin yanı sıra taze beton deneyleri de yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Çimento Esaslı Kompozitler

2.1.1 Normal Betonlar

Normal betonlar, basınç dayanımları 20 MPa ila 60 MPa, kırılma enerjileri 100 J/m² ila 120 J/m² civarında olan, agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesi kullanılarak üretilen ekonomik malzemelerdir [3]. Normal betonların kırılma enerjileri, ultra yüksek dayanımlı betonların %0,3'ü, basınç dayanımları ise % 8'i civarındadır. Bu sebeple çok özel yapılarda normal betonların yerini ultra yüksek dayanımlı betonlara bırakmaktadır. Normal betonlar bina, yol, sanat yapıları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İlerleyen beton teknolojisine rağmen normal betonlar günümüzde en çok kullanılan beton türüdür [3].

2.1.2 Yüksek Performanslı Betonlar

ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programı, Yüksek Performanslı Betonu aşağıdaki gibi tanımlamaktadır [4] :

- Çok erken dayanımlı beton: 4 saatlik basınç dayanımı > 17,5 MPa,
- Çok yüksek erken dayanımlı beton: 24 saatlik basınç dayanımı >35 MPa,
- Çok yüksek dayanımlı beton: 28 günlük basınç dayanımı >70 MPa,
- Durabilite çarpanı >%80 (donma – çözülmenin 300 tekrarından sonra),
- Su/bağlayıcı oranı < 0,35

Yüksek dayanımlı betonlarda dayanım, çimento hamurunun boşluk yapısına, agreganın özelliklerine, agrega-çimento hamuru ara yüzeyi geçiş bölgesine bağlıdır. Çimento hamuru ve ara yüzey geçiş bölgesinin özellikleri, su/çimento oranı düşürülerek ve maksimum agrega çapı küçültülerek iyileştirilebilir [5]. Geçmişte 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15 ila 25 MPa arasında iken 1970'li yıllarda yüksek katlı yapılarda kolon yüklerinin temele taşınabilmesi için 40 ila 50 MPa beton basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Zaman içerisinde

dayanımları artan bu betonlara yüksek performanslı beton adı verilmiş ve yol, köprü, liman yapısı vb. uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır [6].

Çimento ile üretilen kompozitlerin yüksek mekanik özelliklere erişebilmesi konusunda son yıllarda birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 1930'lu yıllarda Eugene Freyssinet taze betona priz sırasında uygulanacak basınç kuvvetinin, betonun basınç dayanımını artırmada olumlu etkisi olduğunu söylemiştir. 1960'lı yıllarda ise yüksek sıcaklık ile artan basınç kürü uygulanarak beton basınç dayanımı 650 MPa' a ulaşmıştır [7]. Bu malzemeler, ilk kez 1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues' in laboratuvarlarındaki araştırmacılar tarafından geliştirildi. RPB' ler küp basınç dayanımları 200 ve 800 MPa arasında, çekme dayanımları 25 ve 150 MPa arasında ve kırılma enerjileri yaklaşık 30000 J/m² ve birim ağırlıkları 2500-3000 kg/m³ aralığında değişen yeni kuşak betonlardır [8]. RPB aşağıdaki dört ana prensibin uygulanması sayesinde elde edilir. Bunlar;

- Bütün iri agregaların karışımdan çıkarılması ile malzeme homojenliğinin artırılması
- Tane çapı düzenlemesi ve iyi bir sıkıştırma ile boşluksuz bir beton elde edilmesi,
- Sıcaklık kürü ile mikro yapının geliştirilmesi,
- Karışıma çelik lif ilavesiyle malzeme sünekliğinin artırılması.

Normal dayanımlı, yüksek dayanımlı ve reaktif pudra betonunun mekanik özellikleri Tablo2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1:Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonlarının(RPC) mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [9].

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPC
Basınç Dayanımı (MPa)	20-60	60-115	200-800
Eğilme Dayanımı (MPa)	4-8	6-10	50-140
Kırılma Enerjisi (J/m ²)	100-120	100-130	10000-40000
Elastisite Modülü (GPa)	20-30	35-40	60-75

2.2 Lifler Hakkında Genel Bilgi

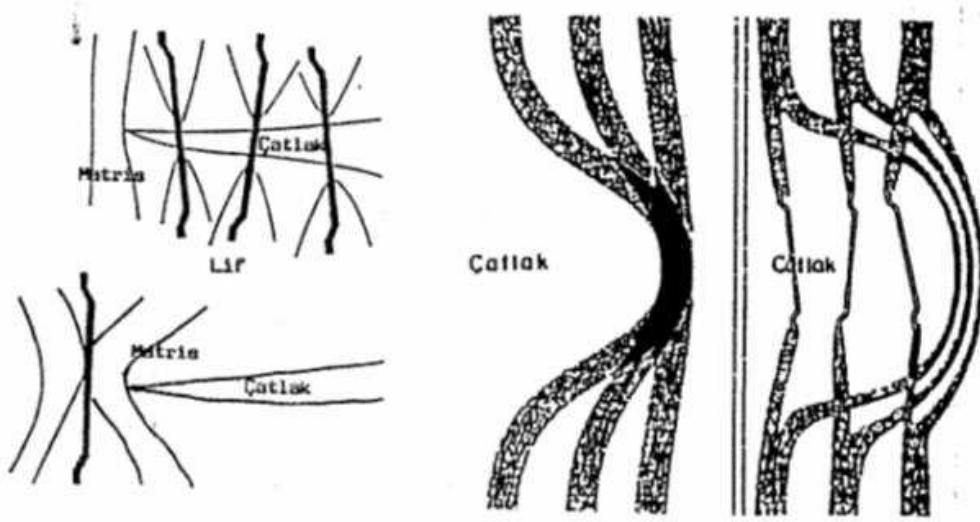
Lif, bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan, doğal yollarla bulunan veya insan eliyle üretilen, dayanımları ve elastisite modülleri aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre çok yüksek olan malzemeleri tanımlar [10].

Liflerin büyük formasyondaki hallerine göre elastisite modülleri ve dayanımları çok yüksek olması lifleri malzemenin en gelişmiş hali kılar. Günümüzde kullanılan liflerin yanı sıra insanoğlu lifleri çok eski zamanlardan beri kullanmaktadır. Eski zamanlarda yapılarda kullanılan kerpiç ve alçı gibi malzemelerde lif formatında keten, kenevir, at kuyruğu, keçi kılı gibi doğal lifler kullanılmıştır.

İnsan eliyle üretilen lifler ilk defa 19. Yüzyılın sonunda ortaya çıkmasına rağmen, bu liflerin geçmişi 60 yıldan fazla değildir. Ancak bu kadar kısa zamanda insan eliyle yapılmış (sentetik) lifler vazgeçilmez hale gelmiştir [11].

Beton agreganın çimento hamuru ile bağlanmasından meydana gelen heterojen bir malzemedir. Bu nedenle betonun kırılma süreci süreksizliklerle doludur. Betonun kırılması da çimento agrega yüzeyindeki süreksizliklerden meydana gelmektedir. Çimento agrega yüzeyindeki oluşan gerilmelerden ötürü oluşabilecek çatlaklar betona katılacak liflerin bu mikro çatlakların büyümesini engellemektedir. Bu sayede lif etkisi betonda başta süneklik olmak üzere diğer mekanik özellikleri geliştirir ve ani göçmelerin önüne geçer.

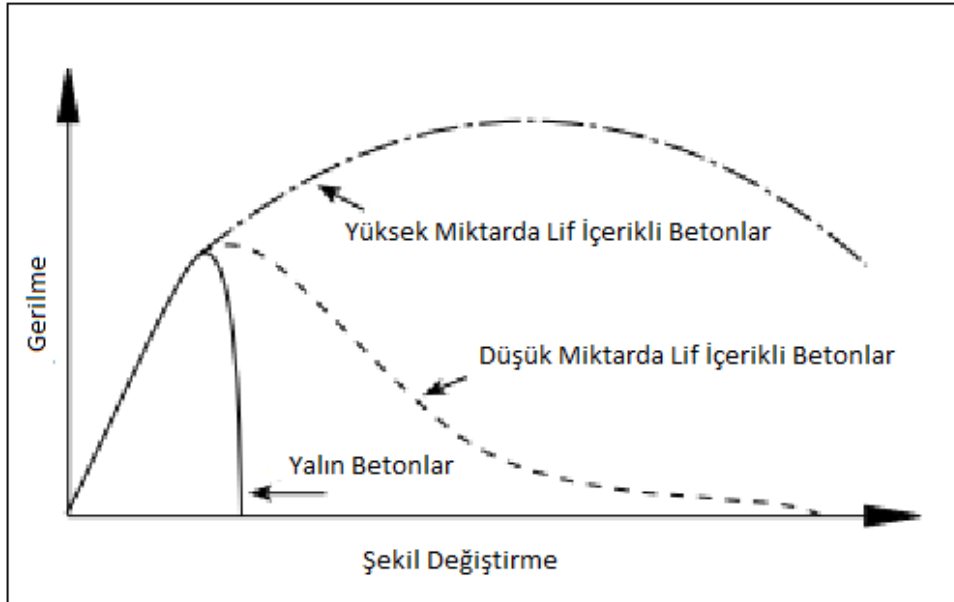
Lif donatılı betonlarda kullanılan lifler, yüksek çekme mukavemetleri sayesinde, betondaki çatlakların başlangıcını, yayılmasını ve birleşmesini önlerler [12]. Amacına uygun yeterli miktarlarda kullanılan lifler betonda oluşabilecek çatlaklardaki gerilmeleri betonda çatlak oluşmamış kısımlara iletirler. Lifler çatlak sonlarına bitişik olduklarından, matristeki gerilmelerin üzerlerinden geçmesini ve böylece, daha önce çatlamamış beton kesitlerinin de dayanımından yararlanılmasını sağlamaktadırlar [13]. Bu durum Şekil 2.1’ de görülmektedir. Çatlakların oluştuğu bölgede bu şekilde taşıma gücü artırılarak, mühendislik özellikleri gelişmiş bir malzeme elde edilmektedir. Şekil 2.2’ de lif etkisinin betonlarda gerilme şekil değiştirme bağıntısı üzerindeki etkisi görülmektedir.



Sekil 2.1: Liflerin gerilme kuvvetlerini bir köprü gibi aktarması [14].

Liflerin betona verdiği katkılar kısaca şu şekilde sıralanabilir;

- Taze betonda çatlakların oluşmasını engeller,
- Çekme ve eğilme dayanımlarını artırır,
- Çarpma dayanımını ve tokluğu artırır,
- Gevrek kırılmayı engeller,
- Durabiliteyi artırır [15].



Şekil 2.2: Lifli betonun tipik gerilme şekil değiştirme diyagramı

2.2.1 Lif Çeşitleri

Kullanım alanları ve farklı mekanik özellikleri bakımından birçok lif türü bulunmaktadır. Bu lifler genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilirler [16]

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

Değişik türden liflere ait bazı özellikler Tablo2.2 de gösterilmektedir;

Çizelge 2.2: Farklı türdeki liflere ait fiziksel özellikler [17]

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (10^3 , MPa)	Maksimum Uzama (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,1
Asbestler	552-966	83-138	0,6	3,2
Pamuk	414-690	4,8	3-10	1,5
Cam	1035-3795	69	1,5-3,5	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8,3	11-13	1,4
Polietilen	690	0,14-0,4	10	0,95
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,9
Pamuk-Yün	414-621	6,9	10-25	1,5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,6	2,7
Çelik	276-2760	200	0,5-3,5	7,8

2.2.1.1. Doğal Lifler

Bu liflerin en önemli özellikleri kolayca elde edilebilmeleridir. Ancak bu liflerin alkali ortamda parçalanma eğiliminde olmaları bir sorundur. Bu sorunu çözmek adına betonun alkalitesini azaltacak katkıları kullanılmalıdır. Bilinen en eski doğal lifler saman ve at yeleşi olup Portland çimentosuyla kullanılan diğer doğal lifler ise bambu, hindistan cevizi, şeker kamışı ve ahşap gibi liflerden oluşmaktadır [10]. Bazalt, son dönemde lifler ve iplerden oluşan kumaşlar üretmek için kullanılan malzemeler arasındadır. Bazalt kayacın yüksek sıcaklıkta ergitilmesi ile elde edilen bazalt lifler çevre kirliliği oluşturmayan, korozyona dayanıklı, yalıtkan ve elastik yapıda bir üründür. Bazalt liflerin, betonun özelliklerinin iyileştirilmesine etkilerinin değerlendirildiği ilk çalışmalardan birisi Sim ve diğ. (2005) tarafından yapılmıştır. Bazalt kumaş ise inşaat sektöründe benzer ürünler olan karbon ve sentetik lifli kumaşların alternatifi olarak karşımıza çıkmakta, ayrıca yüksek mekanik özellikleri, kimyasal dayanımları, ses ve ısı izolasyon özellikleri ile başta otomotiv sektörü olmak üzere havacılık, savunma sanayi, gemicilik vb. birçok sektörde kullanılmaktadır [18].

Bazalt lifler ve epoksi reçine kullanılarak betonarme yapılarda kullanılan çelik formunda üretilen bazalt lifli donatı da Amerika, Rusya ve Ukrayna gibi ülkeler başta olmak üzere bir çok ülkede, bazı yapı elemanlarında donatı çeliğine alternatif olarak kullanılan ürünlerdendir. Lifli donatı, özellikle korozyon riski bulunan yapı elemanlarında donatı çeliği için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Donatı çeliğinden daha yüksek dayanıma sahip olan bazalt lifli donatı, çelik donatıya oranla yaklaşık üç kat daha hafiftir. Aynı zamanda termal genleşme katsayısı da betonun genleşme katsayısına oldukça yakındır. Alkali reaksiyonlara karşı yüksek direnci de dikkate alındığında, bir çok alanda donatı çeliğine alternatif olma potansiyeli bulunmaktadır [19],[20].

2.2.1.2. Metalik Lifler

Metallar yüksek plastik şekil değiştirme yeteneklerinden dolayı günümüzde sanayi ve inşaat sektöründe çokça kullanılırlar. Metallerin lif formasyonu da uzun yıllardır kullanılırlar. Tablo 2.3' te bazı metalik liflerin fiziksel özellikleri verilmiştir:

Çizelge 2.3:Bazı metalik liflerin tipik özellikleri [11].

Metal	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Al	2,7	660	70	300
Be	1,8	1350	310	1100
Cu	8,9	1083	125	450
Mo	10,2	2625	330	2200
W	19,3	3410	350	2890 (< 250 µm) 3150 (< 125 µm) 3850 (< 25 µm)
0,9 % Karbon Çeliği (0,1 mm çapında)	7,9	1300	210	4000
Paslanmaz çelik (0,05 mm çapında)	7,8	1535	198	2400

Metalik liflerden en çok kullanılanları paslanmaz çelik liflerdir. Liflerin paslanmaz çelikten yapılıyor olması hem metallerin korozyona uğrama kusurunu ortadan kaldırıyor hem de çeliğin yüksek elastisite modülü ve dayanımı çelik lifi diğer tüm liflerden daha üstün bir hale getiriyor.

Beton takviyesinde kullanılabilecek çelik lifleri sınıflandıran ve özelliklerini belirten Amerikan Standardı ASTM A 820-96' da [21] çelik lifler 4 değişik şekilde sınıflandırılmıştır. Bunlar :

- Tip 1: Soğuk çekilmiş çelik lifler,
- Tip 2: Plakadan kesilmiş çelik lifler,
- Tip 3: Haddelenip çekilmiş çelik lifler,
- Tip 4: Diğer lifler

Bu lifler sadece oluşma biçimine göre sınıflandırılmıştır. Türk standardı TS 10513/92 [22] ise lifleri tiplerine göre de şu şekilde ayırır:

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

B sınıfı lifler, uzunluğu boyunca deforme olma sekline göre;

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

C sınıfı lifler sonlarındaki kancalara göre;

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

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

- i. Liflerin çekme-kopma dayanım ortalaması en az 345 N/mm² olmalıdır. Her bir lif için çekme-kopma dayanım 310 N/mm² ‘den az olmamalıdır.
- ii. 16±1 °C’lik ortamda, 3.18 mm’lik bir iç çap çevresinde yapılan lif eğilme deneyine tabi tutulan liflerin %90’ının kırılmaksızın 90° eğilme yapabilmesi gerekmektedir.

2.2.1.3 Sentetik Lifler

Sentetik lifler petrokimya ve tekstil endüstrisindeki gelişmeler ve araştırmalar sonucunda ortaya çıkan insan yapımı liflerdir. Sentetik liflerin betondaki alkali ortama karşı durabilitesi yüksektir. Akrilik, aramid, naylon, polyester, polietilen ve polipropilen başlıca polimer esaslı sentetik liflerdir. Sentetik liflerin çekme dayanımlarının çok yüksek olmasına karşın aramid dışındakilerin elastisite modülleri düşük değerlerdedir. Sentetik lifin kalitesi, narinliklerine bağlıdır ve çapları mikron düzeydedir. Sentetik lifler çoğunlukla iki farklı oranda betona katılır. Bunlarda biri düşük oran (Hacimce %0,1 ile %0,3) bir diğeri ise yüksek oran (Hacimce %0,4 ile %0,8) olarak karşımıza çıkar. En çok kullanılan karışım oranı ise hacimce %0,1 ‘lik karışımlardır. Bu seviyede betonun gerilme değerleri sabit kalıp kontrollü kırılmalar gerçekleşmiştir [23].

2.2.1.3.1 Akrilik Lifler

Akrilik lifler lif katkılı betonlarda asbestlerin yerine gelmişlerdir. Bu sürecin ilk başında lifler seyreltik su ve çimento karışımı ile kompoziti meydana getirdiler. Kompozitin şekli ve kalınlığı basınç altında vakumlama işlemi yapılarak meydana

getirilmiştir. Akrilik lifler düşük hacimlerde betona eklenerek plastik rötre etkisini betonda en aza indirmişlerdir.

2.2.1.3.2 Aramid Lifler

Aramid lifler birim kütlede cam liflerden iki buçuk, çelik liflerden beş kat daha kuvvetli liflerdir. Yüksek maliyeti aramid lifli betonları sadece çok yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanmaya itmektedir.

2.2.1.3.3 Naylon Lifler

Naylon, doğrusal poliamid tipi plastiklere verilen genel bir addır. Hammaddesi petrol olan naylon ilk kimyasal elyaf elde etme çalışmaları ve araştırmaları sırasında naylon elyafının polyester karşısında sağlamlık açısından daha ileride olması ve bu elyafın polyester ve diğer kimyasal elyafların üretim çalışmaları içinde ön plana çıkmasını sağlamıştır. Günümüzde betonda lif olarak kullanılan naylon 6 ve naylon 6.6 olmak üzere iki farklı lif tipi vardır [24]. Genel olarak bütün poliamid elyaflarına naylon denilmesinin yanında, aslında naylon terimi poliamid 6.6 için öngörülmüştür.

Naylon 6 ve naylon 6.6 küçük fiziksel farklılıklar dışında hemen hemen aynı özellikleri taşırlar ve birbirlerinin yerlerine kullanılabilirler. Naylon lifler yüzeyi pürüzsüzdür ve genelde silindirik bir yapıya sahiptirler. Naylon 6 ve naylon 6.6' nın en önemli fiziksel farklılığı ergime sıcaklıklarıdır. Naylon 6' nın erime noktası $210^{\circ}C$ iken naylon 6.6 $250^{\circ}C$ ' de erime sıcaklığına ulaşır. Bunun haricinde her iki tip naylon lifi için ortak fiziksel ve kimyasal özellikleri şu şekilde sıralıyabiliriz.

- Çekme dayanımı yüksektir.
- Asitler hariç kimyasal dirence sahiptirler.
- Özgül ağırlıkları $1,15 g / cm^3$ ' tür.
- Alkali dayanımına sahiptirler.
- Su emme kapasiteleri yüksektir [25].

2.2.1.3.4. Polyester Lifler

Polyester lifler termoplastik polyester grubuna dahil olup ince teller şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Polyester lifler sıcaklığa karşı dayanıksızlardır. Ayrıca sıcaklık bu liflerin özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Polyester liflerin hacimce %0,1 kullanılması durumunda plastik rötreyi engellediği gözlenmiştir [23].

2.2.1.3.5. Polipropilen Lifler

Polipropilen lifler ilk olarak 1960' larda betonda kullanılmıştır. Polipropilen, sentetik hidrokarbon polimerdir. Polipropilenlerin hidrofobik oluşu çimento matrisi ile zayıf bağ meydana getirmesine neden olmaktadır. Ayrıca bu yapısından ötürü düşük ergime sıcaklığı, kolay tutuşabilen ve diğer sentetik liflere göre daha düşük elastisite modülüne sahiptir. Polipropilen liflerin düşük çekme gerilmesi ve düşük elastisite modülü onları plastik şekil değiştirmeye sürükler.

2.2.1.3.6 Poliolefin Lifler

Poliolefin polipropilen ve polietilen gibi polimer bir malzemedir. 1990' lı yıllardan sonra kullanılmaya başlayan poliolefin Amerika' da 1996' dan bu yana kullanımı %6' dan %20' ye çıkmıştır. Hızla gelişen bu malzeme günümüzde plastik koruma malzemesi ve de çeşitli tekstil ürünlerinde kullanımı yaygınlaşmaktadır [26].

Poliolefin lifler beton teknolojisinde ilk olarak köprü ve otoyol bariyer taşlarında (Jersey taşı) betonun çarpma direncini arttırmak için kullanılmıştır [27]. Poliolefin lifler çarpma betonda yorulma direncini, sünekliği ve buna bağlı tokluğu da arttırdığı görülmüştür [28].

Tablo 2.4' te farklı sentetik liflere ait fiziksel ve mekanik özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Sentetik liflerin özellikleri [29]

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

2.2.1.4 Cam lifler

Cam lifler sertlik derecesi yüksek ve aşınmaya karşı dirençlidirler. Ayrıca çok reaktif ürünler de değildir. Bu avantajlarının yanında esnek, hafif ve düşük maliyetli lifler olarak da karşımıza çıkar. Cam lifler kendi içlerinde sınıflara ayrılırlar. Bütün cam lifler elastisite modüllerinin benzer olmalarına karşın, farklı dayanım değerlerine sahiptirler ve çevresel etkilere karşı dirençleri de farklıdır. E tipi lifler düşük çekme dayanımına sahip ve kimyasal direnci düşük olan liflerdir. S tipi lifler daha yüksek dayanıma ve daha yüksek maliyete sahiptirler. Diğer C tipi lifler korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Tablo 2.5’ te bazı cam lifi tiplerinin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.5 : Bazı cam liflerine ait fiziksel ve mekanik özellikler [11]

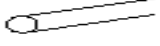
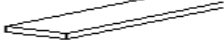
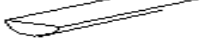
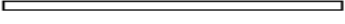
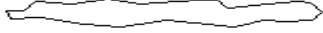
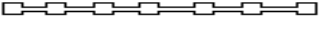
Cam Lifi Tipi	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E	2,54	1,7-3,5	69-72
S	2,48	2,0-4,5	85
C	2,48	1,7-2,8	70
CEM-FİL	2,7	-	80

2.3 Lif Özelliklerinin Kompozitin Özelliklerine Etkisi

2.3.1. Lif Geometrisinin Etkisi

Lif Geometrisinin lif ile matris arasındaki bağın dayanımıyla doğrudan ilişkisi vardır. Soroushian ve Bayasi [30] tarafından yapılan araştırmada, lif tipinin lif donatılı betonların performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Narinlikleri aynı farklı geometrilere sahip liflerle yapılan deneyler sonucunda lifli betonların betonun işlenebilirliğini genel olarak düşürdüğü, ancak dalgalı liflerin düz ve kancalı liflere oranla çökme değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca değişken narinlik ve lif oranlarında dahi kancalı liflerin düz ve dalgalı liflere göre kompozitin basınç gerilmeleri altında enerji yutma kapasitelerinin daha yüksek olduğu da gözlenmiştir. Tablo 2.6’ da farklı çelik lif tiplerinin örnekleri verilmiştir

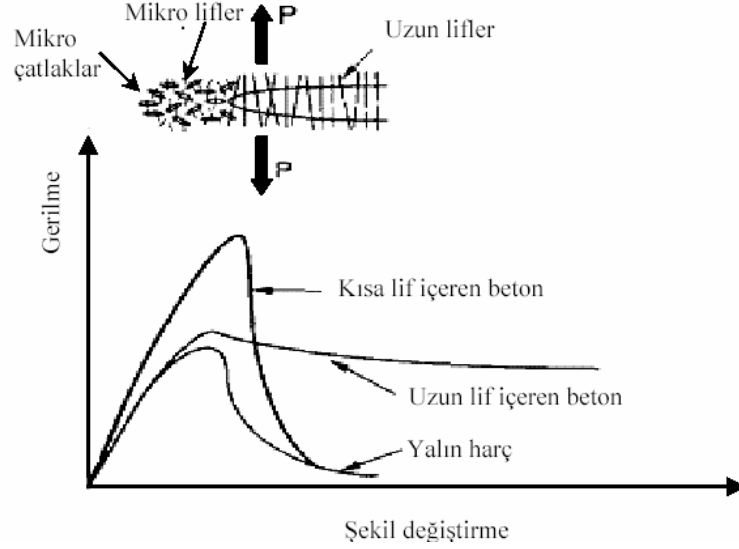
Çizelge 2.6: Farklı çelik lif tipi örnekleri [31].

En Kesit	Yuvarlak	
	Yassı	
	Yarı Yuvarlak	
Biçim ve Deformasyonlar	Düz	
	Dalgalı	
	Kancalı Uçlu	
	Genişletilmiş Uçlu	
	Çarpık	
	Yassı Uçlu	
	Deforme Edilmiş	
	Zikzak Biçimli	

2.3.2. Lif Boyunun Etkisi

Lifli betonun özelliklerine etki eden en önemli parametrelerden bir tanesi de lif boyudur. Çimento esaslı kompozitlerde kısa lif içeren kompozitler daha yüksek gerilme değerlerine ulaşmış ancak şekil değiştirmede çok ileri gidememişlerdir. Uzun lif içeren kompozitler ise daha düşük gerilme değerlerinde kalıp daha büyük şekil değiştirmeler yaparak betonun tokluğunu daha da arttırmışlardır. Bunun sebebi ise betondaki çatlakların mikro ölçekte başlamasıdır. Uzun lifler mikro ölçekteki çatlaklara erişemezler ve mikro çatlakları engelleyemezler. Ancak beton kırılmaya ulaştığı anda uzun lifler çatlaklar arası köprüler oluşturup betonun göçmesine izin vermez ve betona ekstra süneklik kazandırır. Kısa lifler ise betonda ilk oluşan mikro çatlaklara müdahalede boyut olarak daha elverişli olduklarından ilk çatlak oluşana kadar daha büyük gerilmeler gerekecektir. Bu da kısa lifli betonlarda neden gerilmenin daha yüksek olduğunu açıklar. Ancak betonda ilk çatlak oluşuktan sonra liflerin kısa olması çatlaklar arası köprülerde lif boyunun yetersiz kaldığını gösterir ki bu da zaten kısa lifli betonların neden daha gevrek bir davranış sergilediğini açıklar [32].

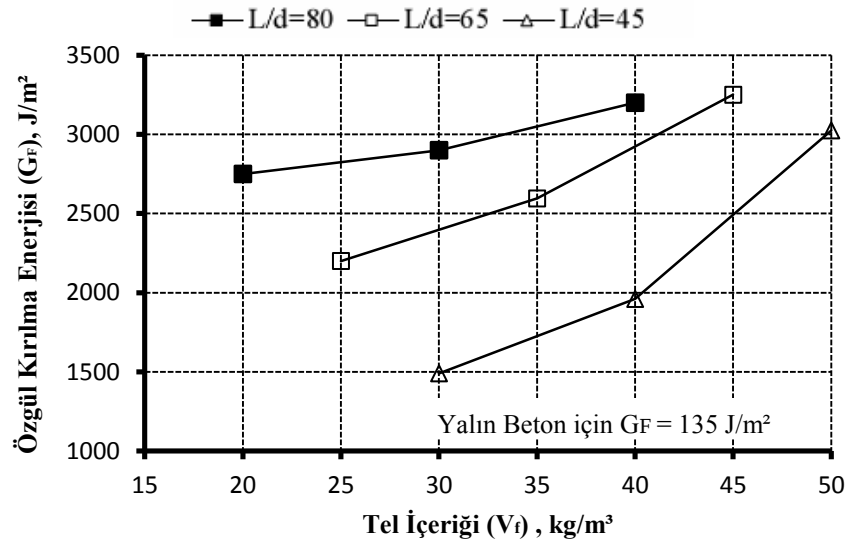
Şekil 2.3'te çatlak köprülemesine farklı tel boylarının etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Çatlak köprülenmesine farklı tel boyutlarının etkisi [32]

2.3.3 Lif Narinliği ve Lif Yüzdesi Etkileri

Lifli betonların performansının kullanılan lifle ilgili en önemli göstergesi lif narinliğidir. Bu değer, lifin boyunun (L), çapına (d) oranı olup genellikle 30-100 arasında değerler almaktadır. Her ne kadar narinliğin artması, lifli betonun performansını arttırsa da betonun işlenebilirliği açısından bu değer 100 gibi bir değerle sınırlı kullanılması önerilmektedir [30]. Kırılma enerjisi ile narinlik değişimi Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4: Farklı narinliğe (L/d) sahip çelik tellerle donatılmış betonların özgül kırılma enerjisinin (G_F), tel içeriği (V_f) ile değişimi [1].

Bayramov [31] tarafından, farklı narinlik oranlarına sahip çelik lifler, farklı oranlarda kullanılmış ve çelik lif donatılı betonların mekanik davranışına yönelik bazı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre:

- Basınç dayanımına çelik telin etkisi belirgin değildir. Narinliği 65 olan tellerle üretilen betonlarda çelik tel içeriğinin etkisi belirgin olup, tel miktarı 20 kg/m^3 'den 50 kg/m^3 ' e artırıldığında, %30'luk bir basınç dayanım artışı sağlanmıştır.
- Çelik lifli betonların yarmada çekme dayanımı, normal betonunkinden fazla olup, çelik lif miktarının artmasıyla artmaktadır. Bu artış yine narinliği 65 olan liflerde daha belirgindir. Bu liflerin matrsten sıyrıldığı ancak kırılmadığı, ancak narinliği 80 olan liflerin koparak ikiye ayrıldığı gözlemlenmiştir.
- Çelik lif miktarının artması özgül kırılma enerjisini önemli ölçüde artırmaktadır. Tel narinliğinin etkisi, çelik lif miktarının artmasıyla etkili olmakta ve bu durumda narinlikteki artış, kırılma enerjisini de artırmaktadır. 80 narinlikli ve 50 kg/m^3 lif içerikli kirişlerde, 5 mm'ye kadar ölçülen özgül kırılma enerjisi, yalın betonunkinin 50 katıdır.
- Karakteristik boy ve net eğilme dayanımı da lif miktarındaki artışla artmaktadır. 80 narinlikli ve 50 kg/m^3 lif içerikli kirişlerde, normal betonun iki katı eğilme dayanımı elde edilebilmiştir.

Lifler teorik olarak betona ne kadar katılırlarsa betonun mekanik davranışlarını o kadar iyileştirebilirler. Ancak pratikte durum sanıldığından daha farklı olmaktadır. Lif yüzdesinin artması betonun işlenebilirliğinde ve kalıba yerleştirilmesinde topaklanmadan dolayı büyük sıkıntılar doğurur. Bu topaklanmalar betonun içerisinde zayıf bölgeler oluşturur. Uygulamalarda bu yerleştirme probleminden dolayı betona hacimce %3' ten fazla oranda lif katılmamasına özen gösterilir. Bu oran çoğunlukla %1 ile %2 arasında değişmektedir. Zollo [33] lifli betonların lif miktarına göre sınıflandırılmasını şu şekilde yapmıştır:

- %0,1-%1: Düşük Lif Yüzdeli
- %1- %3 : Normal Lif Yüzdeli
- %3-%12 : Yüksek Lif Yüzdeli

2.4. Lif Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

2.4.1 Çelik Lif Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

Çelik lif takviyeli betonların enerji yutma kapasiteleri, darbe ve yorulmaya karşı dirençleri yüksektir. Çelik lif takviyesi kompozit mekaniğinin tamamı ile farklı hale gelmesini sağlar.

Çelik lif takviyeli betonlarda ilk çatlak oluşumundan sonra çatlak bölgesindeki gerilmeler lifler aracılığıyla taşınır. Bu gerilmelerin bir kısmını lifin kendisi taşır, bir kısmını ise köprü görevi görerek matrisin sağlam bölgelerine aktarır. Lifli betonda ilk çatlağın oluşması ve çatlağın büyümesi için gereken enerji lifsiz betona göre çok yüksek değerlerdedir.

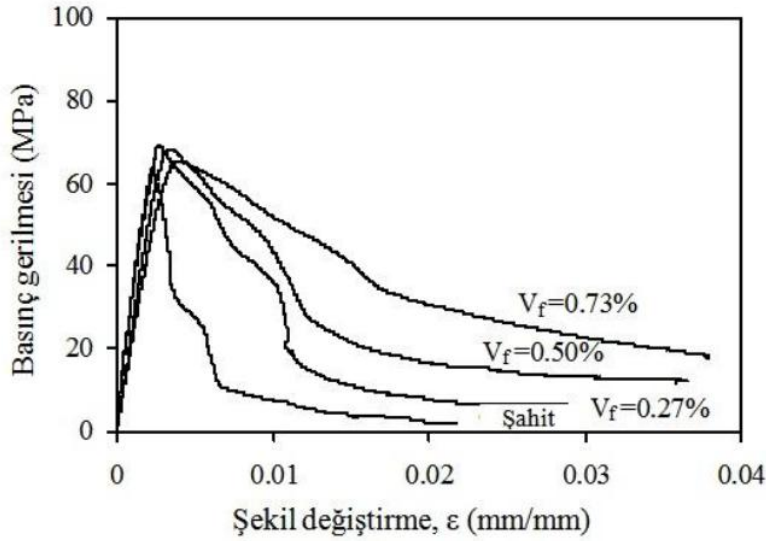
Çelik lifli betonun mekanik özellikleri, lifin boyu, şekli, beton içerisindeki yüzdesi, narinlik oranı, çimento cinsi ve miktarı, numunelerin boyutu, şekli, hazırlanma metodları, su/çimento oranı, kullanılan agreganın cinsi ve tane dayanımı ile doğrudan ilişkilidir [2]. Betonlarda lif kullanımı ile gelişen mekanik özelliklerin artışı Tablo2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7: Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri [24]

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

Çelik liflerin betonun basınç dayanımına etkisi çok fazla değildir. Çelik lifler tarafından betonun basınç dayanımı artışı %25 ‘i nadiren geçmektedir [34].

Aynı beton karışım oranları ve farklı oranlardaki çelik liflerle yapılmış basınç gerilmesi deneylerinde basınç mukavemetlerinin çok az değiştiği ancak lif oranının artmasıyla kırılma sonrası enerji tutma kapasitelerinin arttığı şekil 2.5'te gösterilmiştir.

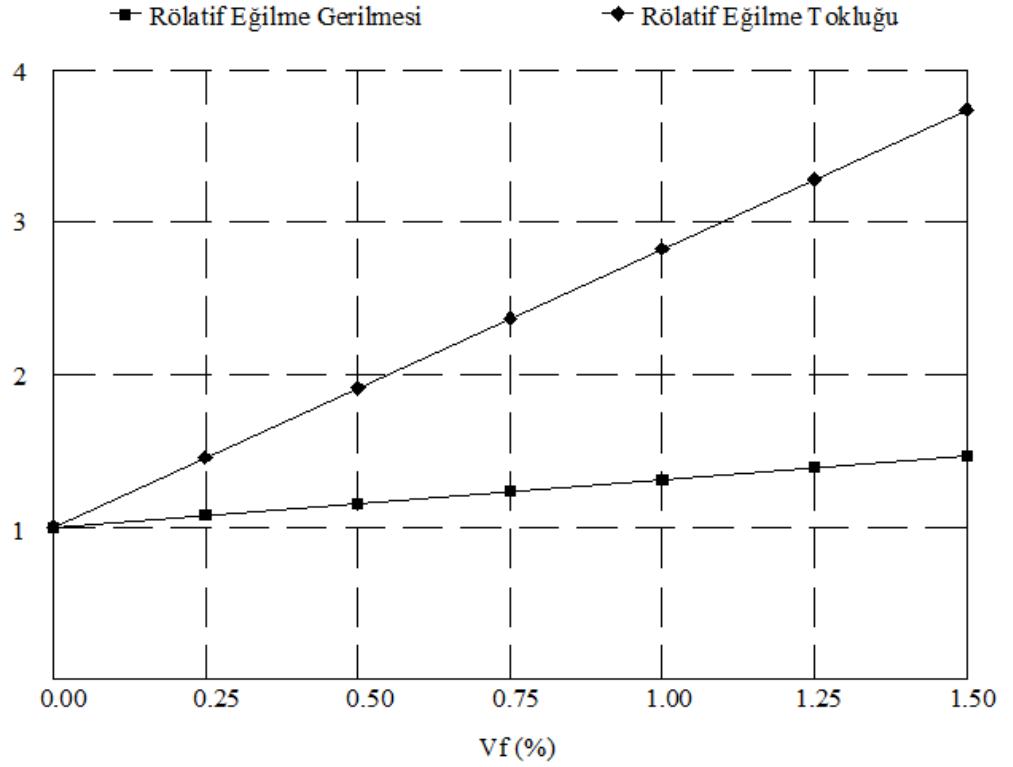


Şekil 2.5: Çelik tel içeriğinin beton basınç gerilmesi ile düşey şekil değiştirme ilişkisine etkisi [35]

Yalın betonların en büyük zaafı olan çekmeye karşı gösterdikleri düşük performanstır. Bu nedenle lif takviyesi asıl olarak betonun yüksek şekil değiştirmesini ve çekme dayanımını arttırmaktadır.

Kompozitler çoğu durumlarda eğilme yüküne maruz kalırlar. Liflerle donatılmış betonlarda tüm durumlarda eğilme dayanımındaki artış, basınç ve yarmada çekme dayanımından daha yüksek olur. Eğilme dayanımını etkileyen en büyük parametreler ise lifin tipi, boyu, geometrisi, hacimce yüzdesi, matrisin yapısı ve numune boyutlarıdır [34].

Lif oranındaki artış eğilme çekme, yarma çekme gerilmelerini arttırırken en çok tokluk değerinde fark oluşturur. Şekil 2.6'da artan lif hacminin çekme gerilmesi ve tokluk üzerinde rölatif değişimini göstermektedir.



Şekil 2.6: Lif içeriğinin eğilme çekme davranışına etkisi [36]

2.4.2 Polimer Lif Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

Polimer liflerde betonla kullanılan ve en iyi sonuç veren lifler polipropilen liflerdir. Polipropilen lif katkılı betonlarda yarmada çekme dayanımı artarken, basınç dayanımı ve elastisite modülleri pek değişmezler. Sentetik lifler çoğunlukla yüksek performanslı betonlarda taze beton özelliklerini iyileştirmek için kullanılırlar.

Yüksek performanslı betonlarda su oranı akışkanlaştırıcı kimyasallarla minimuma çekilir. Ayrıca betondaki boşluk oranını minimuma indirmek adına daha ince malzemeler kullanılır. Bu ince malzemelere örnek olarak silis dumanı verilebilir. Silis dumanı çok ince taneli malzelerdir. Bu ince taneli yapısı betondaki karma suyunu tutar ve terlemeye izin vermez. Karma suyunun çoğunu tutması betonda plastik rötre şekil değiştirmesine sebep olacaktır. Betona sentetik lif katılması oluşacak rötre çatlaklarını engelleyerek betona çok önemli bir katkı yapmış olur. Polipropilen ve polyester lifler en çok kullanılan polimer lifler arasındadır. Bunun haricinde son yıllarda kullanımı yaygınlaşan poliolefin kökenli polimer liflerde vardır. Poliolefin yüksek elastisite modülü, alkali direnci ve betonda mekanik davranışı iyileştirmesi ile diğer diğer polimer liflerle rekabet içine girmiştir.

2.4.3 Naylon Lifi Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

Naylon lif donatılı betonlar Amerikan Ordu Mühendisleri tarafından 1960' lı yıllarda patlatma etkilerine dayanıklı askeri yapıların inşasında kullanılması amacıyla yapılan çalışmalar sonucu geliştirilmiş lif donatılı beton türüdür [37].

Sridhara, Kumar ve Sinare (1971) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, hacimce %0,5 oranında naylon lif içeren betonların, düşen ağırlıklı çarpma deneyleri ile incelenen çarpma dayanımlarının, yalın betonlara göre yaklaşık 5 kat daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Lif hacim oranının %1 olduğu naylon lif donatılı betonlarda ise çarpma dayanımı değerlerinin, yalın betonlarınkinden yaklaşık 17 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [38].

Naylon lif donatılı betonların basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımları ile ilgili olarak yürütülen deneysel çalışmalarda, naylon liflerin betonun basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı üzerinde kayda değer bir artış meydana getirmediği gözlemlenmiştir [37].

Naylon lif donatılı betonların eğilmede çekme dayanımlarıyla ilgili olarak da kimi araştırmacılar artan değerler gözlemlemişken, kimileri de kayda değer herhangi bir artış gözlemlememiş veya çok küçük bir artış gözlemlemiştir. Dolayısıyla, konuyla ilgili yayınlarda, naylon lif donatılı betonların eğilmede çekme dayanımı üzerine birbiriyle çelişkili sonuçlar mevcuttur [37]. Bunun da sebebi naylonun yüksek su emme kabiliyetinin olmasıdır. Çünkü beton karışım suyundan emdiği su, lifin etrafındaki bölgede çimento hidratasyonu için yeterli suyu bırakmazsa ve ya lifler çimento hamuru içerisinde ayırıcı bir katman oluşturursa bu bölge kusurlu bir bölge oluşmuş olur. Bu nedenle de eğilme dayanımı ve basınç dayanımları düşük çıkmaktadır. Ancak betonun enerji yutma kapasitesini gene de arttırmaktadır.

2.4.4 Cam Lifi Takviyeli Kompozitlerin Özellikleri

Cam lifli betonlar portland çimentosu, ince agrega, alkali dayanımlı cam lifleri ile belirli katkıların karışmasıyla oluşan lifli kompozitlerdir. Cam lifli kompozitler esnektir ve çarpma dayanımı yüksektir. Betona kazadığı esneklik ve ağırlığının az oluşu pek çok dış cephe ve tasarım uygulamalarında karşımıza çıkar.

Başlangıçta, cam liflerinin üretiminde alkali camlar kullanılmıştır. Bunun üzerine alkali oranı düşük elektrik dayanımlı silikat camlar üretilmiştir. Bunlara E-camı denilmektedir. E-camları sanayi sektöründe çokça kullanılmasına rağmen betonun

alkali etkisinden dolayı inşaat sektöründe pek sıkça kullanılmaz. Bu gelişmelerden sonra “CEM-FİL” adı verilen alkali etkisine dirençli camlar üretilmiş ve günümüzde sıkça karşımıza çıkan cam lifleri arasına girmiştir.

Çizelge 2.8: Cam elyafı üretilen çeşitli camların bazı özellikleri [39]

Özellikler	Cam Türleri						
	E-Camı	A-Camı	C-Camı	R-Camı	D-Camı	M-Camı	S-Camı
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,54	2,45	2,45	2,58	2,16	2,89	2,49
Çekme Dayanımı (MPa)	3600	3100	3400	4400	2450	3500	4500
Kopma Uzama Oranı (%)	4,8	-	4,8	-	-	-	5,4
Çekme E-Modülü (GPa)	76	72	70	85	53	111,3	86
Kırılma İndisi	1,548	1,512	-	-	1,47	1,635	1,523
Isıl Genleşme Katsayısı (cm/cm ⁰ K)	1,6x10 ⁻⁶	-	1,6x10 ⁻⁶	-	3,1x10 ⁻⁶	-	1,7x10 ⁻⁶
Lif Çapı (mm)	3,20x10 ⁻³	-	-	-	-	-	3,13x10 ⁻³
Yumuşama Noktası (°C)	850	0	690	990	770	-	-
Dielektrik Sabiti (1 MHz)	6,33	-	-	-	5,8	-	5,34

2.5. Lifli Kompozitlerin Kullanım Alanları

Lifli kompozitler günümüzde hem sanayi hem de inşaat sektöründe çokça karşımıza çıkmaktadır. Her lifin her çeşit matrisle uyum sağlamayacağı gibi her lifli kompozit de her uygulamada kullanılamayacaktır. Bu nedenle her farklı lifli kompozit farklı uygulama alanlarında kullanılır.

Çelik lifler yüksek süneklilik ve yüksek çekme mukavemeti sayesinde depreme dayanıklı yapılarda, tünellerde püskürtme beton ile, prekast elemanlarda, yol ve güvenlik yapıları gibi pek çok alanda kullanılabilir.

Sentetik lifler ise betonda erken plastik rötre ve betonun tokluğunu arttırmakla beraber betonun içindeki suyu emerek suyun betondan uzaklaşmasını engellemektedir. Ayrıca polimer lifler son yıllarda püskürtme beton teknolojisinde çelik lifin yerini almaya başlamıştır. Bunun sebebi çelik lifin aşındırıcı bir malzeme olup, püskürtme beton ekipmanına kalıcı zararlar vermesidir.

Daha çok kullanılmaya teşvik edilen polimer lifler teknoloji ile daha da gelişip çelik lifleri geride bırakacak gözükmemektedir.

Cam lifli betonlar ise hafifliklerinden ve iyi işlenebilme özelliğinden faydalanılıp dış cephe giydirmelerinde sıkça kullanılırlar.

Çizelge 2.9: Çesitli lif tiplerinin kullanım alanları [40].

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

2.6 Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkileri

Kimyasal katkılar, taze ve ya sertleşmiş beton ve ya harç özelliklerini değiştiren, yeterli miktarlarda kullanıldığı zaman betonun özelliklerine zarar vermeyen betonun üretiminde kullanılan malzemelerdir.

Betona katılan katkı maddeleri arasında priz hızlandırıcı katkılar, kıvam arttırıcı katkılar, hava sürükleyici katkılar, betonun kimyasallara karşı direncini arttıran katkılar gibi katkıları vardır. Bunlardan en yaygın kullanılanı kıvam arttırıcı süper akışkanlaştırıcılardır.

Betonun dayanımını arttırırken azaltılan su/imento oranı ve ince taneli malzemelerin sıkça kullanılır olması böyle bir katkı maddesinin ihtiyacını doğurmuş ve gelişmesini de günden güne zorunlu kılmıştır.

Ayrıca günümüz beton teknolojisinde kullanımı artan lif donatılı betonlarda kullanılan lifler, taze betonda çökme değerini düşürmekte ve sonucunda liflerin topaklanmasına sebep olmaktadır. Bu da betonda kusur oluşturup mekanik ve durabilite özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle akışkanlaştırıcı kimyasallar betonun mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmede ve korumada çok büyük pay sahibidirler.

Özellikle son yıllarda geliştirilen yeni kuşak hipernesilakışkanlaştırıcılar sayesinde betonda su/imento oranı çok düşük miktarlara kadar çekilebilir olmuştur.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde üretimde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri ve yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri verilmektedir.

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Çimento

Numunelerde kullanılan çimento CEM I 42.5 R olup, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1: Kullanılan çimentonun özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Özgül Yüzey(Blaine)	3718 cm ² /g
Özgül Ağırlık	3,15 g/cm ³
Priz başlangıcı	167 dakika
Priz sonu	213 dakika
Mekanik Özellikler	
Basınç dayanımı (2.gün)	27,9 MPa
Basınç dayanımı (28.gün)	58,9 MPa
Kimyasal Özellikler	
Cl-	% 0,0082
SO ₃	% 2,57
Çözünmeyen kalıntı	% 0,78
Kızdırma kaybı	% 1,45

3.1.2 Agregalar

Üretilen karışımlarda kum, taş tozu, kırma taş I ve kırma taş II olmak üzere 4 tip agrega kullanılmıştır. Beton bileşimlerinde agrega granülometrisi sabit tutulmuştur.

Agregaların elek analizi ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’ te verilmiştir.

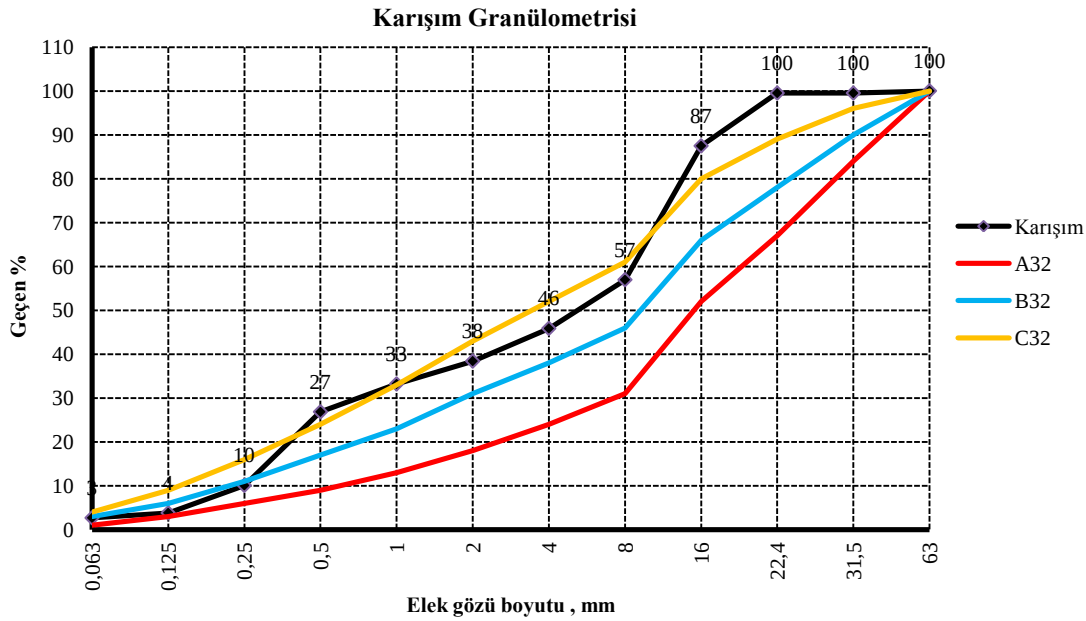
Çizelge 3.2: Üretimde kullanılan agregaların elek analizi

Elek açıklıkları (mm)	No 1 (5-12mm)	Deniz kumu (0-4mm)	No 2 (12-22mm)	Yıkanmamış		Karışım %
				Taştozu (0-5mm)	Kırma Kum (0-3mm)	
0,063	0	0	0	12	15	3
0,125	0	1	0	16	19	4
0,25	0	20	0	23	24	10
0,5	0	78	0	34	36	27
1	0	92	0	47	53	33
2	0	95	0	67	82	38
4	1	97	0	97	100	46
8	37	100	0	100	100	57
16	100	100	53	100	100	87
31,5	100	100	100	100	100	100

Çizelge 3.3: Üretimde kullanılan agregaların özellikleri

Agregalar	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Karışım oranları (%)	Su emme yüzdesi (%)
Kum	2,64	25	1,6
Taş tozu	2,74	22	2,2
Kırma taş I	2,77	27	0,8
Kırma taş II	2,71	26	0,8

Kırma taş I, kırma taş II, kum ve taş tozundan belirli oranlarda alınarak karışımın granülometri eğrisi Şekil 3.1’ de verilmiştir.



Şekil 3.1: Deney numunelerinin üretiminde kullanılan agregaların granülometri eğrisi.

3.1.3 Süperakışkanlaştırıcı

Numunelerin üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı kimyasal malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4' te verilmiştir.

Çizelge 3.4: Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

	Özgül ağırlık	Katı Madde	Alkali İçeriği
Süperakışkanlaştırıcı	1,07 g/cm ³	23 %	3,04 %

3.1.4 Çelik lifler

Çelik lifli karışımlarda kullanılan çelik lifin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.5' te verilmiştir.

Çizelge 3.5 :Çelik lif özellikleri.

Boy (mm)	30
Çap (mm)	0,55
Narinlik (l/d)	55
Çekme dayanımı (N/mm ²)	1100
Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	7850
Elastisite Modülü (GPa)	210

3.1.5 Makrosentetik lifler

3.1.5.1. Poliolefin lifler

Karışımlarda kullanılan poliolefin liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.6' te verilmiştir.

Çizelge 3.6: Poliolefin lifin fiziksel ve mekanik özellikleri

Kullanılan Lif	Boy (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
Poliolefin	50	0,5	618	10000	910

3.1.5.2. PP/PE kopolimer lifler

Karışımlarda kullanılan kopolimer liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.7' da verilmiştir.

Çizelge 3.7: PP/PE kopolimer liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Kullanılan Lif	Boy (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	Erime Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	Yanma Noktası ($^{\circ}\text{C}$)
PP/PE	54	0,667	550-750	5750	910	162-168	398

3.1.6 Bazalt lif

Karışımlarda kullanılan mineral kökenli bazalt lifin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.8’ de verilmiştir.

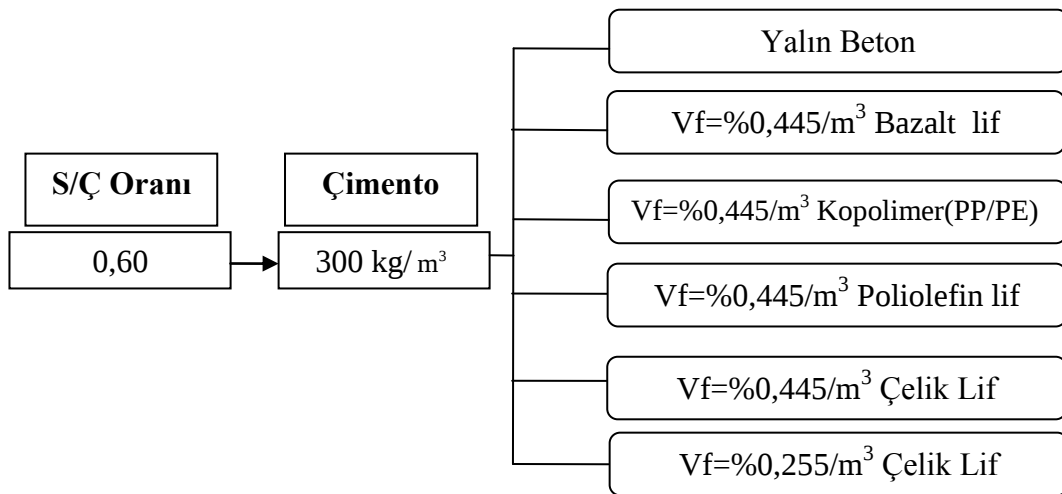
Çizelge 3.8: Bazalt lifin fiziksel ve mekanik özellikleri

Kullanılan Lif	Boy (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)
Bazalt	24	0,015	4840	89	2800

3.2 Deneysel Çalışmanın Amacı ve İçeriği

Bu tez çalışmasında aynı su/çimento oranına sahip betonlara katılan makro sentetik, bazalt ve çelik lifler ile oluşan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Numuneler üretildikten sonra tüm beton gruplarında basınç, yarma çekme, elastisite modülü ve üç noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.2: Deneysel programın şematik gösterimi

3.3 Beton Karışımları ve Numune Kodları

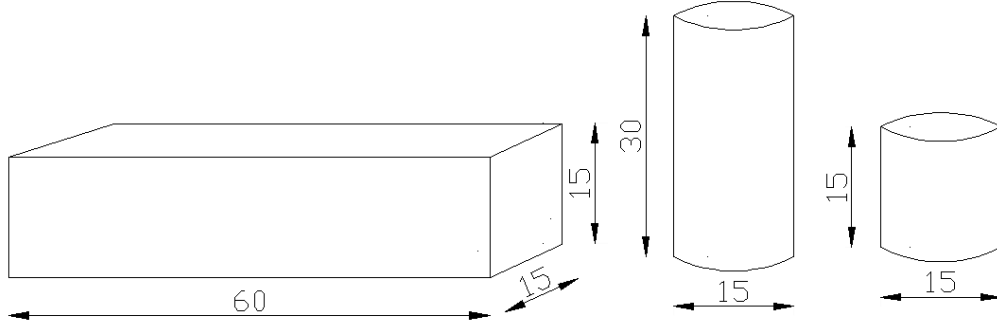
Eşit su/çimento ve beton karışım oranlarına sahip referans betonlara kopolimer lif içeriği 4 kg/m³ olmak üzere ilk karışım hazırlanmıştır. İlk karışımın hacimce %0,445 lif içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Diğer karışımlar için hacimce lif içeriği aynı olacak şekilde poliolefin, bazalt,ve çelik lifler karışımlara eklenerek lif katkılı betonlar hazırlanmıştır. Hacimce %0,445 lif içeriğine sahip çelik lifli karışımın m³'ünde 35 kg çelik lif bulunmaktadır. 20 kg/m³ çelik lif içeriğine sahip bir başka karışım daha hazırlanmıştır ve hacimce %0,255' e tekabül etmektedir. Numune kodlaması yapılırken su/çimento oranı sabit olup bunu belirten ifade "W60" ile gösterilmiştir. Lif içeriklerine göre kodlama yapılırken; PP/PE kopolimer lif için "KP", poliolefin lif için "PO", bazalt lif için "B" ve çelik lif içinse "ÇL" ifadeleri kullanılmıştır. Numune kodlamasının en son adımında ise hacimce lif yüzdeleri bilinen karışımlardaki lif ağırlıkları yazılmıştır. Karışım kodları Çizelge 3.9' da verilmiştir.

Çizelge 3.9: Karışımların gerçek beton bileşimleri

Kullanılan Malzeme	W60S0	W60KP4	W60PO4	W60B12.5	W60ÇL35	W60ÇL20
Çimento (kg/m ³)	300	304	303	301	304	306
Su (kg/m ³)	191	194	193	192	197	192
Kum (kg/m ³)	437	444	443	440	440	449
Taş Tozu (kg/m ³)	417	424	422	420	423	426
Kırma Taş I (kg/m ³)	513	521	520	516	520	524
Kırma Taş II (kg/m ³)	491	499	497	494	498	501
Poliolefin Lif (kg/m ³)	0	0	4,0	0	0	0
Kopolimer Lif (kg/m ³)	0	4,0	0	0	0	0
Bazalt Lif (kg/m ³)	0	0	0	12,5	0	0
Çelik Lif (kg/m ³)	0	0	0	0	35,0	20,0
S.A. (kg/m ³)	5,0	5,1	5,1	5,0	5,1	5,1
Su / Çimento (%)	0,64	0,64	0,64	0,64	0,65	0,63

3.4 Numune Boyutları

Eğilme dayanımları ve kırılma enerjilerini hesaplamak için 15x15x60 cm boyutlarında 6 adet prizma numune, basınç dayanımı ve elastisite modüllerini belirlemek amacıyla 15x30 cm 3 adet silindir numune, yarma-çekme dayanımlarını tespit etmek amacıyla 15x15 cm boyutlarında 6 adet silindir numune üretilmiştir.



Şekil 3.3: Numunelerin boyut ve şekilleri

3.5 Taze beton deneyleri

Üretilen betonlarda taze beton deneylerinden slump(çökme) ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır.

3.5.1 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 edilmiştir.

3.5.2 Slump(Çökme) deneyi

Taze betonun kıvamı ve işlenebilirliği hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla yapılmıştır. Çökme konisi içerisine beton üç kademede 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 beton deney sonuçları Tablo 3.10' da verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Yalın ve lifli betonların taze beton deney sonuçları

Karışım Kodu	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Çökme (Lifsiz , cm)	Çökme (Lifli, cm)
W60S0	2354	17	-
W60KP4	2394	19	8
W60PO4	2387	19	6
W60B12.5	2381	19	2
W60ÇL20	2423	21	10
W60ÇL35	2421	19	12

3.6 Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.6.1 Silindir basınç deneyi

Sertleşmiş beton deneyleri kapsamında silindir basınç deneyleri, yarmada çekme deneyleri, plak ve kirişlerde enerji kırılması deneyleri ve kirişlerde üç noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır.

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 kısalmayı 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 %45' i arasında kalan grafiğin eğiminden yararlanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır.

3.6.2 Yarma çekme deneyi

Silindir yarmada çekme deneyi için 300 mm yüksekliğinde, 150 mm çapında silindir numuneler üretildi. Bu numuneler 2' ye bölünerek 150mm yüksekliğinde 150mm çapında silindirler elde edildi.

Bölünen 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)

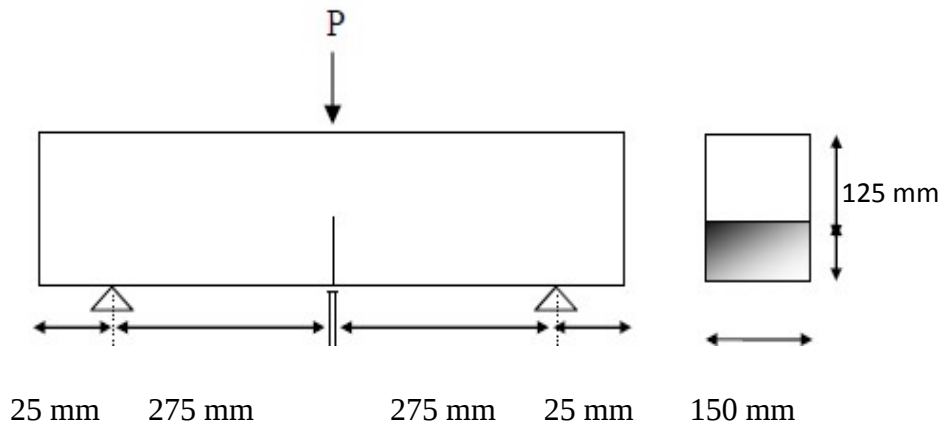
L: Numunenin yükleme parçasına temas çizgisinin uzunluğu(mm)

d: Numunenin seçilen en kesit ölçüsünü (mm)

3.6.3 Üç noktalı eğilme deneyi

Eğilme deneylerinde kullanılan kiriş numunelerin boyutları 150x150x600mm olup mesnetler arası açıklık 550 mm alınmıştır. Tüm eğilme deneyleri INSTRON 5500R kapalı çevrimli deplasman kontrollü 100 kN kapasiteli deney makinesinde gerçekleştirilmiştir. Deneyden önce kiriş açıklığının ortasında 25 mm derinliğinde çentikler açılmış, böylece yük taşıyan etkin kesit 150x125 mm olmuş, bu çentiklere yerleştirilen çatlak ağzı açılma deplasmanı ölçen cihazın kullanılması ile çatlak genişliği kontrol edilerek deneyler yapılmıştır. Deney sırasında, aynı anda yük-sehim eğrisi “LVDT” ile yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı (ÇAAD) ise “çatlak ağzı açılma deplasmanı ölçer” ile ölçülmüştür.

Bu deney düzeneği ile uygulanan yükler ve bu yüklere karşılık gelen sehim - yük ve çatlak ağzı açılma deplasmanı – yük değerleri alıcılardan bilgisayara aktarılarak yük-sehim ve yük – çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.4: RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeni

3.6.4 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 de denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

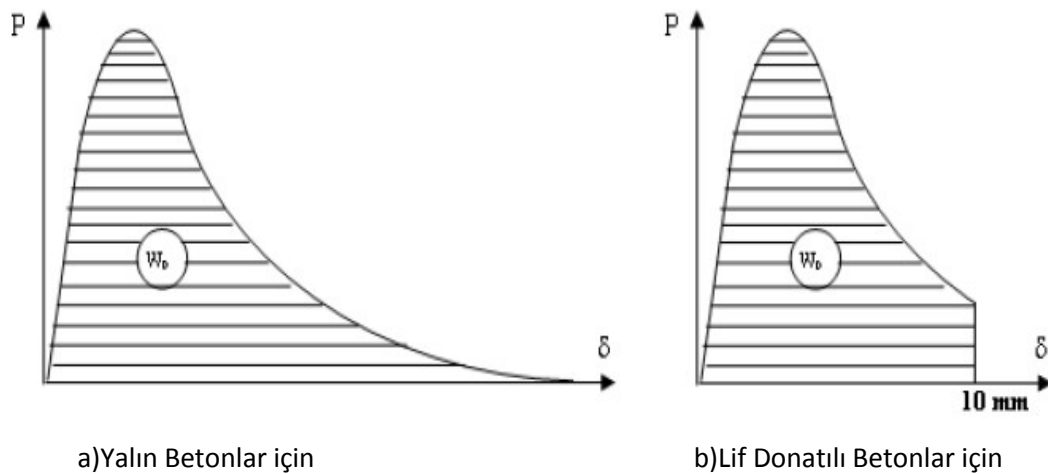
$$f_{net} = (3PL) / BD^2 \quad (3.3)$$

P : Kırılma yükü(N)

L : Mesnetler arası mesafe(mm)

B : Numunenin kesit genişliği(mm)

D : Numunenin kesit yüksekliği(mm)

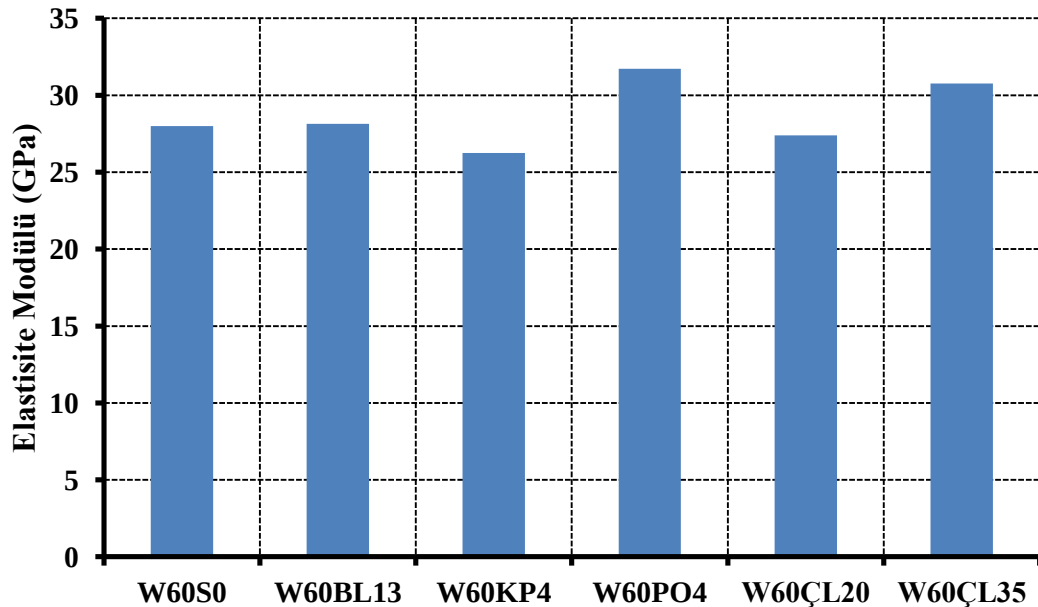


Şekil 3.5: Yük-Sehim eğrisinin temsili gösterimi

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

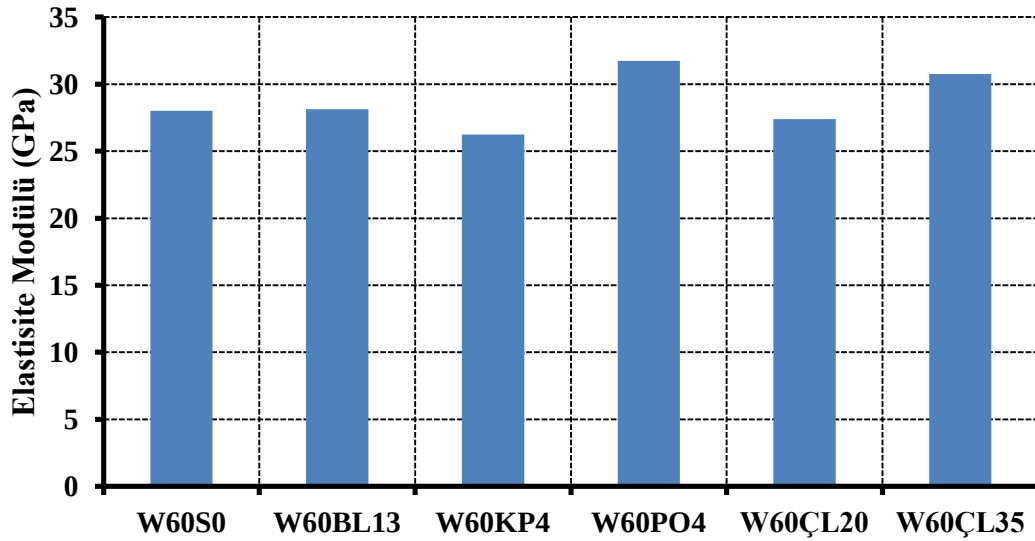
4.1 Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri her karışım için EK A' da verilmiştir. Basınç dayanımı değerlerinin ortalaması Şekil 4.1' de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre hacimce lif oranı aynı olan bazalt, çelik, kopolimer ve poliolefin lif içeren karışımlardan en fazla basınç dayanımına sahip olan 40,6 MPa ile 35 kg/m³ çelik lif katkılı beton olmuştur. 20 kg/m³ çelik lif içeren karışımların ise 32,2 MPa basınç dayanımına ulaştığı görülmüştür. Makro sentetik liflerde ise polipropilen-polietilen kopolimer lif ve poliolefin lif içeren karışımların basınç dayanımlarının 36,8 ve 37,1 MPa olduğu belirlenmiştir. Mineral kökenli bazalt lifli karışımlarda ise silindir basınç dayanımının 34,8 MPa olduğu belirlenmiştir. Buna göre yalın betona lif katılmasının silindir basınç dayanımında $\pm\%10$ ' luk değişimle sınırlı kaldığını söyleyebiliriz.



Şekil 4.1 : Yalın ve lifli betonların silindir basınç dayanımı değerleri

Silindir basınç deneylerinden elde edilen elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Makrosentetik liflerden polyolefin lif içerikli betonların elastisite modülünün 32 GPa olduğu ve bütün karışımlar içerisinde en yüksek elastisite modülüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Poliolefin lifli karışımların silindir basınç dayanımında kopolimer lif katkılı betonlarla çok yakın çıkmalarına rağmen PP/PE kopolimer lif içerikli karışımların elastisite modülü %20 daha düşük olduğu bu değer 26 GPa olduğu belirlenmiştir. 35 kg/m³ çelik lif içerikli karışımlarda elastisite modülü 31 GPa olup kopolimer lifli karışımlarla yaklaşık aynı elastisite modülü değerine sahip oldukları gözlemlenmiştir. 20 kg/m³ çelik lif içeren karışımlarda ise elastisite modülünün 27 GPa olduğu belirlenmiştir ve çelik lif içeriğinin azalmasının hem silindir basınç dayanımında hem de elastisite modülü değerinde azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bazalt lif içerikli betonlarda ve yalın betonlarda ise elastisite modülü aynı değerde olup 28 GPa olarak bulunmuştur.

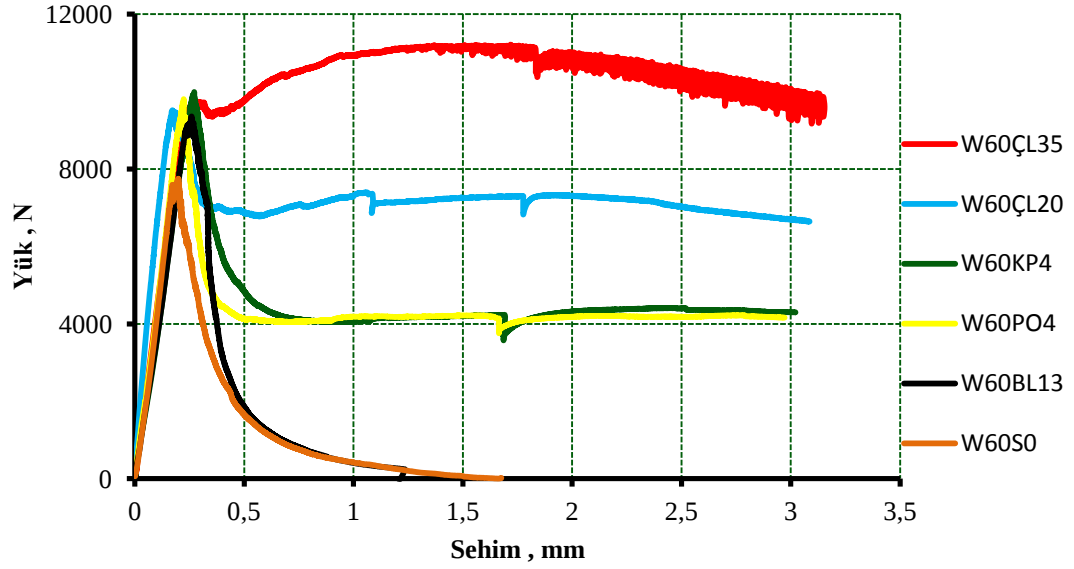


Şekil 4.2 : Yalın ve lifli betonların elastisite modülü değerleri.

4.2 Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

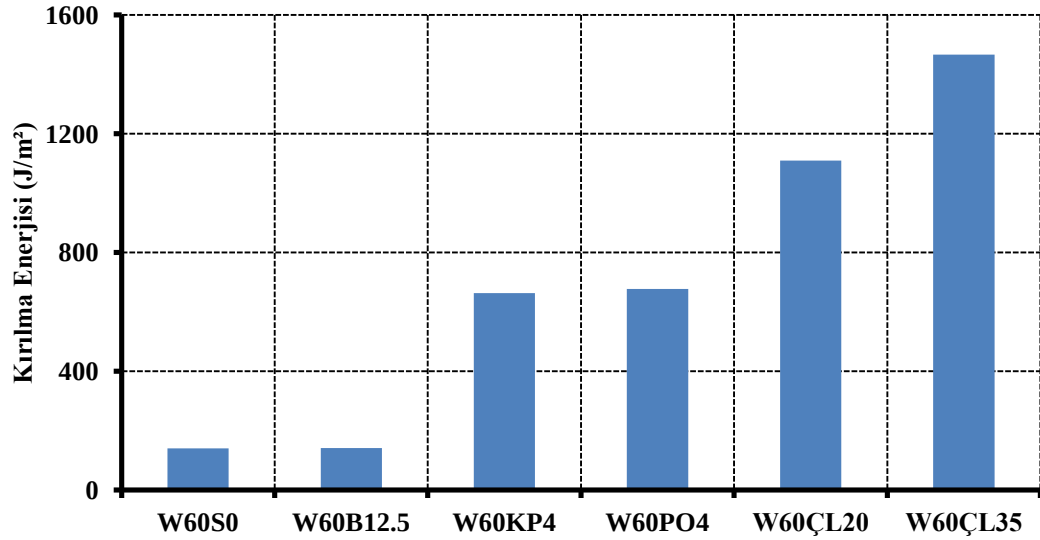
Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre yalın betona lif eklenmesi kırılma enerjisini büyük oranda arttırmaktadır. Yalın betona hacimce % 0,445 lif katılmasıyla, bazalt lifli karışımların haricinde, diğer lif katkılı betonların kırılma enerjilerinin arttığı görülmüştür.

Deneylerden elde edilen yük sehim eğrileri Şekil 4.3' te gösterilmiştir. Bu deneyler sonucunda her numune için elde edilen grafikler ve değerler Ek B'de verilmiştir.



Şekil 4.3 :Yalın ve lifli betonların yük-sehim eğrileri.

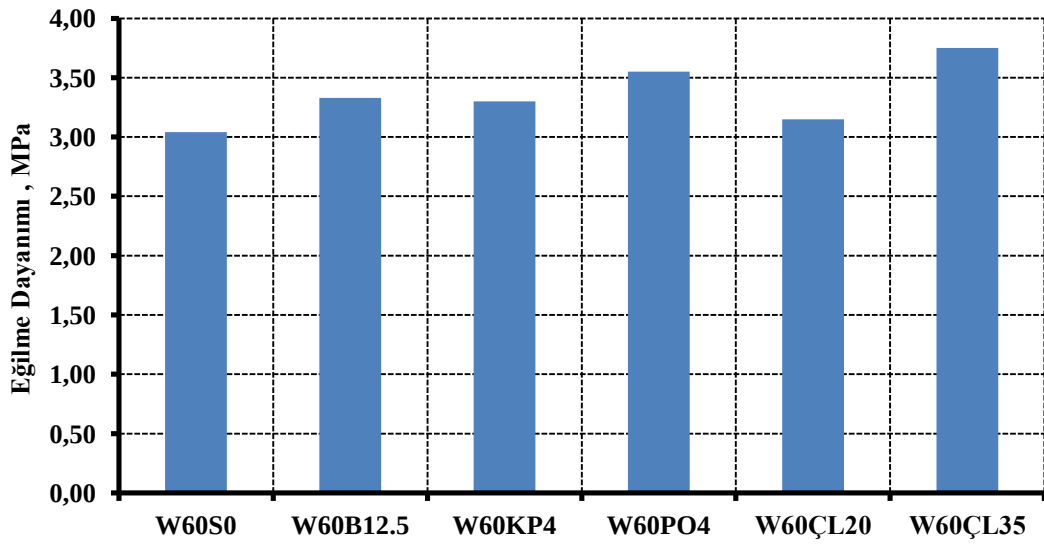
Yük sehim eğrilerinden hesaplanan kırılma enerjisi değerleri Şekil 4.4' te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 :Yalın ve lifli betonların kırılma enerjisi değerleri.

Kopolimer lif içerikli karışımın kırılma enerjisi 663 J/m² ve poliolefin lif içerikli karışımların da kırılma enerjisi 677 J/m² olduğu belirlenmiştir. Hacimce aynı oranlarda kopolimer ve poliolefin içerikli karışımların enerji seviyeleri yalın betona

göre artış göstermiş olup, bu iki lifin kendi aralarında önemli bir fark meydana getirmediği belirlenmiştir. Hacimce % 0,445 çelik lif içeren karışımlarda kırılma enerjisi diğer lifli karışımlara göre oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir ve kırılma enerjisinin 1466 J/m^2 olduğu belirlenmiştir. Çelik lif içeriğinin 20 kg/m^3 olduğu karışımlarda ise çelik lif içeriğinin 35 kg/m^3 olduğu duruma göre kırılma enerjisinde azalma olduğu gözlemlenmiştir ve kırılma enerjisinin 1109 J/m^2 olduğu belirlenmiştir. Çelik lif içeriğinin % 0,255 olduğu karışımlar hacimce % 0,445 bazalt ve makro sentetik lif içeren karışımlardan daha yüksek kırılma enerjisine sahip olduğu görülmüştür.

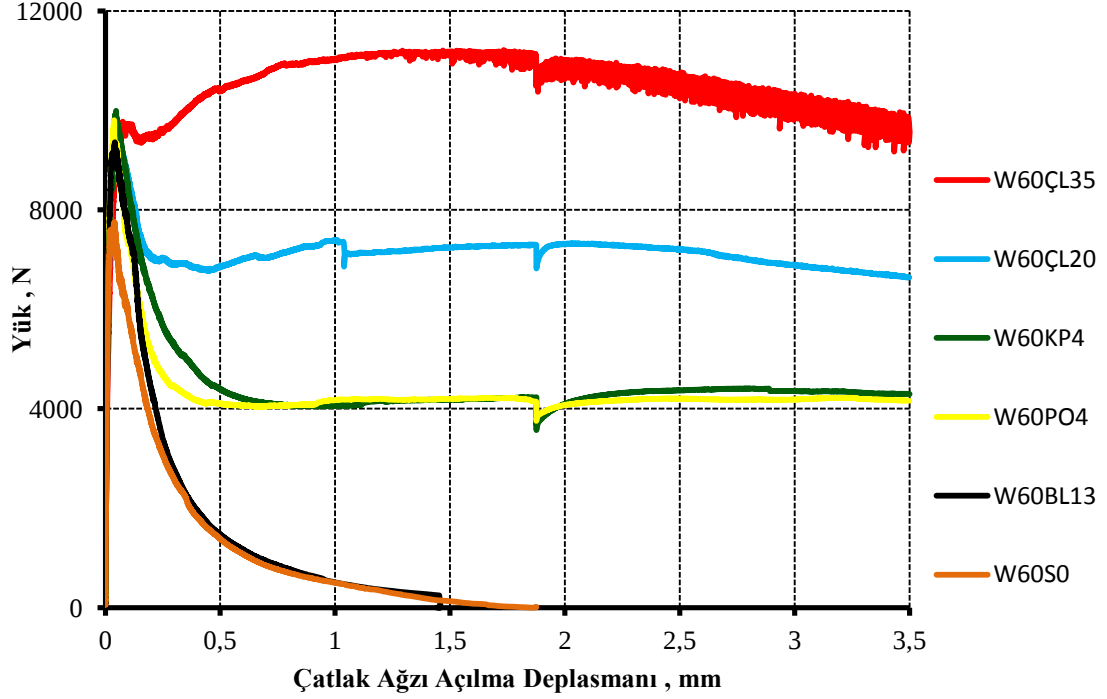


Şekil 4.5 :Yalın ve lifli betonların eğilme dayanımı değerleri

Yalın ve lifli betonlara 3 noktalı eğilme deneyi uygulanması sonucunda eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Elde edilen eğilme dayanımlarının ortalama değerleri Şekil 4.5’ te verilmiştir. Karışımlarda lif kullanılmasıyla, eğilme dayanımlarında bir artış olduğu belirlenmiştir. Hacimce % 0,445 kopolimer, poliolefin, bazalt ve çelik lif içeren karışımlardan en yüksek eğilme dayanımına sahip olan çelik lif katkılı betonlar olmuştur ve eğilme dayanımı 3,75 MPa olarak belirlenmiştir.

Yalın betonun eğilme dayanımının 3,04 MPa, mineral kökenli bazalt lifli karışımın eğilme dayanımının ise 3,33 MPa olduğu belirlenmiştir. Diğer makro sentetik lifli karışımlardan, kopolimer lif içeren betonların eğilme dayanımı 3,30 MPa olarak belirlenmiştir. Poliolefin lif içeren betonların eğilme dayanımının 3,55 MPa olup kopolimer lifli karışımlardan daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu

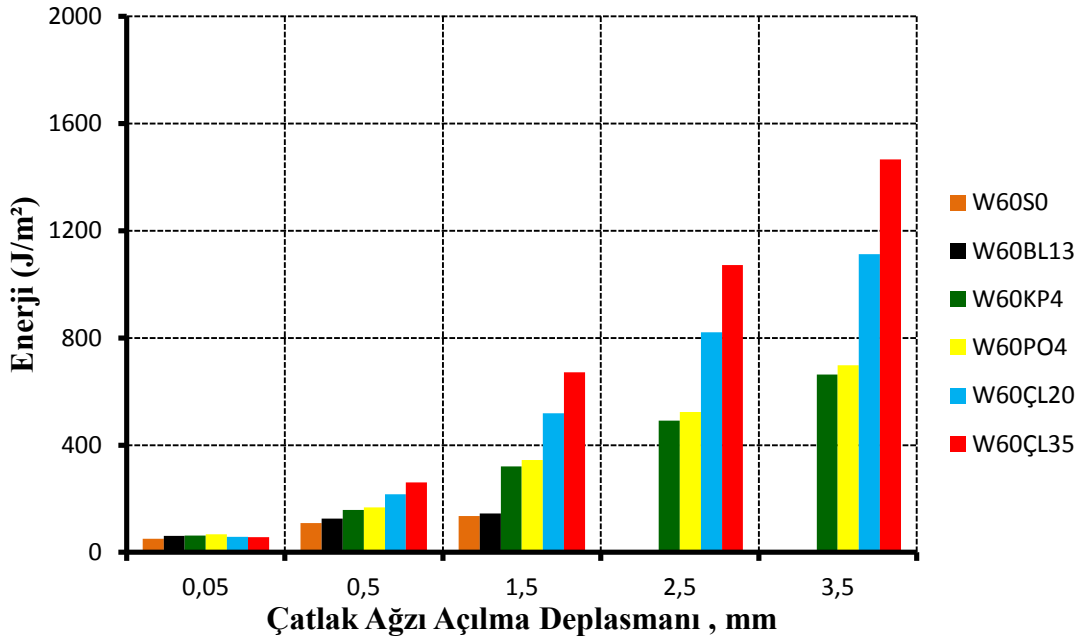
gözlemlenmiştir. 20 kg/m³ çelik lif içerikli karışımların 3,15 MPa eğilme dayanımına sahip oldukları belirlenmiştir. Buna göre çelik lif içeriğinin azaltılmasıyla eğilme dayanımının da azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6 :Yalın ve lifli betonların çatlak ağzı açılma deplasmanı-yük eğrileri

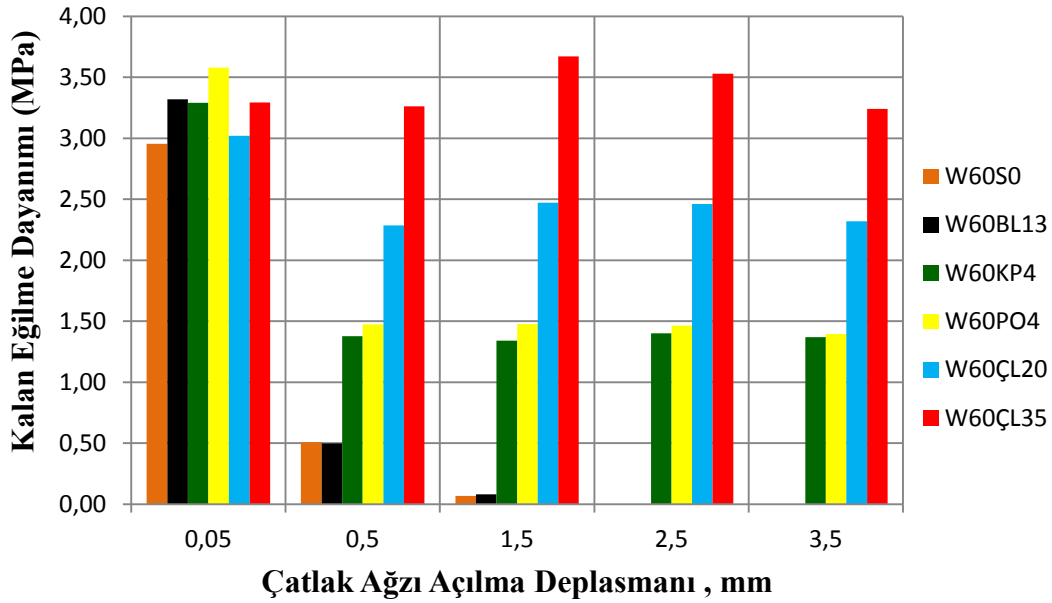
Deneylerden elde edilen çatlak ağzı açılma deplasmanı yük eğrileri Şekil 4.6' da verilmiştir.

Yalın ve lif içerikli betonların Rilem[43] kırılma enerjisi deneylerindeki belirli çatlak ağzı açılma deplasmanı için enerji ve kalan eğilme dayanımları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 :Yalın ve lifli betonların çatlak ağız açılma deplasmanlarına göre kırılma enerjisi değerleri grafiği.

Şekil 4.7’ de görüldüğü gibi yalın betonlarda ve bazalt lifli betonlarda çatlak ağız açılma deplasmanı 2,5 mm değerine ulaşmamaktadır. Ayrıca çelik lifli betonlar en fazla enerji tutma kabiliyetine sahip betonlardır. Öte yandan çelik lif içerikli betonlarda çelik lif oranı arttıkça enerji tutma kapasitelerinin de arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8 : Yalın ve lifli betonların çatlak ağız açılma deplasmanlarına göre eğilme değerleri grafiği

4.3 Alman Beton Birliğine Göre Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Lif donatılı betonlar üzerinde yapılan çalışmalarda, liflerin betonun mekanik davranışlarında bir iyileşme sağlar. Liflerin özellikle betonun şekil değiştirme ve tokluk kapasitesini arttırdığı bilinmektedir.

Lif donatılı betonların performans sınırlarını 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. 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:[41]

- 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.

Alman Beton Birliği [42] tarafından lif donatılı betonların tasarımı için iki farklı tasarım yöntemi verilmektedir. Bu tasarım yöntemlerinin birisi elastik teoriye göre diğeri enerji yutma kapasitesine göre yapılmaktadır. ABBY'de 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 taşımagücü (TSD) sınır durumları için tanımlanan iki farklı şekil değiştirme bölgesine bağlı olarak hesaplanan enerji yutma kapasitelerine göre belirlenmektedir. Lif içeriğine sahip betonlar için ABBY'ye göre tanımlanan şekil değiştirme bölgeleri, Çizelge 4.1' de verilmiştir [42].

Çizelge 4.1 : Lif içerikli 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.

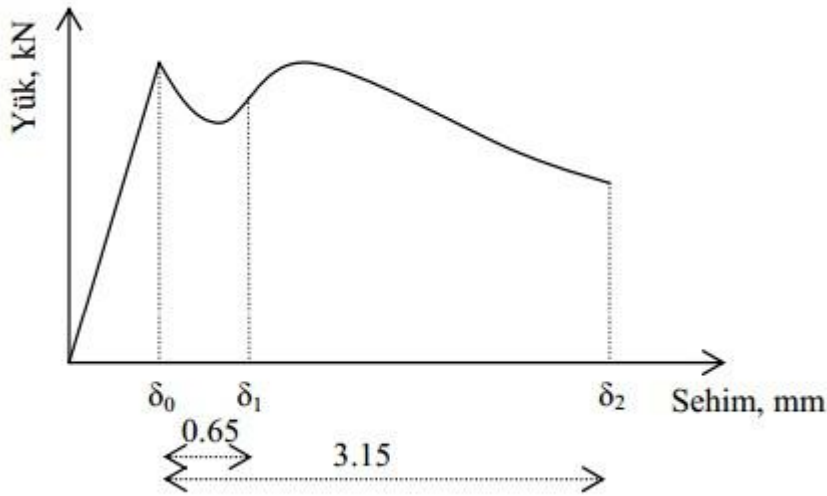
$$f_{eş} = \frac{T_i}{\delta_i} \cdot \frac{S}{b \cdot h^2} \quad (4.1)$$

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.h: Kiriş kesit alanı (genişlik x yükseklik), mm

S : Kiriş açıklığı, mm



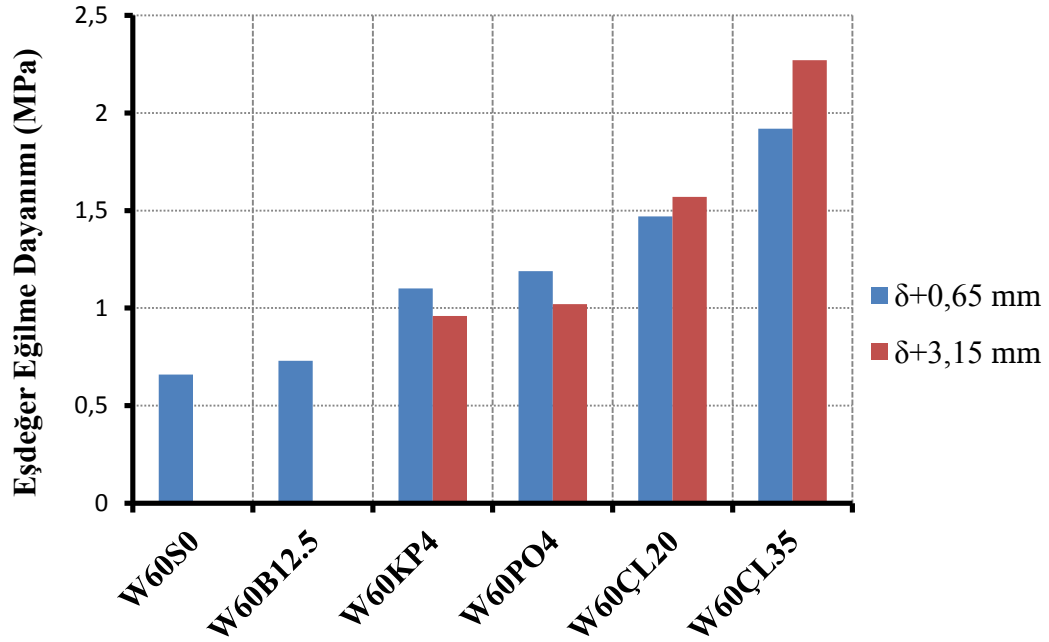
Şekil 4.9 :ABBY’ye göre tanımlanan şekil değiştirme bölgeleri [42].

Alman Beton Birliği, 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 silindir/küp basınç dayanımını, F 0,9/0,7 ifadesi ise kullanılabilirlik/taşıma gücü sınır durumu için eşdeğer eğilme dayanım sınıfını belirtmektedir [41].

Çelik, makro sentetik ve mineral kökenli lifler kullanılarak üretilen prizma kiriş numunelere üç noktalı eğilme deneyi uygulanması sonucunda ABBY’ye göre

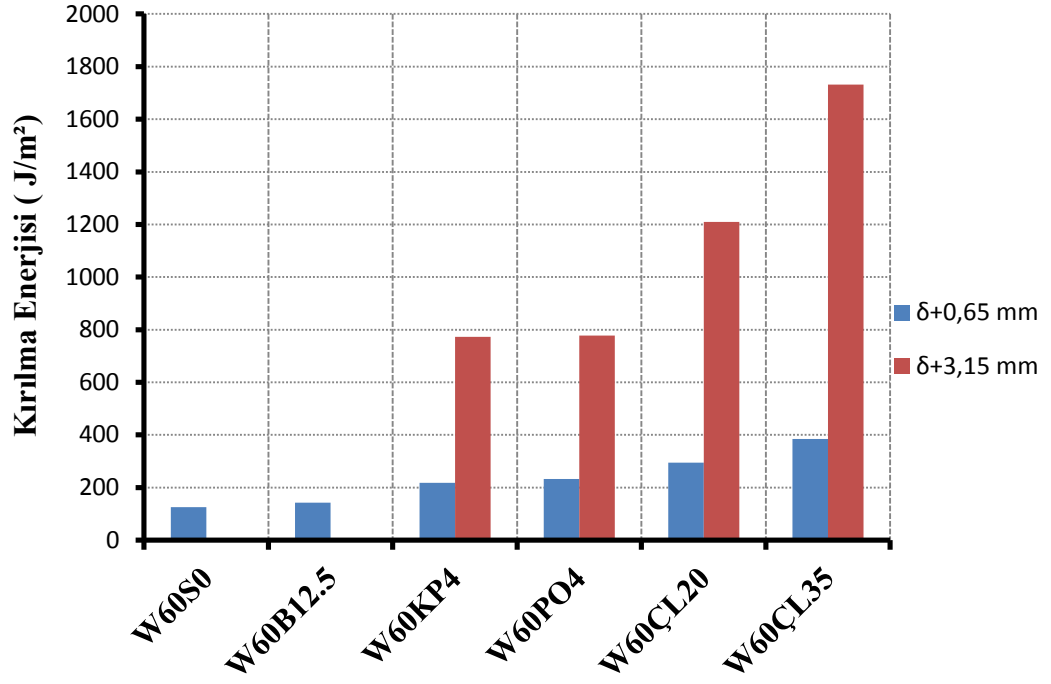
hesaplanan Kullanılabilirlik Sınır Durumu ve Taşıma gücü Sınır Durumu değerleri, enerji ve eğilme dayanımlarına bağlı olarak Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi çelik liflerin her iki durum için de üstünlükleri söz konusudur. Ayrıca yalın beton ve bazalt lif donatılı beton ABBY' nin ön gördüğü TSD' a ulaşamamakta "0" değerini almaktadır.



Şekil 4.10 : Yalın ve lifli betonların KSD ve TSD değerleri-eşdeğer eğilme dayanımı grafiği.

Şekil 4.11'te görüldüğü üzere her iki durumda da çelik lif katkılı betonlar eşdeğer eğilme dayanımında olduğu gibi gene üstündür. Ayrıca karşımda çelik lif oranının artması hem eşdeğer eğilme dayanımında hem de enerji değerinde artış sağlamıştır. Bununla beraber enerji değerleri arasındaki farklar KSD' den daha çok TSD' da daha fazla bir artış göstermiştir. Eşdeğer gerilme dayanımında olduğu gibi enerji grafiğinde de yalın beton ve bazalt lif donatılı beton ABBY' nin öngördüğü TSD' a ulaşamamıştır.



Şekil 4.11 : Yalın ve lifli betonların KSD ve TSD değerleri enerji grafiği.

5. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- Çelik, makrosentetik ve ya mineral lif eklenmesi sonucu silindir basınç dayanımlarında ve elastisite modülü değerlerinde belirgin bir değişiklik olmamıştır. Literatürde de belirtildiği gibi basınç dayanımı $\pm\%10$ aralığında değişiklik göstermiştir.
- Betonda hacimce % 0,445 çelik lif kullanımı yarma çekme dayanımı % 18 artmıştır. Hacimce % 0,255 çelik lif kullanımında ise yarma çekme dayanımı yalın betona göre % 9 oranında artmıştır. Beton hacminin % 0,445 polipropilen-polietilen kopolimer lif kullanımı yarma çekme dayanımında yalın betona göre % 6 azalma olmuştur. Hacimce aynı oranlarda bir başka makrosentetik lif olan poliolefin lif kullanımında ise % 2' lik bir azalma görülmüştür. Mineral kökenli bazalt lifli betonda hacimce aynı makrosentetik lif içeriğine sahip karışımlara oranla daha yüksek yarma çekme dayanımlarına ulaşmıştır. Ancak, çelik lifli karışımlardan daha düşük değerler aldığı belirlenmiştir.
- Hacimce % 0,445 bazalt lif içeren karışımların yalın betona göre kırılma enerjisinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Hacimce aynı oranlarda makrosentetik lif içeren karışımların kırılma enerjileri yalın betona göre yaklaşık 3,8 kat artış göstermiştir. Hacimce aynı oranda çelik lif katılması ise kırılma enerjisini 9,5 kat arttırmıştır. Hacimce aynı oranlarda çelik lif içeren betonlar makrosentetik lifli betonlara göre kırılma enerjisi değerlerinde ortalama % 121' lik artış görülmüştür. 35 kg/m³ çelik lif içerikli karışımlar 20 kg/m³ çelik lif içerikli karışımlara göre kırılma enerjisi değerleri % 32 daha fazladır.
- Mineral kökenli bazalt lif içerikli karışımların eğilme dayanımları yalın betona göre % 9,5 artmıştır. Hacimce aynı oranda polipropilen-polietilen

Betona poliolefin lif katılması durumunda, eğilme dayanımı yalın betona göre % 17, bazalt ve kopolimer lif içerikli karışımlara göre ise % 7,5 artış göstermiştir. Çelik lif içeriği 35 kg/m³ olan karışımların yalın betona göre eğilme dayanımları % 23 artış göstermiştir. Çelik lif içeriği 20 kg/m³ olan betonların eğilme dayanımları 35 kg/m³ çelik lif içeren betonlara göre % 16 azalmıştır. Çelik lif içeriği 20 kg/m³ olan betonların eğilme dayanımlarında yalın betona göre % 4 artış olduğu belirlenmiştir.

- Alman Beton Birliği Yöntemine göre hesaplanan kullanılabilirlik sınır durumundaki eğilme dayanımları yalın betona hacimce % 0,445 çelik lif katılmasıyla yaklaşık 2 kat artmıştır. Hacimce aynı oranda bazalt lif katılmasıyla eşdeğer gerilmelerde değişim görülmez iken PP/PE kopolimer ve poliolefin lifli karışımlarının kullanılabilirlik sınır durumundaki eşdeğer eğilme dayanımları yaklaşık % 70 oranında artmıştır. Çelik lif içeriği 20 kg/m³ olan karışımların kullanılabilirlik sınır durumundaki eşdeğer gerilmeleri yalın betona göre 1,2 kat artış gösterirken, çelik lif içeriği 35 kg/m³ olan karışımlara göre % 22' lik bir azalma olduğu görülmüştür.
- Bazalt lifli ve yalın betonlar Alman Beton Birliği Yöntemi'nin belirlediği taşıma gücü sınır durumundaki sehim değerine ulaşamamıştır ve eşdeğer eğilme dayanımı değeri hesaplanamamıştır. Çelik lif içeriği 35 kg/m³ olan karışımların taşıma gücü sınır durumundaki eşdeğer eğilme dayanımları kullanılabilirlik sınır durumundakine göre yaklaşık % 20 artış göstermiştir. Çelik lif içeriği 20 kg/m³ olan betonların kullanılabilirlik sınır durumu ve taşıma gücü sınır durumundaki eşdeğer gerilmeleri yaklaşık aynı kalmıştır ve taşıma gücü sınır durumuna göre eşdeğer gerilmesi, 25 kg/m³ çelik lif içeren karışımlara göre %45 azalma olduğu belirlenmiştir. Hacimce aynı PP/PE kopolimer lif ve poliolefin lif içeren karışımların taşıma gücü sınır durumundaki eşdeğer gerilmeleri kullanılabilirlik sınır durumundaki gibi aynı kalmış, hacimce aynı oranda çelik lif içeren karışımlara göre ise 1,3 kat azalma göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M.,** (2004). Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton 2004 Kongresi Bildiriler, İstanbul.
- [2] **Kurt, G.,** (2006). Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [3] **Taşdemir, M.A. ve Bayramov F.,** (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, itüdergisi/d, Cilt 1, Sayı 2.
- [4] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Ağar, A.Ş. ve Yerlikaya, M.,** (2005). Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı, 6. Ulusal BetonKongresi, İ.T.Ü, İstanbul.
- [5] **Kocataşkın, F.,** (1991). Betonun Dünü Bugünü Yarını, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası s: 23.
- [6] **Aitcin, P. C.,** (2000). “Cements of Yesterday And Today Concrete of Tomorrow”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1349-1359.
- [7] **Richard, P., Cheyrezy, M.,** (1995). “Composition of Reactive Powder Concretes”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp. 1501-151.
- [8] **Topçu, İ. B., Karakurt, C.,** Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, Sayı 437 s:25.
- [9] **Taşdemir, M.A. ,Karihaloo, B.H., Bayramov, A.N., Yerlikaya, M. Ve Sönmez, R.,** (2004). Betonarme Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi için yüksek Dayanımlı/Yüksek Performanslı Betonlar, Yüksek Performanslı Lif Donatılı Kompozitler ve Kendiliğinden Yerleşen Betonlar, 14. ERMCO Kongresi, Helsinki, 16-18 Haziran .
- [10] **Ekincioglu, Ö. ,** (2003). Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [11] **Chawla K.K.,** (1998). Fibrous Materials, Cambridge University Pres, Cambridge.
- [12] **Sahmaran, M., Yurtseven, A., Yaman, I.O.,** Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, Building and Environment, 40, 1672-1677.
- [13] **Url-1 < <http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/yapimalzemesi/beton/6.HTM>.**
- [14] **Fırat, M.T.,** (1996). Silis dumanı içeren yüksek mukavemetli betonların enerji tutma kapasitelerinin arttırılmasında çelik lif kullanımının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [15] **Hannant, D.J.**, (2003). Advanced Concrete technology, Elsevier Ltd.
- [16] **Bunsell, A.R.**, (1988). Fiber Reinforcement for Composite Materials, Vol:2 Composite Materials Series, Elsevier Science, The Netherlands..
- [17] **Biber, S.A.**, (2001). Karmaşık Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı, Bitirme Ödevi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [18] **Sim, J., Park, C. And Moon, D.**, (2005). Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures. Composites: Part B, 36.
- [19] **Brik, V.B.**, (1999). Performance evaluation of basalt fibers and composite rebars as concrete reinforcement. Tech Res Report submitted to NCHRP-IDEA, Project 45.
- [20] **Klimov, U.A., Piskun, R.A.**, (2010). Report on the results of experimental research to determine strength, hardness, and crack resistance of concrete elements reinforced by non-metallic composite rebar produced by Technobasalt-Invest LLC, Kiev.
- [21] **ASTM A 820**, (1996). Standart Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, The American Society for Testing and Materials, U.S.A.
- [22] **TS 10513**, (1992). Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [23] **Cement&Concrete Institute**, (2010). Fibre Reinforced Concrete, Cement & Concrete Institute, Midrand.
- [24] **Ersoy, H. Y.**, (2001). Kompozit malzeme, Literatür Yayınları: 66, İstanbul, Türkiye.
- [25] **Mclyntyre, J.E.** (2005). Synthetic Fibres : Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin, CRC Press.
- [26] **Victor, C.Li.** (2002). "Large Volume High Performance Applications of Fibers in Civil Engineering," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 83, pp. 660-686.
- [27] **Ramakrishnan, V.** (1999) "Structural Application of Polyolefin Fiber Reinforced Concrete," ACI SP-183-13, pp. 235-253.
- [28] **Ramakrishnan, V. And Sivakumar, C.** (1999) "Performance of Polyolefin Fiber Reinforced Concrete under Cyclic Loading," AC-CANMET SP-186-10, pp. 161-182.
- [29] **Songa, P. S., Hwangb, S. And Sheub, B. C.** (2005). Strength Properties of Nylon and Polypropylen Fiber Reinforced Concretes, Cement and Concrete Research, Vol.35
- [30] **Bayasi, Z. and Soroushian P.** (1991). Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 88, 129-134.
- [31] **Bayramov, F.** (2004). Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [32] **Betterman, L.R., Quyang C., and Shah S.P.** (1995). Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, Adv. Cem. Bas., 2,s:53-61.

- [33] **Zollo, R. F.** (1997). Fiber-Reinforced Concrete: An Overview after 30 years of Development, *Cement and Concrete Composites*, 19, s:107-122.
- [34] **Shah, S.P. and Balaguru, P.N.** (1992). *Fiber-Reinforced Cement Composites*, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- [35] **Yalçın, M. Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Gökalp, İ., Yerlikaya, M.** (2011). “Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanılabilirlik ve Taşıma Gücü Sınır Durumlarına Göre Tasarımı - Performans Sınıfları”, 8. Ulusal Beton Kongresi, 5-7 Ekim, İzmir, 459- 470.
- [36] **Shah, S. P. and Rangan, B.V.** (1971). “Fiber Reinforced Concrete Properties”, *ACI Journal*, pp. 126-135, February.
- [37] **ACI 544.1R-96.** (1996) State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee 544, American Concrete Institute, Detroit, MI.
- [38] **Sridhara, S., Kumar, S., and Sinare, M. A.** (1971). "Fiber reinforced concrete," *Indian Concrete Journal*, 428-442.
- [39] **Davey, N.** (1965) “A History of Building Materials”, Phoenix House, Londra, İkinci Basım.
- [40] **Url-2** < http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cdb/cdb223_e.html
- [41] **Yalçın, M.** (2009). Çelik Lif Donatılı Beotnların Performansa Dayalı Tasarımı ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- [42] **DBV.** (1996). *Reccomendation: Basis for Design of Industrial Floor Slabs out of Steel Reinforced Concrete*, Eingenverlag, Wiesbaden, Germany.
- [43] **RILEM TC 162-TDF** (2003) : 'Test and design methods for steel fibre reinforced concrete'*Materials and Structures / Matdr&ux et Constructions*, Vol. 36, pp 621-630

EKLER

EK A: Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

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

EK C: Yarma Çekme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar

Ek A: Silindir Basınç Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar**Çizelge A.1 :Yalın ve lifli betonların silindir basınç dayanımı değerleri**

Numune Kodu	Gerilme (MPa)	Ortalama
W60S0-1	37,4	37,1
W60S0-2	36,9	
W60S0-3	37,1	
W60B12.5-1	36,2	34,8
W60B12.5-2	31,0	
W60B12.5-3	37,0	
W60KP4-1	36,5	36,8
W60KP4-2	36,9	
W60KP4-3	37,0	
W60PO4-1	37,5	37,1
W60PO4-2	35,1	
W60PO4-3	38,7	
W60ÇL20-1	32,6	32,2
W60ÇL20-2	31,9	
W60ÇL20-3	31,9	
W60ÇL35-1	40,0	40,6
W60ÇL35-2	38,7	
W60ÇL35-3	43,0	

Çizelge A.2 : Yalın ve lifli betonların elastisite modülü değerleri

Numune Kodu	Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama
W60S0-1	29,1	37,1
W60S0-2	27,5	
W60S0-3	27,5	
W60B12.5-1	30,6	34,8
W60B12.5-2	27,3	
W60B12.5-3	26,5	
W60KP4-1	26,1	36,8
W60KP4-2	27,6	
W60KP4-3	25,1	
W60PO4-1	27,1	37,1
W60PO4-2	38,5	
W60PO4-3	29,6	
W60ÇL20-1	29,5	32,2
W60ÇL20-2	26,7	
W60ÇL20-3	26,0	
W60ÇL35-1	32,1	40,6
W60ÇL35-2	30,6	
W60ÇL35-3	29,6	

Ek B: Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar ve Grafikler**Çizelge B.1 : Yalın ve lifli betonların kırılma enerjisi değerleri**

Karışım Kodu	Kırılma Enerjisi (J/m²)	Ortalama (J/m²)
W60S0-1	151	140
W60S0-2	133	
W60S0-3	167	
W60S0-4	118	
W60S0-5	131	
W60B12.5-1	163	142
W60B12.5-2	137	
W60B12.5-3	133	
W60B12.5-4	135	
W60B12.5-5	142	
W60B12.5-6	140	
W60KP4-1	734	663
W60KP4-2	567	
W60KP4-3	704	
W60KP4-4	587	
W60KP4-5	724	
W60PO4-1	688	676
W60PO4-2	627	
W60PO4-3	766	
W60PO4-4	679	
W60PO4-5	622	
W60ÇL20-1	992	1109
W60ÇL20-2	1163	
W60ÇL20-3	1055	
W60ÇL20-4	1224	
W60ÇL35-1	1706	1466
W60ÇL35-2	1207	
W60ÇL35-3	1314	
W60ÇL35-4	1385	
W60ÇL35-5	1717	

Çizelge B.2 : Yalın ve lifli eğilme dayanımı değerleri

Karışım Kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
W60S0-1	3,30	3,04
W60S0-2	3,15	
W60S0-3	3,14	
W60S0-4	2,89	
W60S0-5	2,73	
W60B12.5-1	3,36	3,33
W60B12.5-2	3,33	
W60B12.5-3	3,29	
W60B12.5-4	3,28	
W60B12.5-5	3,59	
W60B12.5-6	3,10	
W60KP4-1	3,36	3,30
W60KP4-2	3,04	
W60KP4-3	3,49	
W60KP4-4	3,09	
W60KP4-5	3,52	
W60PO4-1	3,45	3,55
W60PO4-2	3,65	
W60PO4-3	3,53	
W60PO4-4	3,59	
W60PO4-5	3,55	
W60ÇL20-1	3,03	3,15
W60ÇL20-2	3,35	
W60ÇL20-3	2,93	
W60ÇL20-4	3,29	
W60ÇL35-1	4,27	3,75
W60ÇL35-2	3,40	
W60ÇL35-3	3,82	
W60ÇL35-4	3,32	
W60ÇL35-5	3,95	

Çizelge B.3 : Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen KSD ve TSD' ye göre eşdeğer gerilme, dayanım sınıfı ve kalan eğilme dayanımı değerleri.

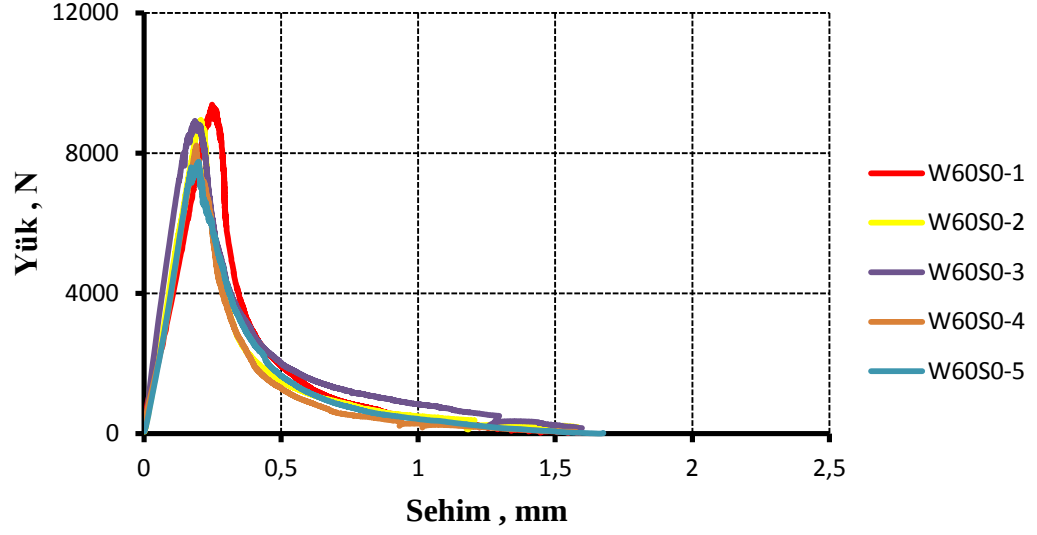
Karışım Kodu	Eşdeğer Gerilme (feş)		Kalan Dayanım (MPa)		Kalan Dayanım Sınıfı
	KSD	TSD	fr1 (ÇAAD=0,5mm)	fr2 (ÇAAD=3,5mm)	
W60S0-1	0,71	-	0,55	-	-
W60S0-2	0,64	-	0,48	-	
W60S0-3	0,79	-	0,68	-	
W60S0-4	0,58	-	0,42	-	
W60S0-5	0,65	-	0,49	-	
Ortalama	0,67	-	0,52	-	
W60B12.5-1	0,77	-	0,60	-	-
W60B12.5-2	0,69	-	0,47	-	
W60B12.5-3	0,74	-	0,52	-	
W60B12.5-4	0,81	-	0,62	-	
W60B12.5-5	0,71	-	0,30	-	
W60B12.5-6	0,68	-	0,47	-	
Ortalama	0,72	-	0,50	-	
W60KP4-1	1,13	1,05	1,51	1,54	FL 1,10/0,96
W60KP4-2	0,93	0,80	1,10	1,14	
W60KP4-3	1,19	1,02	1,43	1,46	
W60KP4-4	1,05	0,86	1,30	1,20	
W60KP4-5	1,19	1,05	1,55	1,51	
Ortalama	1,10	0,96	1,38	1,37	
W60PO4-1	1,11	1,01	1,44	1,46	FL 1,18/0,98
W60PO4-2	1,15	0,95	1,43	1,26	
W60PO4-3	1,19	1,11	1,51	1,62	
W60PO4-4	1,18	0,96	1,40	1,26	
W60PO4-5	1,21	0,90	1,38	1,13	
Ortalama	1,18	0,98	1,43	1,35	
W60ÇL20-1	1,32	1,42	1,95	2,13	FL 1,49/1,56
W60ÇL20-2	1,62	1,65	2,41	2,34	
W60ÇL20-3	1,37	1,50	2,18	2,24	
W60ÇL20-4	1,64	1,68	2,63	2,35	
Ortalama	1,49	1,56	2,29	2,27	
W60ÇL35-1	2,07	2,49	3,72	3,56	FL 1,92/2,27
W60ÇL35-2	1,75	1,96	2,75	3,03	
W60ÇL35-3	1,89	2,32	3,17	3,60	
W60ÇL35-4	1,82	1,94	3,01	2,64	
W60ÇL35-6	2,05	2,66	3,66	3,37	
Ortalama	1,92	2,27	3,26	3,24	

Çizelge B.4 : Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen çatlak ağzı açılma deplasmanlarına göre kırılma enerjisi değerleri

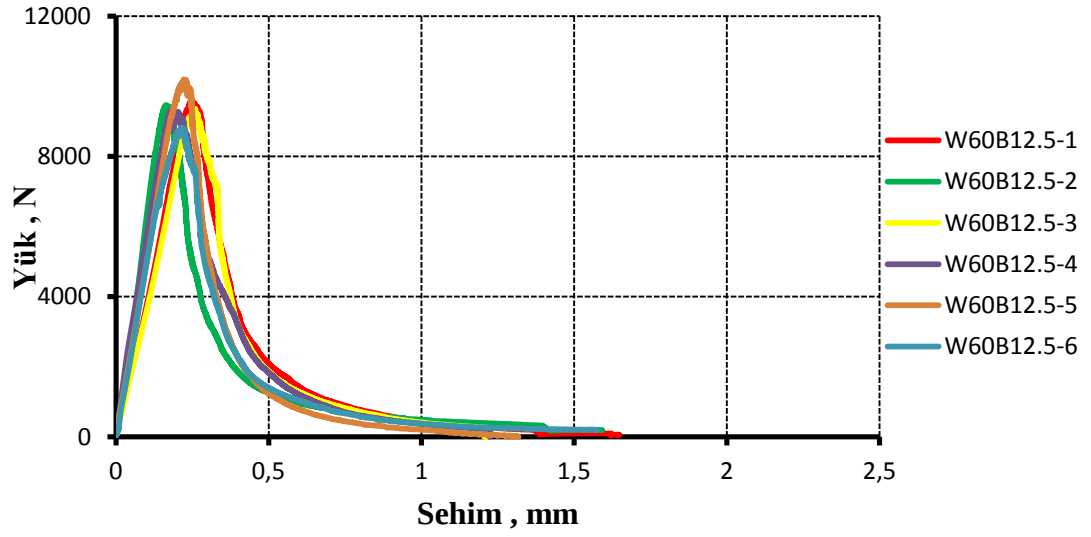
Karışım Kodu	Kırılma Enerjisi (Joule/m ²)				
	Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı , mm				
	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
W60S0-1	70	126	151	-	-
W60S0-2	53	107	133	-	-
W60S0-3	53	125	167	-	-
W60S0-4	49	99	118	-	-
W60S0-5	47	108	131	-	-
Ortalama	54	113	134	-	-
W60B12.5-1	67	137	163	-	-
W60B12.5-2	51	110	137	-	-
W60B12.5-3	72	133	-	-	-
W60B12.5-4	58	135	-	-	-
W60B12.5-5	69	126	142	-	-
W60B12.5-6	54	117	140	-	-
Ortalama	62	126	146	-	-
W60KP4-1	61	157	345	540	734
W60KP4-2	56	136	270	420	567
W60KP4-3	70	175	346	524	704
W60KP4-4	54	148	291	438	587
W60KP4-5	75	175	351	535	724
Ortalama	63	158	321	491	663
W60PO4-1	64	153	332	508	688
W60PO4-2	62	152	312	470	627
W60PO4-3	55	153	351	559	766
W60PO4-4	91	192	358	522	679
W60PO4-5	69	180	335	484	622
Ortalama	68	166	338	509	676
W60ÇL20-1	59	189	447	721	992
W60ÇL20-2	56	227	552	866	1163
W60ÇL20-3	58	203	489	773	1055
W60ÇL20-4	73	266	605	924	1224
Ortalama	62	221	523	821	1109
W60ÇL35-1	58	281	785	1272	1706
W60ÇL35-2	58	264	558	822	1207
W60ÇL35-3	55	216	574	951	1314
W60ÇL35-4	51	241	649	1044	1385
W60ÇL35-5	61	301	793	1273	1717
Ortalama	57	260	672	1072	1466

Çizelge B.5 : Üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen çatlak ağzı açılma deplasmanlarına göre kalan ve net eğilme dayanımı değerleri

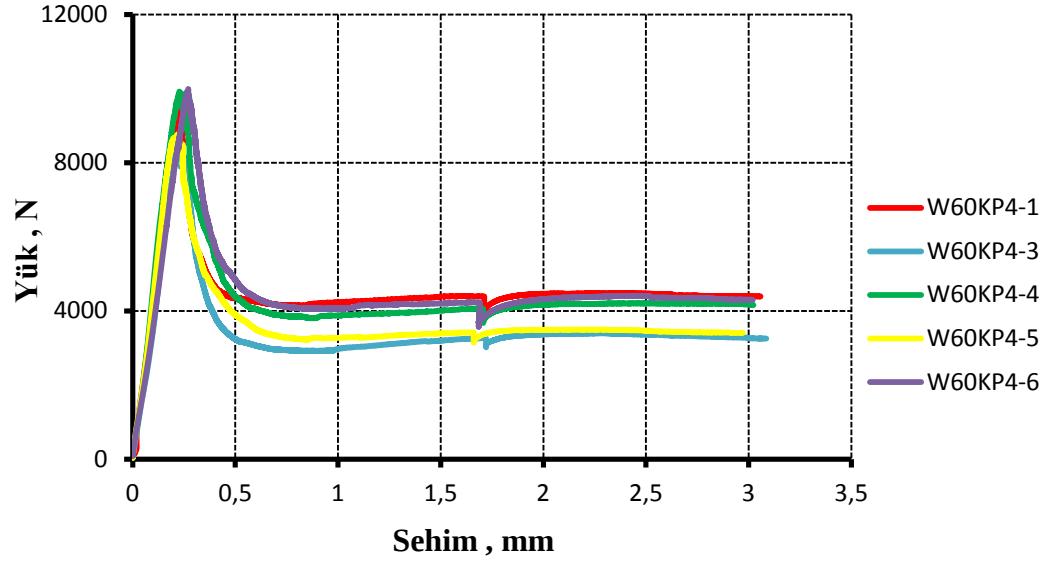
Karışım Kodu	Kalan Eğilme Dayanımı (MPa)					Net Eğilme Dayanımı (MPa)
	Çatlak Ağız Açılma Deplasmanı , mm					
	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5	
W60S0-1	3,30	0,55	0,07	-	-	3,3
W60S0-2	3,15	0,48	0,09	-	-	3,15
W60S0-3	3,14	0,68	0,09	-	-	3,14
W60S0-4	2,89	0,42	0,06	-	-	2,89
W60S0-5	2,73	0,49	0,05	-	-	2,73
Ortalama	3,04	0,52	0,07	-	-	3,04
W60B12.5-1	3,36	0,60	0,08	-	-	3,36
W60B12.5-2	3,33	0,47	0,13	-	-	3,33
W60B12.5-3	3,29	0,52	-	-	-	3,29
W60B12.5-4	3,28	0,62	-	-	-	3,28
W60B12.5-5	3,59	0,30	0,02	-	-	3,59
W60B12.5-6	3,07	0,47	0,09	-	-	3,10
Ortalama	3,32	0,50	0,08	-	-	3,33
W60KP4-1	3,33	1,51	1,53	1,57	1,54	3,36
W60KP4-2	3,04	1,10	1,12	1,19	1,14	3,04
W60KP4-3	3,49	1,43	1,40	1,47	1,46	3,49
W60KP4-4	3,07	1,30	1,18	1,23	1,20	3,09
W60KP4-5	3,52	1,55	1,47	1,54	1,51	3,52
Ortalama	3,29	1,38	1,34	1,40	1,37	3,30
W60PO4-1	3,45	1,44	1,48	1,48	1,46	3,45
W60PO4-2	3,65	1,43	1,33	1,31	1,26	3,65
W60PO4-3	3,53	1,51	1,64	1,67	1,62	3,53
W60PO4-4	3,59	1,40	1,36	1,33	1,26	3,59
W60PO4-5	3,55	1,38	1,25	1,22	1,13	3,55
Ortalama	3,55	1,43	1,41	1,40	1,35	3,55
W60ÇL20-1	3,01	1,95	2,20	2,23	2,13	3,03
W60ÇL20-2	3,35	2,41	2,55	2,54	2,34	3,35
W60ÇL20-3	2,93	2,18	2,40	2,35	2,24	2,93
W60ÇL20-4	3,13	2,63	2,67	2,57	2,35	3,29
Ortalama	3,11	2,29	2,46	2,42	2,27	3,15
W60ÇL35-1	3,33	3,72	4,25	3,91	3,56	4,27
W60ÇL35-2	3,27	2,75	3,31	3,34	3,03	3,39
W60ÇL35-3	3,34	3,17	3,65	3,80	3,60	3,82
W60ÇL35-4	3,27	3,01	3,21	2,98	2,64	3,32
W60ÇL35-5	3,26	3,66	3,94	3,62	3,37	3,95
Ortalama	3,29	3,26	3,67	3,53	3,24	3,75



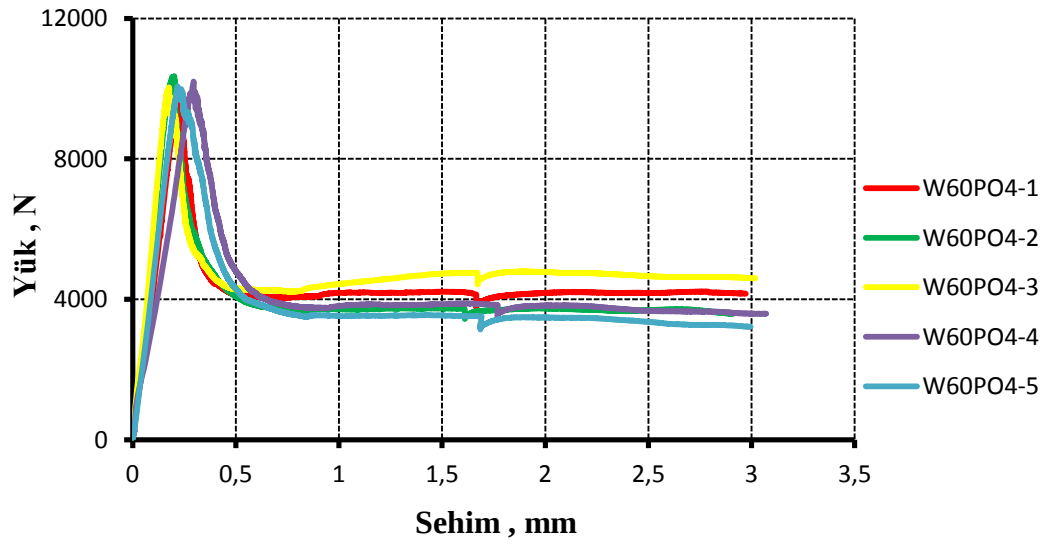
Şekil B.1 : Yalın beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.



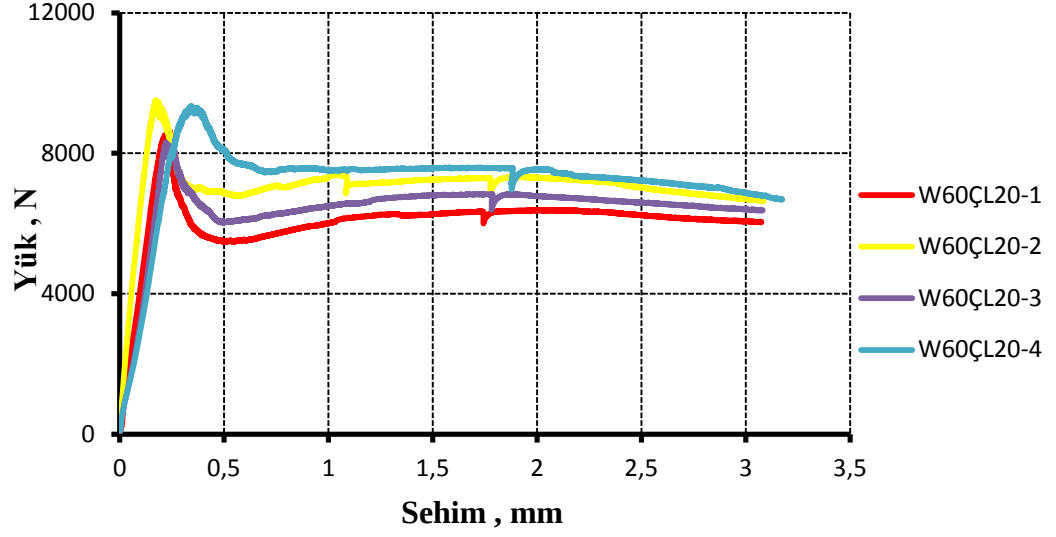
Şekil B.2 : Bazalt lifli beton numunelere ait yük-sehim grafikleri



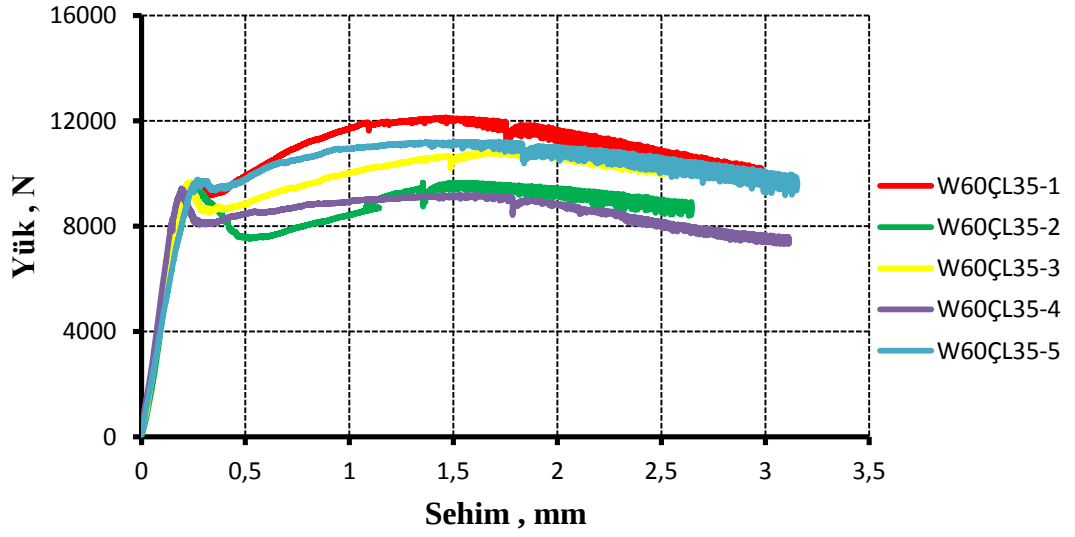
Şekil B.3 : PP/PE kopolimer lifli beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.



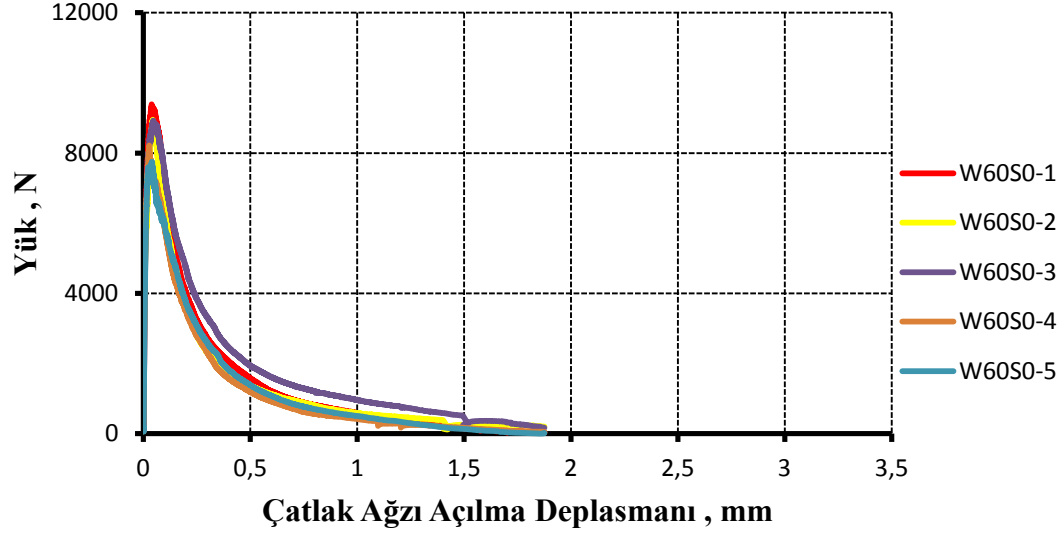
Şekil B.4 : Poliolefin lifli beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.



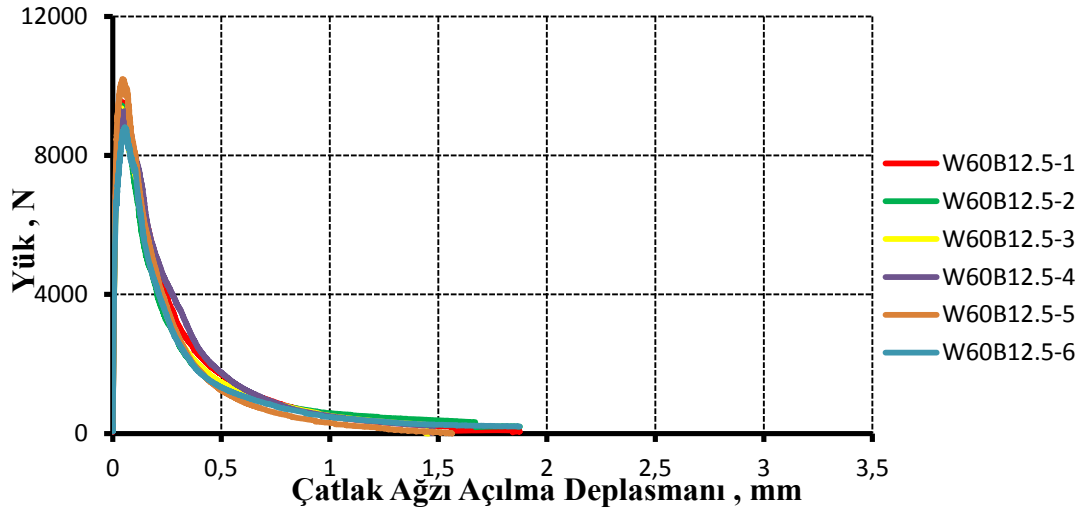
Şekil B.5 : 20kg/m³ çelik lifli beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.



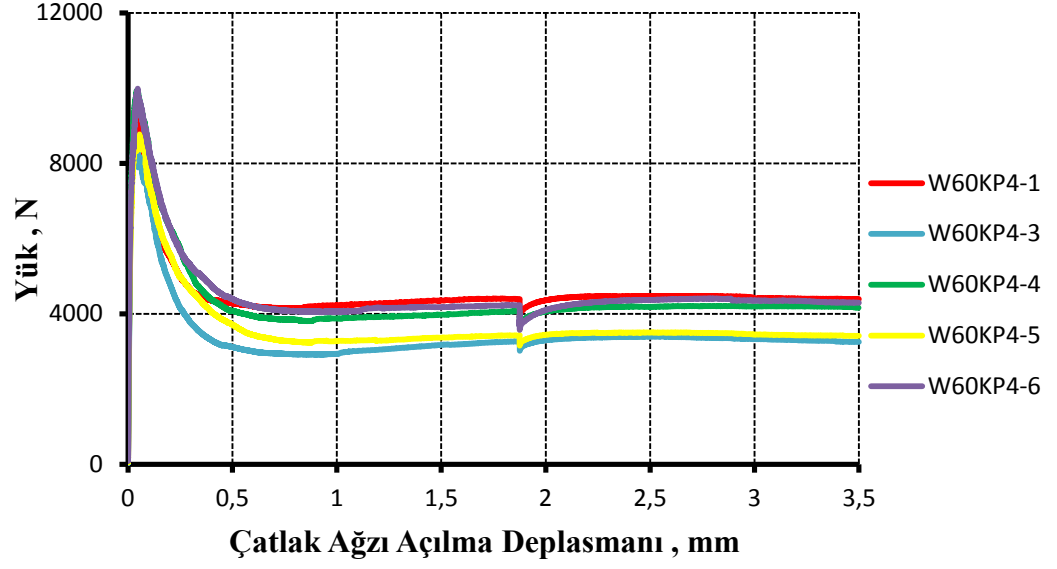
Şekil B.6: 35kg/m³ çelik lifli beton numunelere ait yük-sehim grafikleri.



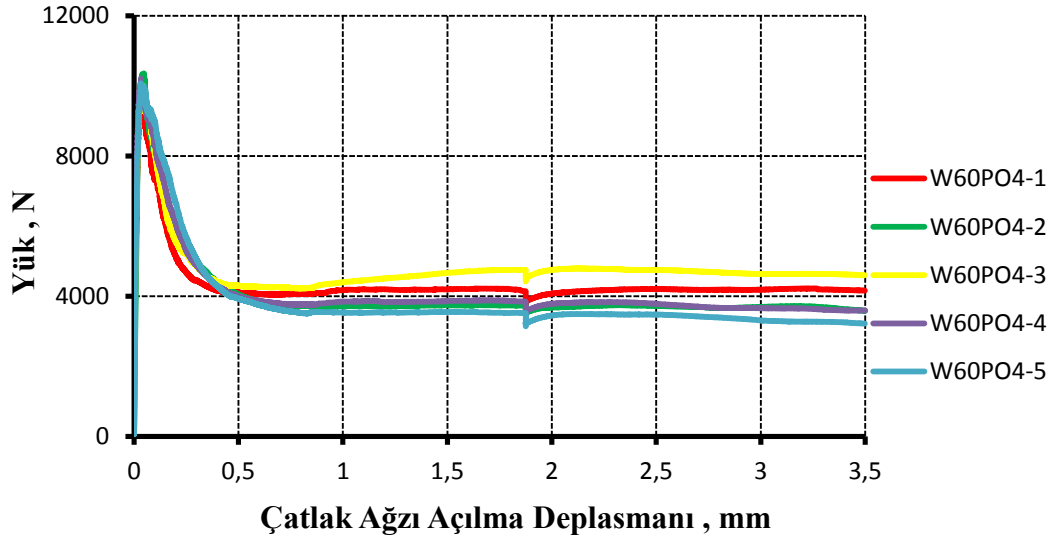
Şekil B.7 : Yalın beton numunelere ait yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



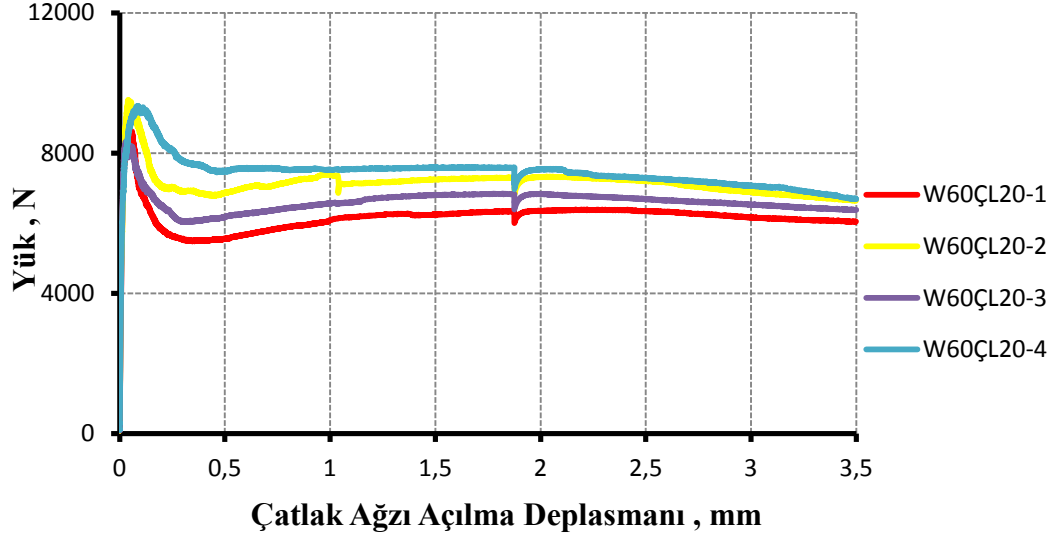
Şekil B.8 : Bazalt lifli beton numunelere ait yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



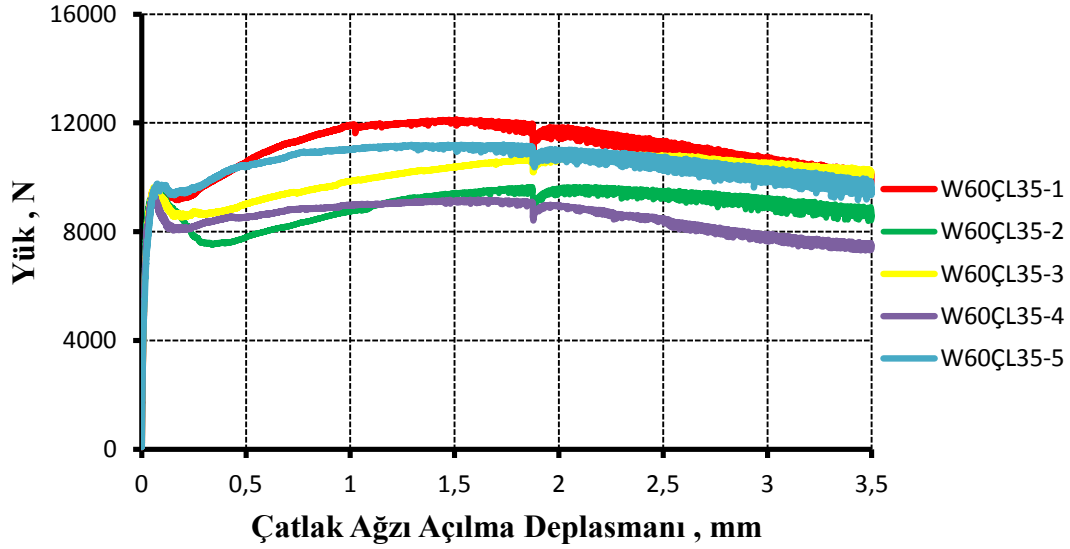
Şekil B.9 : PP/PE kopolimer lifli beton numunelere ait yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



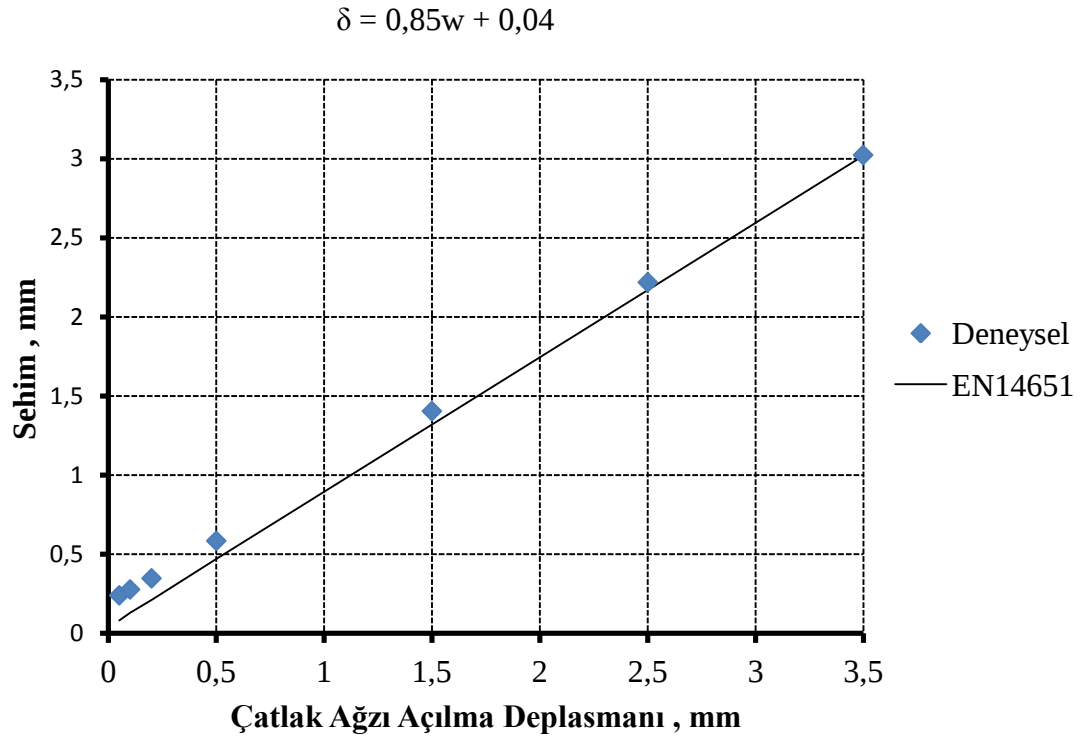
Şekil B.10: Poliolefin lifli beton numunelere ait yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



Şekil B.11 : 20kg/m³ çelik lifli beton numunelere ait yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



Şekil B.12 : 35kg/m³ çelik lifli beton numunelere ait yük-çatlak ağız açılma deplasmanı grafikleri.



Şekil B.13 : Sehim – çatlak ağız açılma deplasmanı korelasyonu ve grafiği

Ek C: Yarma Çekme Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar

Çizelge C.1 : Yalın ve lifli betonlara ait yarma çekme dayanımı değerleri

Numune Kodu	Yarma-Çekme Dayanımı(MPa)	Ortalama
W60S0-1	3,20	
W60S0-2	3,35	
W60S0-3	3,01	
W60S0-4	3,25	
W60S0-5	2,47	
W60S0-6	3,18	3,08
W60B12.5-1	3,47	
W60B12.5-2	2,64	
W60B12.5-3	3,24	
W60B12.5-4	3,41	
W60B12.5-5	3,02	
W60B12.5-6	3,09	3,14
W60KP4-1	2,64	
W60KP4-2	2,39	
W60KP4-3	3,25	
W60KP4-4	3,29	
W60KP4-5	2,89	
W60KP4-6	3,01	2,91
W60PO4-1	3,48	
W60PO4-2	3,35	
W60PO4-3	2,56	
W60PO4-4	2,92	
W60PO4-5	3,09	
W60PO4-6	2,64	3,01
W60ÇL20-1	2,69	
W60ÇL20-2	2,64	
W60ÇL20-3	2,75	
W60ÇL20-4	2,84	
W60ÇL20-5	3,01	
W60ÇL20-6	2,98	2,82
W60ÇL35-1	3,47	
W60ÇL35-2	3,76	
W60ÇL35-3	3,79	
W60ÇL35-4	3,56	
W60ÇL35-5	3,49	
W60ÇL35-6	3,66	3,62

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mertcan SARI

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul/1988

E-posta: emertcansari@gmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi (2010)

