

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK ÇELİK LİFLERİN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Deniz HAMZAÇEBİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK ÇELİK LİFLERİN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Deniz HAMZAÇEBİ
(501101016)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **501101016** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Deniz HAMZAÇEBİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ATIK ÇELİK LİFLERİN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Abdurrahman GÜNER
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle çalışmalarım boyunca engin bilgi ve tecrübesi ile bana her konuda yardımcı olan ve teşvik eden çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Deneysel çalışmalarım süresince sabır ve hoşgörüsüyle değerli vaktini ayırıp bilgi ve becerisini paylaşan İnş. Yük. Müh. Cengiz ŞENGÜL'e,

Yardım ve katkılarından dolayı İnş. Yük. Müh. Koray Mehmet ARSLAN'a, Murat MEYDAN'a ve Oktay YALÇINKAYA'ya ve tüm İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına,

Çalışmalarımda bana her konuda destek olan arkadaşlarım Binnur SOYSAL TÜMER'e, Selim EMEKLİ'ye ve Uğur ALPARSLAN'a,

Ve elbette varlıklarıyla yaşamımı güzelleştiren ve kendimi şanslı hissettiren Aileme sonsuz teşekkürler ediyorum.

Aralık 2014

Deniz HAMZAÇEBİ
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Çelik Lif Katkılı Betonların Kullanım Alanları	3
2.2 Atık Araç Lastiklerinin Bileşenleri ve Çelik Liflerin Elde Edilmesi	5
2.3 Çelik Lif Katkılı Betonlar	11
2.3.1 Betonda kullanılan çelik lifler	11
2.3.2 Çelik lifli betonların mekanik davranışı.....	14
2.3.2.1 Basınç dayanımı	15
2.3.2.2 Yarmada çekme dayanımı	17
2.3.2.3 Kırılma enerjisi.....	18
2.3.2.4 Eğilme dayanımı	19
2.4 Daha Önce Yapılan Çalışmalar	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	25
3.1 Kullanılan Malzemeler	25
3.1.1 Çimento	25
3.1.2 Su	25
3.1.3 Agrega	25
3.1.4 Atık çelik lif	27
3.1.5 Katkı	31
3.2 Deney Numunelerinin Özellikleri ve Üretimi	32
3.2.1 Beton bileşimleri	32
3.2.2 Numunelerin üretimi	35
3.3 Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler	36
3.3.1 Taze beton deneyleri	36
3.3.1.1 Birim kütle deneyi.....	36
3.3.1.2 Çökme deneyi.....	36
3.3.2 Sertleşmiş beton deneyleri	37
3.3.2.1 Eğilme dayanımı deneyi.....	37
3.3.2.2 Basınç dayanımı deneyi	39
3.3.2.3 Yarmada çekme dayanımı deneyi	39
4. DENEY SONUÇLARI.....	41
4.1 Taze Beton Deneyleri	41
4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri	41
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	43
5.1 Taze Beton Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	43

5.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi	45
5.2.1 Eğilme deneyleri	45
5.2.1.1 Yük sehim eğrileri ve ilk çatlak yükü	45
5.2.1.2 Kırılma enerjisi	50
5.2.1.3 Eğilme dayanımı	51
5.2.2 Basınç dayanımı deneyi	52
5.2.3 Yarmada çekme dayanımı deneyi	54
6. SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	90

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ÇAAD	: Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı
ÇAADO	: Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı Ölçer
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton
EN	: European Standard
EU	: European Union
JSCE	: Japan Society of Civil Engineers
RILEM	: The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux)
SFRC	: Steel Fibre Reinforced Concrete
TS	: Türk Standartları
USA	: United States of America
WSFRC	: Waste Steel Fibre Reinforced Concrete

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Binek ve kamyon lastiklerinin bileşimi ve ağırlıkları	6
Çizelge 2.2 : TS 10153'e göre çelik tel sınıfları ve tipleri.....	12
Çizelge 2.3 : Syaidathul Athira ve diğ. elde ettikleri deney sonuçları	23
Çizelge 3.1 : Agregaların tane yoğunluk deneyi sonuçları.....	25
Çizelge 3.2 : Agregaların tane büyüklüğü deneyi sonuçları.....	26
Çizelge 3.3 : Numunelerde kullanılacak agrega karışım oranları.....	26
Çizelge 3.4 : Deneyde kullanılan C türü atık çelik liflerin ortalama çapları	29
Çizelge 3.5 : Deneyde kullanılan atık çelik liflerin özellikleri	30
Çizelge 3.6 : Üretilen numunelerin kodları	33
Çizelge 3.7 : Üretilen betonların gerçek bileşimleri	34
Çizelge 4.1 : Numunelerin birim kütleleri ve çökmeleri	41
Çizelge 4.2 : Sertleşmiş beton deneyleri sonuçları	42

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Lastiğin şematik olarak gösterimi	6
Şekil 2.2 : Lastiğin üretim akış şeması	8
Şekil 2.3 : Hurda Çelikkord adlı çelik lifin alaşım elemanları bileşenler.....	9
Şekil 2.4 : Geri dönüşüm ürünleri: (a) araç lastiği, (b) araç lastiği balya, (c) mekanik ayrışım sonucu balya, (d), (e), (f)'de atık çelik tel ürünler...	10
Şekil 2.5 : Farklı lif boyutlarının çatlak köprüleme etkisi	15
Şekil 2.6 : ÇTDB'un ve yalın betonun basınç dayanımları	16
Şekil 2.7 : Çelik tel içeriğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisine etkisi	16
Şekil 2.8 : Çelik tel narinliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisine etkisi	17
Şekil 2.9 : ÇTDB kirişler için tipik yük-sehim eğrisi.....	20
Şekil 3.1 : Granülometri Eğrisi (Karışım agregasının tane büyüklüğü dağılım eğrisi).....	27
Şekil 3.2 : Deneyde kullanılan atık çelik lifler	28
Şekil 3.3 : Deneyde kullanılan atık çelik liflerin boyluluk oranları	29
Şekil 3.4 : Atık çelik liflerin 50 mm boyda kesildikten sonraki resimleri.....	31
Şekil 3.5 : Beton üretimi sırasında topaklanan atık çelik lifler.....	35
Şekil 3.6 : Yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi.....	37
Şekil 3.7 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeneği	38
Şekil 5.1 : Numunelerin lif içeriği ve çökme miktarı grafiği	44
Şekil 5.2 : Numunelerin lif içeriği ve birim kütle grafiği	44
Şekil 5.3 : C türü lifli numunelerden elde edilen yük-sehim eğrileri	45
Şekil 5.4 : B türü lifli numunelerden elde edilen yük-sehim eğrileri	46
Şekil 5.5 : D türü lifli numunelerden elde edilen yük-sehim eğrileri	47
Şekil 5.6 : A, C10, D20 betonlarının yük-sehim eğrileri.....	47
Şekil 5.7 : A, B15, D40 betonlarının yük-sehim eğrileri.....	48
Şekil 5.8 : A, C30, D60 betonlarının yük-sehim eğrileri.....	48
Şekil 5.9 : Her üretimden alınan bir numuneye ait yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması	49
Şekil 5.10 : Numunelerin ortalama kırılma enerjisi grafiği.....	50
Şekil 5.11 : Numunelerin ortalama kırılma enerjisi-lif içeriği grafiği.....	50
Şekil 5.12 : Numunelerin ortalama eğilme dayanımı grafiği	51
Şekil 5.13 : Numunelerin ortalama eğilme dayanımı-lif içeriği grafiği	52
Şekil 5.14 : Numunelerin ortalama basınç dayanımı grafiği	53
Şekil 5.15 : Numunelerin ortalama basınç dayanımı-lif içeriği grafiği	53
Şekil 5.16 : Numunelerin ortalama yarmada çekme dayanımı grafiği	54
Şekil 5.17 : Numunelerin ortalama yarmada çekme dayanımı-lif içeriği grafiği	55

ATIK ÇELİK LİFLERİN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı atık araç lastiklerinden elde edilen çelik liflerin betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemektir. Bu kapsamda, bir tanesi lifsiz (yalın) olmak üzere atık çelik lif türü ve lif içerikleri değiştirilerek farklı karışımlar hazırlandı.

Çalışmada boylulukları 164, 81 ve 41 olan ve geometrileri farklı üç çeşit atık çelik lif kullanıldı. B türü liflerle lif içerikleri 5 kg/m³, 10 kg/m³, 15 kg/m³ olmak üzere 3 çeşit; C türü liflerle lif içerikleri 10 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³ ve 40 kg/m³ olmak üzere 4 çeşit; D türü liflerle ise lif içerikleri 20 kg/m³, 40 kg/m³ ve 60 kg/m³ olmak üzere 3 çeşit beton üretildi.

Çökme ve birim kütle deneyleri yapıldıktan sonra 100×100×500 mm boyutlarında kalıplara yerleştirildi ve vibrasyonla sıkıştırıldı. Üretilen tüm karışımlarda etkin su/çimento oranı 0.50, bağlayıcı içeriği 360 kg/m³ olarak sabit tutuldu. Tüm numuneler, 24 saat sonra kalıptan çıkartılarak 28 gün boyunca sürekli olarak 20°C±2°C’de kirece doymun su içerisinde bekletildi. 28. günde sudan çıkartılan numuneler deney gününe kadar laboratuvar şartlarında muhafaza edildi. Sertleşmiş beton deneyleri 56ncı günde yapıldı.

Kırılma enerjisinin ve eğilme dayanımının belirlenmesi için RILEM TC 50-FMC’nin önerisine göre çentikli kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapıldı. Eğilme deneyinden çıkan parçalar 100×100×100 mm boyutlarında kesilerek üzerlerinde basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapıldı.

İşlenebilirlik lif içeriğinin ve boyluluk oranının arttırılmasıyla azaldı. Kullanılan atık çelik liflerin betonun basınç dayanımına belirgin bir katkı sağlamadığı, ancak yarma dayanımını önemli düzeyde arttırdığı görüldü.

Lif içerikleri ve boyluluk oranları yük-sehim eğrilerinde çatlak sonrası şekil değiştirme davranışlarını etkiledi. Lifsiz beton numune çatlak sonrası gevrek bir davranış sergilerken, lifli numunelerde ise lif oranlarına bağlı olarak şekil değiştirme sertleşmesi gözlemlendi.

Her üç lif türünde de betonlarda lif içerikleri arttırıldıkça ilk çatlak yükü, tepe yükü ve ilk çatlak yüküne karşılık gelen sehim değeri arttı. Ayrıca artan lif içeriği ile birlikte ilk çatlak gerilmesindeki sehim değeri ile maksimum çatlak gerilmesindeki sehim değeri arasındaki fark büyüdü.

Atık çelik liflerin içerikleri ve boyluluk oranları arttırıldıkça üretilen betonların kırılma enerjileri sürekli bir artış gösterdi. Atık çelik lif içeriğinin arttırılması ve atık çelik liflerin boyluluğunun artması eğilme dayanımını belirgin bir şekilde arttırdı.

EFFECT OF WASTE FIBERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

SUMMARY

Steel Fibre Reinforced Concretes (SFRCs) are cementitious materials reinforced with short steel fibers. Randomly distributed steel fibers in the matrix act as crack arresters. The real advantage of using of fibers in concrete can be seen after matrix cracking. These types of materials are usefull if a large amount of energy absorption capacity is required to prevent failure. SFRCs can also be used when high tensile strength and reduced cracking are required, as well as the cases, when conventional reinforcement can not be placed because of the complex shape of the structural member. SFRC has a wide-range of applications such as; pavements and overlays, industrial floors, precast products, hydraulic and marine structures, repairing and retrofitting of reinforced concrete structures, tunnel linings and slope stabilization works.

There are many factors affecting the fracture energy of SFRC such as; fibre length, fibre diameter, fibre content, fibre orientation of fibers in matrix and matrix properties. Investigations on mechanical properties of SFRC indicate that an increase in the aspect ratio also increases the fracture energy.

Every year more than 10 millions tons of waste tires are produced in the world and this amount is increasing rapidly. This number is 200 thousands tons for Turkey. The natural decomposition of the waste tires in the environment takes a very long time and these waste tires are a big threat for human health and the environment. Besides, regal regulations for waste tires in Turkey, EU and USA prohibit or limit the landfilling of these waste tires.

Tires are 100% recyclable: the rubber, metals and textiles can all be recovered and used in many applications, as well as in consumer and industrial products and numerous examples are published in the literature. Numerous uses of scrap tires have been introduced, including use in landfills, fuel and energy recovery, septic drain fields, subgrade fill, various rubber and plastic products and asphalt binder. One of the possible areas of application is the realization of concrete elements, in particular the use of the steel contained in a tire as discontinuous reinforcing fibre in the concrete matrix.

In this study, the influence of the aspect ratio and the content of steel fibers procured from waste tires on the mechanical properties of Waste Steel Fibre Reinforced Concretes (WSFRCs) under bending, compression and splitting forces was investigated.

This study is divided into 6 parts. In the first chapter, waste steel fiber reinforced concretes are introduced and the purpose of the study is given. Secondly, the literature survey on the steel-fiber reinforced concrete, mechanical properties and steel fibers from waste tires are presented. In the third and fourth sections, the experimental study and results are presented, respectively. In the last section, conclusion and recommendations were given.

A total of 11 mixtures (i.e. 10 WSFRCs and one plain concrete mixture) were cast for WSFRCs investigation. In all mixtures, water/cement ratio and cement content were kept constant at 0,5 and 360 kg/m³, respectively. Cement used was ordinary Portland cement with a density 3,12 Mg/m³. For the mixtures with the amount of high range water reducing admixture 1,33% by weight of cement.

Sand (0-4 mm) and crushed sand (0-4 mm) were used as a fine aggregates; and crushed stone I (4-16 mm) and crushed stone II (16-31,5 mm) were used as a coarse aggregates. The maximum particle size of aggregate was 32 mm. Densities of fine aggregates are 2,65 g/cm³ and 2,76 g/cm³ whereas densities of coarse aggregates 2,74 g/cm³ and 2,73 g/cm³. The amount of aggregates were selected as 17%, 33%, 20% and 30% for sand, crushed sand, crushed stone I and crushed stone II.

Three kinds of steel fibers were used: B, C, D, with aspect ratios of $(L/d)_B = 164$, $(L/d)_C = 81$, $(L/d)_D = 41$. The waste steel fibre contents (V_f) were 5 kg/m³, 10 kg/m³, 15 kg/m³ for B, 10 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³ for C, 20 kg/m³, 40 kg/m³, 60 kg/m³ for D.

After mixing, each concrete was cast into 100×100×500 mm prismatic molds, demolded approximately 24 hours after molding, and were cured in 20 °C ± 2 °C lime saturated water for 28 days. The specimens were removed from the curing tank at the age of 28 days and kept laboratory conditions until testing. Hardened concrete experiments were carried out on the 56-day samples.

To measure the G_F of WSFRCs for a notched beam under three-point bending, the procedures recommended by RILEM TC 50-FMC were followed. At least three beams of 500 mm length and 100×100 mm cross section were tested. The effective cross section, was reduced to 83×100 mm. The load-deflection curves were used to evaluate the fracture energy. The area under the load versus deflection at mid span curve (W_0) was taken as a measure of the fracture energy of the material. The results obtained here were based on the area under the complete load-deflection curve up to a specified deflection. The cut-off point was chosen as 4 mm deflection. Thus the specific fracture energy and net bending strength were obtained using the beam specimens.

The specimens were tested for their flexural strength. The tested specimens were later cut into 100x100x100 mm pieces, to be tested for compressive and splitting tensile strengths.

The test results revealed that the fiber volume fraction and the fiber aspect ratio had unfavourable effect on the workability of the concretes, whereas they had no significant effect on the compressive strengths.

It was clearly seen that as the waste steel fiber volume fraction increases, the toughness and the first crack loads of WSFRCs increase. For aspect ratio of 164, the fracture energies of WSFRCs, of fibre content 5 kg/m³, 10 kg/m³ and 15 kg/m³ were determined as 463 J/m², 630 J/m² and 1132 J/m², respectively. Similarly, for aspect ratio of 81, the fracture energies of WSFRCs; for fibre contents 10 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³ and 40 kg/m³ are determined as 562 J/m², 932 J/m², 1375 J/m² and 1856 J/m², respectively. And for aspect ratio of 41, the fracture energies of WSFRCs, of fibre content 20 kg/m³, 40 kg/m³ and 60 kg/m³ are determined as 514 J/m², 1151 J/m² and 1394 J/m².

The net bending strength, splitting tensile strength and especially fracture energy and ductility of waste steel fiber reinforced concretes were significantly enhanced compared to those of plain concrete.

The results obtained confirm the promising application of concrete reinforced with WSFRC; however, further research work is still necessary, extending also the investigations to medium and full-scale structural elements, representative of possible practical situations. Finally, theoretical models are needed to furnish reliable design guidelines for concrete reinforced with steel fibers recycled from waste tires (WSFRC).

Waste steel fibers, because of their various productions processes, are having different diameters, aspect ratios, geometries. Profound investigations are required to be conducted on waste steel fibers characteristic properties. These investigations must be done by collaboration between both civil engineering and recycling technology researchers. As the result of these researches, lowering costs, promoting the industrial sector to recycle the waste materials will provide serious contributions to more protection of the environment.

1. GİRİŞ

Beton günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesi olma özelliğini korumaktadır. Betonun ekonomik ve dayanımlı olması yanında uzun süreli performansa sahip olması için özellikle dayanım, rijitlik, tokluk ve süneklik gibi parametrelerin geliştirilmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir.

Gevrek bir malzeme olan beton genel olarak yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı, çatlak oluşuktan sonraki yük taşıma dayanımı ve enerji yutma kapasitesi açısından zayıftır [1, 2].

Özellikle dinamik yükler çekme dayanımı düşük betonda çatlak oluşumuna ve bu çatlakların kolaylıkla yayılmasına neden olur. Yüksek basınç dayanımına sahip yüksek performanslı betonların da sakıncası gevrek bir yapıya sahip olmalarıdır. Betonun sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini arttırmak için kullanılabilecek yöntemlerden bir tanesi betona lif eklenmesidir [3].

Çeşitli malzemelerin liflerle donatılarak çeşitli özelliklerini iyileştirmeye yönelik ilk uygulamaların çok eskilere dayandığı bilinmektedir. Kerpiğin bitkisel elyaf ve samanla karıştırılarak kullanılması yaklaşık 4500 yıl öncedir.

20. yüzyılın son çeyreğinde lifli betonlar üzerinde birçok çalışma yapılmış ve bu konuda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Öncü çalışmalar 1963 yıllarında betonda cam lifi kullanımıdır. Daha sonraki çalışmalarda ise farklı lif tiplerinin ve içeriklerinin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağılı bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımını arttırdığı görülmüştür [4].

Çelik tel donatılı betonların normal betonlara oranla sağladıkları üstünlüklerden dolayı kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Bu betonlar yaygın olarak beton yollar ve yol üst yapıları, endüstriyel zemin betonları, su yapıları, püskürtme beton uygulamaları, şev stabilitesi, tünel kaplamaları, havaalanı kaplama betonları, liman zemin kaplamaları, stratejik yapıların depereme karşı güçlendirilmesi, betonarme yapıların güçlendirilmesi, prekast elemanlar, beton borular ile güvenlik yapılarında kullanılmaktadır. Liflerin beton karışımlarına eklenmesi çatlakları kısıtlayıcı bir etki yapar, bu lifler tek çeşit olarak kullanılabilecekleri gibi malzemenin değişik özelliklerini iyileştirebilmek açısından birkaç lif karıştırılarak da kullanılabilir, böyle üretilen betonlar karma lif takviyeli betonlar olarak isimlendirilebilir [5].

Çelik teller betonun mekanik özelliklerini belirgin biçimde arttırmakla birlikte maliyetini de arttırmaktadır. Artan maliyeti düşürmek ve betonun değişik alanlarda kullanma ihtiyacına yeni çözümler bulmak için beton teknolojisinde araştırma ve geliştirme faaliyetleri hız kazanmıştır. Bu gelişmeler, endüstriyel atıkların geri dönüşümünün teşvik edilmesine ve çevrenin korunmasına ciddi katkıda bulunmaktadır.

Sunulan bu çalışmanın temel amacı atık araç lastiklerinden elde edilen çelik tellerin kullanımının betonun mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesidir. Bu kapsamda atık araç lastiklerinden elde edilen çelik teller ayıklandı, boyut ve boyluluk oranlarına göre sınıflandırıldı ve betonda farklı oranlarda kullanılarak deney numuneleri üretildi. Sırasıyla çökme, birim kütle, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirildi ve sonuçlar yalın betonla karşılaştırılarak değerlendirildi.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Çelik Lif Katkılı Betonların Kullanım Alanları

Çelik lif içeren betonların sürekli artan kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir.

Püskürtme beton uygulamaları: Kazıların ve temellerin desteklenmesi, kanal kaplamaları, köprü mesnetlerinin korunması, bozulan deniz yapılarının ve köprülerin onarımı, bazı sığınakların kaplamaları gibi uygulama alanları vardır. Yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasından dolayı kaya ve toprak zeminlerin şev stabilizasyonu veya istinat duvarı yapımında da kullanılmaktadır [67].

Yol kaplamaları: Beton yol kaplamalarında ve geleneksel yolların temel döşemesinde yükleri alt temele aktaran bileşen olarak kullanılmaktadır. Genellikle yol temellerinde zayıf beton veya bitümlü malzeme kullanılır. Bu tür kaplamalar yüksek trafik yoğunluğu olan yerlerde büyük ölçüde yüzey düzensizliğine neden olurlar. Buna karşılık çelik teller, oluşan çekme gerilmelerinin bir kısmını taşır ve çatlak açılmasına karşı koyar. Ayrıca yüksek trafik yoğunluğuna sahip yollarda büyük önem taşıyan, kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı yüksek beton elde edilmesini sağlar. Bunun yanında, yol yapımında daha uzun derz aralıklarının uygulanmasına imkân verir. Yol kaplamalarında kullanılan ÇTDB'ların en belirgin üstünlüğü normal betonlara kıyasla daha yüksek sünekliğe sahip olmalarıdır. Ayrıca yüksek kırılma enerjileri ile bağlantı boyunca çatlakları ve yüzeylerin pullanma ile dökülmelerini büyük ölçüde azaltabilmekte ve önleyebilmektedir. Beton yollarda çelik tel kullanımı, geleneksel kaynaklı donatılı betonlara kıyasla daha ekonomiktir. Taşıma ve yerleştirme (işçilik dahil) maliyeti ÇTDB'lar da daha düşük olmaktadır. Ayrıca daha ince kaplama kalınlığına imkân vermesi ve donatının döşeme içerisine gelişigüzel yerleştirilmesi gibi sorunların olmaması da çelik tellerin diğer üstünlükleridir [6].

Beton yollar: Genellikle 50–60 mm uzunluğunda yüksek çekme dayanımı ve narinliğe sahip nervürlü çelik teller ile 20–25 mm uzunluğunda yüksek sünekliğe ve düşük çekme dayanımına sahip dalgalı teller kullanılmaktadır. Daha kısa tel kullanımı çatlak yayılması denetimi/sınırlandırması ve çekme dayanımı açısından uygun olmamaktadır [7].

Su ve deniz yapıları: Geleneksel betonlara kıyasla, yüksek sünekliği, aşınma ve darbeye karşı direnci, deniz ortamında bozunmaya karşı direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı su yapılarında kullanılmaktadır. Özellikle dalgakıran yapımında, dolu savak, savak yatağı ve savak kapakları, dinlendirme havuzu gibi su yapılarının tamir ve bakımında, açık kanal kaplamalarında, toprak dolgu barajların sızdırmazlığının iyileştirilmesi için yüzeylerinin ince kaplamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca aşınma direnci yüksek olduğundan kavitasyon hasarlarına karşı kaplama olarak kullanılabilir [8].

Zemin kaplamaları: Yük taşıma kapasitelerinin yüksek olması, çatlak kontrolü sağlaması, dinamik ve ânî/darbeli yüklemelere karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, ambar, hangar, iskele ve rıhtım zemin kaplamaları gibi kullanım alanları bulunmaktadır [67].

Prefabrike elemanların üretimi: Yüksek dayanıma, sünekliğe ve dayanıklılığa sahip birçok prefabrike yapı elemanın üretiminde kullanılmaktadır. Bunlar, muayene bacaları, yağ ayırıcıları, transformatör kabinleri, yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel segmanları, monoblok garajlar, demiryolu sınır taşları, su drenaj blokları, atık depolama kutuları, ev mahzenleri, kablo kanalları, yalıtılmış duvar panelleri, santral kabinleri, prekast banyo kabinleri, çatı elemanları, öngerilmeli çatı olukları, otobüs durakları, yiyecek kilerleri, tren tünellerindeki saklanma yerleri, baca elemanları, birleştirilmiş kanallar ve bakım yolu, demiryolu traversleri, demiryolu taban döşemesi, refrakter prekast elemanlar, istinat duvar elemanları, temel blokları, prekast banka kasaları ve kanaletlerdir [9].

Depreme dayanıklı stratejik yapılar: Sünekliğin yüksek olması istenen yapılarda da kullanılabilir. Çelik tel donatılı betonların sünekliği normal betonlara oranla yüksek olduğundan çarpma ve titreşim gibi dinamik yük etkilerine karşı daha dayanıklıdırlar. Bu nedenle depreme dayanıklı her türlü yapıda kullanılabilmektedir [67].

Kabuk yapılar: Kesit kalınlıklarının azaltılmasına imkân verdiğinden ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı sınırlı olan yapı elemanlarında kullanılmaktadır [10].

Güvenlik Yapılarında: Sığınaklar, sığınak kapıları ve güvenlik odalarının yapımında kullanılmaktadır. [67].

Karma lifli betonlara ait bazı uygulama alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir: i) hasarlı binaların güçlendirilmesi, ii) kesiti küçük taşıyıcı elemanların yapımı, iii) zımbalamaya karşı kolon başlarının güçlendirilmesi, iv) zararlı radyoaktif ve endüstriyel atıkların çatlaksız ve durabilitesi yüksek elemanlarda saklanması, v) sünek davranış gerektiren taşıyıcı yapı elemanları bileşim bölgeleri, vi) Prekast çatı kaplama elemanı yapımı, vii) çarpma ve aşınmaya karşı dayanım gerektiren bölgeler [11].

2.2 Atık Araç Lastiklerinin Bileşenleri ve Çelik Liflerin Elde Edilmesi

Dünyada her yıl 10 milyon tondan daha fazla Türkiye’de ise 200 bin ton atık lastik oluşmaktadır [12].

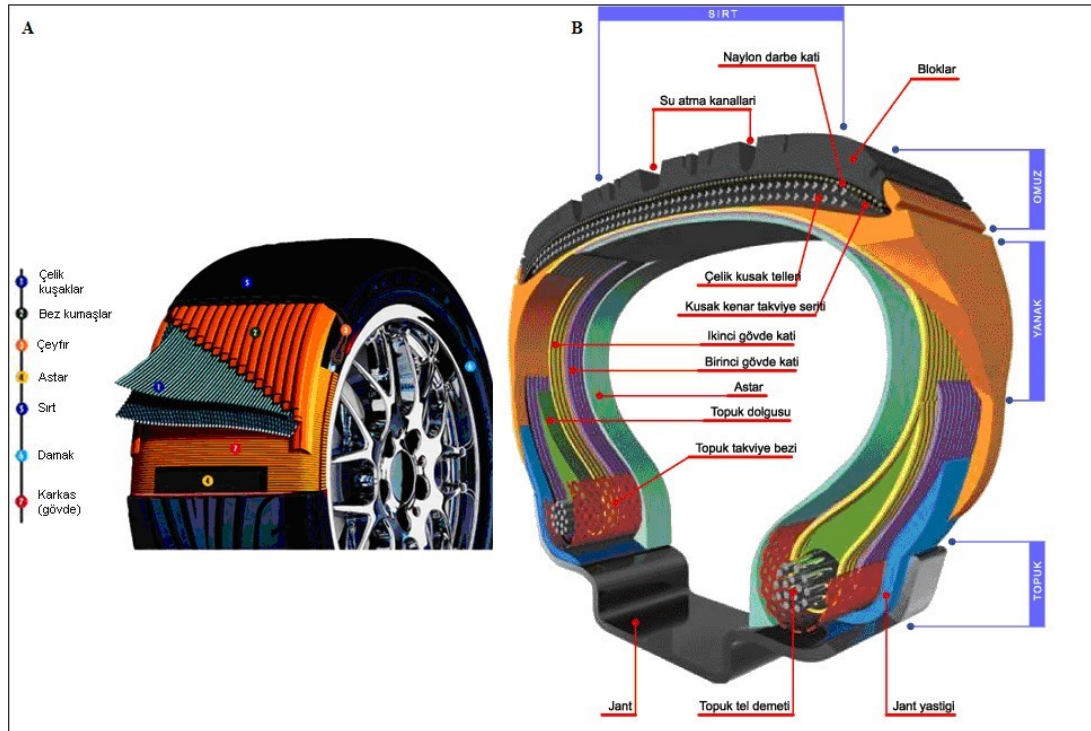
Büyük bir çoğunluğunu karayollarında kullanılan araçların oluşturduğu, atık lastiklerin doğada bozunması oldukça zordur ve bu lastiklerin çevreye verilmesi hem insan sağlığı hem de çevre için ciddi tehlikeler doğurmaktadır. Nitekim Türkiye ve gelişmiş diğer ülkeler de atık lastiklerin doğrudan çevreye verilmesini yasaklamakta ya da kısıtlamaktadır [69]. Bu sorunları ortadan kaldırmanın en etkin yollarından biri; atık lastiklerin yeniden işlenerek endüstride farklı uygulamalarda kullanılmasıdır.

Çelik inşaatta olduğu gibi otomotivde de yaygın olarak kullanılan değerli bir malzeme türüdür. Ortalama bir araç lastiği için kullanılan çelik miktarı ağırlığının %14- %15’i civarındadır. Çizelge 2.1’de üretimde kullanılan bileşenlerin ağırlıkça yüzdeleri verilmiştir [13].

Çizelge 2.1 : Binek ve kamyon lastiklerinin bileşimi ve ağırlıkları [13].

Bileşim (Ağır. %'si)		Binek lastiği	Kamyon lastiği
Doğal kauçuk		% 14	% 27
Sentetik kauçuk		% 27	% 14
Karbon siyahı		% 28	% 28
Çelik		%14 - 15	%14 -15
Kumaş, dolgu maddeleri, hızlandırıcılar, ozon parçalamasını (ozonolizi) engelleyici maddeler		16 -17%	%16 -17
Ortalama kütle	Yeni	11.35 kg	54.43 kg
	Hurda	9.10 kg	45.36 kg

Lastik sırt, omuz, yanak, topuk (damak) ve karkas (gövde) olarak adlandırılan 5 ana katmandan meydana gelmektedir. Çelik ve bez kuşaklar, ceyfir ve astar da lastiğin yapısında yer alan diğer alt katmanlardır ve temsili gösterimi Şekil 2.1'deki gibidir [12].



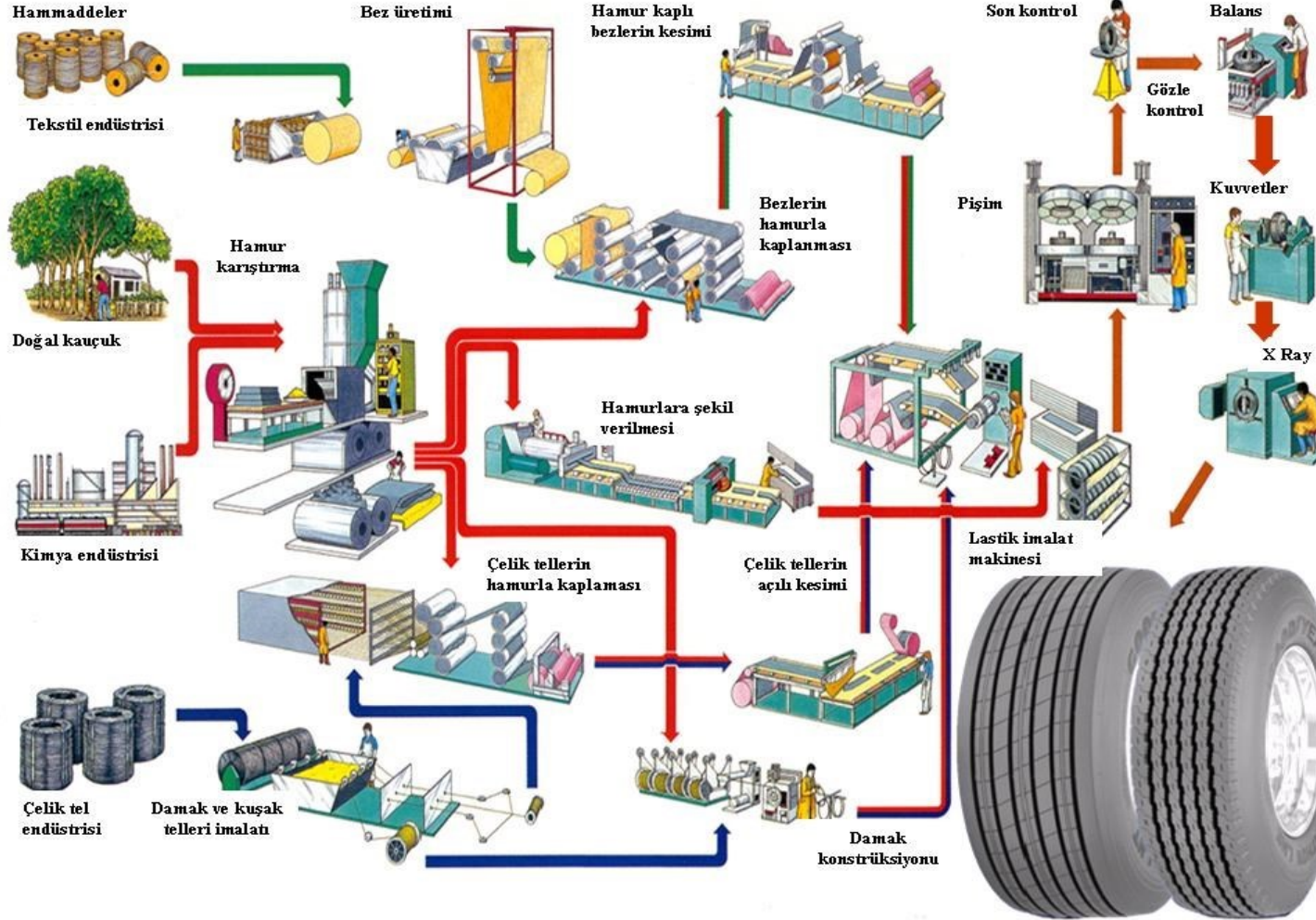
Şekil 2.1 : Lastiğin şematik olarak gösterimi [12].

Bu bileşenler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- Sırt: Lastiğin yer ile temas ettiği bölge,
- Omuz: Kalın kauçuktan yapılmış yanak ile sırtın birleştiği bölge,
- Yanak: Lastiğe esneklik sağlayan, lastiğin topuk ve omuz bölgesi arasında kalan ve üzerinde markaların ve tanıtıcı bilgilerin bulunduğu bölge,
- Topuk bölgesi: Lastiğin janta temas eden ve sıkıca bağlanmasını sağlayan bölge,
- Karkas: Polyester kord bezinden üretilen, lastiğin alt ucundaki bir damak telinden diğerine uzayan destek bölümü,
- Kuşaklar: Çelik ve bezden oluşan lastik sırt deseninin altında uzanan dar katmanlar,
- Ceyfir: Damak telinin dış kısmında yer alan, karkas yapının jant tarafından aşındırılmasını ve tahrip edilmesini engelleyen, jant ucu üzerinde gerekli olan esnekliği sağlayan bölge ,
- Astar: Hava sızdırmazlığını sağlayarak lastiğin içine sıkıştırılmış basınçlı havanın dışarı kaçmasını önleyen, lastiğin iç yüzeyindeki ince bir kauçuk katmanıdır [12].

Çelik teller lastiğin damak ve kuşak kısımlarında yer alır. Şekil 2.2’de de üretim sürecinin bir şeması verilmektedir [68].

Geri dönüşüm tesisleri piyasadan toplanan atık lastikler, öncelikle içerisindeki çelik şeritten ayrıştırılmak için bir bütün halinde konveyörler ile çelik ayrıştırma ünitesine gönderilir ve bu süreçte çeliğin %95’i ayrıştırılır. Geriye kalan çelik ise piroliz sonucu oluşan katı üründen manyetik ayırıcılar ile ayrıştırılır. [12].



Şekil 2.2 : Lastiğin üretim akış şeması [68].

Piroliz; eski lastiklerin yakıtı çevrimi için kullanılan metotlardan biridir. Teknik olarak, piroliz ısı ile organik kimyasal bağların kırılması prosesidir. Lastikler piroliz sonucu karbon siyahı, gaz, çelik ve yağa dönüşür ve daha sonra bunlar eritilir. Sıcaklık azaldığında, yağ geri kazanılan ilk yakıt olur. Hurda Lastik Yönetim Konseyi'ne göre (Scrap Tire Management Council) ortalama bir lastik 4 litre yağ, 3 kg karbon siyahı, 1.5 kg gaz ve 1 kg çelik ve kül üretir [14].

Lastik üretiminde kullanılan çeliğin St-52 gibi yüksek dayanımlı bir çelik olmasından dolayı çelik ayrıştırma ünitesinden elde edilen hurda çeliğin geri dönüşüm tesislerine maddi getirisi toplam gelirlerinin yaklaşık %5'i gibi yüksek bir orandır [12].

Bir araç lastiği üretilirken ortalama 4 kg çelik kullanılmaktadır ve bu miktarın tamamına yakını geridönüştürülebilmektedir. Türkiye'de yılda 200 bin ton atık lastik ortaya çıktığı düşünülürse azımsanmayacak bir miktarda ve daha uygun maliyetlerde betonda kullanılabilecek çelik lif elde edilebilir.

Şekil 2.3'te bir atık dönüşüm tesisinin ürünlerinde Hurda Çelikkord olarak adlandırdığı atık çelik lifin firma tarafından verilen özellikleri görülmektedir. Şekil 2.4'te de aynı geridönüşüm tesisinde atık lastikler ve ayrıştırılması sonucu elde edilen çelik tellerin fotoğrafları verilmektedir.

Element	İçerik %
Karbon	0,730
Silikon	0,220
Manganez	0,670
Fosfor	0,026
Nikel	0,023
Sülfür	0,018
Bakır	0,022
Molibden	0,002
Krom	0,024



Şekil 2.3 : Hurda Çelikkord adlı çelik lifin alaşım elemanları bileşenler [15].



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 2.4 : Geri dönüşüm ürünleri: (a) araç lastiği, (b) araç lastiği balya, (c) mekanik ayrışım sonucu balya, (d), (e), (f)'de atık çelik tel ürünler [15].

Bu deneysel çalışmada bir geri dönüşüm tesisinden elde edilen çelik liflerin betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmektedir.

2.3 Çelik Lif Katkılı Betonlar

Beton özelliklerini iyileştirmek amacıyla taze beton içerisine çeşitli yöntemlerle değişik miktarlarda katılan, belirli boy/çap (boyluluk) oranına sahip olan metalik, polimerik, mineral veya tabii yapıdaki malzemelere lif (fiber) denilir. Lifler çelik, plastik, cam gibi değişik malzemelerden farklı tip ve boyutlarda üretilmektedirler. ACI komitesi bir lifi tanımlayan en iyi nümerik parametrenin lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen “boy/çap” (aspect ratio) oranı olduğunu kabul eder. Bu orana kısaca “boyluluk oranı” da denilmektedir. Eşdeğer lif çapı ise; alanı lifin kesit alanına eşit bir dairenin çapı olarak tanımlanmaktadır. Lifi tanımlayan diğer etkenler ise lifin geometrik yapısı ve çekme dayanımıdır [16].

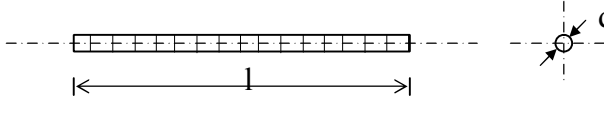
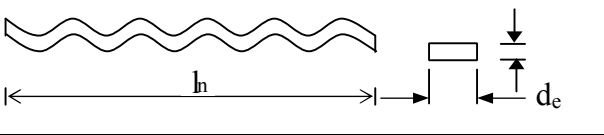
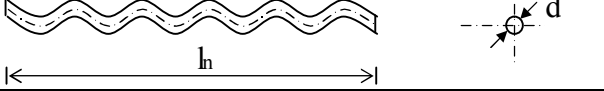
Betonun içinde rastgele ve üniform dağılı çelik teller çatlak oluşumunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Böylece, betonun şekil değiştirme kapasitesini, enerji yutma kapasitesini ve çarpma dayanımını arttırarak süneklik düzeyi yüksek betonlar elde edilebilmektedir [5].

2.3.1 Betonda kullanılan çelik lifler

Betonda kullanılan çelik lifler soğukta işlenmiş çeliklerden, çelik levhalardan veya diğer çeliklerden imal edilmektedirler. Betonda kullanılan çelik tellerin enkesitleri genellikle yuvarlaktır. [17]. Teller düz şekilli olabildiği gibi, beton içerisinden kolay sıyrılmasını önlemek maksadıyla kıvrımlı veya dalgalı biçimli ve pürüzlü yüzeyli de üretilmektedir. Tellerin uçları ise düz, kancalı ya da yassıdır [5]. Genellikle kullanılan çelik tellerin boyları 6,4 mm ile 76 mm arasında değişmektedir [3]. Çizelge 2.2’de TS 10153’e göre çelik tel sınıfları ve tipleri verilmektedir [18].

Yapılan çalışmalarda dairesel kesitli düz ve kancalı çelik tellerin betonun özellikleri üzerinde en etkin iyileştirmeyi yaptığı gözlenmiştir [19-22]. Beton karışımında kullanılan bu tür tellerin boyluluk oranları 20 ile 100 arasında ve katılma oranı ise hacimsel olarak %0,5 ile %2,5 arasında değişebilmektedir. Katılma oranı arttıkça çelik telin karışım içerisinde topaklandığı ve homojen bir dağılım göstermediği, hattâ basınç dayanımının normal betonun basınç dayanımına oranla düşük olduğu gözlenmiştir [23,24].

Çizelge 2.2 : TS 10153'e göre çelik tel sınıfları ve tipleri [18].

Çelik Lif Sınıfı	Çelik Lif Tipi	Çelik Lif Şekli
A sınıfı	Düz, pürüzsüz yüzeyli teller	
B sınıfı	Tip 1: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller	
Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller	Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller	
	Tip 3: Ay biçimi dalgalı teller	
C sınıfı	Tip 1: İki ucu kancalı teller	
Sonu kancalı teller	Tip 2: Tek ucu kancalı teller	

Yüksek oranda çelik tel kullanımı karışım içerisinde tellerin topaklaşmasına ve buna bağlı olarak matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına ve büyük hava boşluklarına neden olmaktadır. Bunun sonucunda çelik tellerin betonların özellikleri üzerindeki beklenen iyileştirmesi düşük seviyelerde kalabilmektedir. Taze beton içerisinde topaklanmayı önlemek ve işlenebilirliği istenen düzeyde ayarlayabilmek için kullanılan çelik tel miktarı ve narinliği için bir üst sınır koyulmasında yarar vardır. Yapılan çalışmalarda genellikle bu sınır değerler tel hacmi için %2 ve narinlik için 100 olarak belirtilmektedir [6]. Narinlik azalırsa çelik tel matris bağı kritik olmaktadır. Buna karşılık narinlik artarsa topaklanmaya ve homojen dağılımın elde edilememesine bağlı olarak karıştırma problemi artmaktadır [28]. Genel olarak yüksek tel narinliğinin betonlar üzerinde en önemli iyileştirmeler yapacağı beklense de tel narinliğinin, karıştırma, yerleştirme ve mastarlama işlemlerinde ortaya çıkan problemler nedeniyle sınırlandırılmasının gerekliliği ortaya konulmuştur [6, 29].

Ayrıca su azaltıcı katkılarla ÇTDB'ların işlenebilirliği iyileştirilebilmektedir. Karışımında ince agrega kullanılması çelik tel miktarının arttırılması ve işlenebilirliğin sağlanması için uygun bir çözüm olmaktadır [67].

Çelik tellerin karışımda homojen olarak dağıtılması ve karıştırma işleminden sonra da düzenli dağılımın korunmasının sağlanması çelik tellerin betonun özellikleri üzerinde yapacağı iyileştirmeyi doğrudan etkilemektedir. Bu işlem, harmanlama ve karıştırma işlemi sırasında yapılmalıdır. Katkı kullanılarak su azaltılması ile bu her koşulda sağlanamamaktadır. Agregatane büyüklüğü dağılımının optimizasyonu yoluyla iyi çözümler bulunabilmektedir. Agregat karışımı maksimum doluluk elde edilecek şekilde seçilirse bağlayıcı hamur gereksinimi azalır. Karışımın toplam büzülmesi, hamurun özelliklerine, bağlayıcı, su ve katkı miktarına, sıcaklık ve agregat tipine bağlıdır [19]. Düşük su içeriği daha az büzülme demektir. Çimento hamuru-agregat bağına yakın bölgeleri etkileyen en önemli etkenin su/çimento oranı olduğu söylenebilir. Düşük su/çimento oranlarında ara yüzeyde düşük yoğunluklu bir bölge elde edilmesine karşılık, ara yüzey bölgesinin genişliği azalmaktadır [67].

Chang ve Chai [30] birim hacimdeki çelik tel yüzey alanı arttıkça betonun işlenebilmesinin azaldığını ve çelik tellerin yeterli etki gösterebilmesi için su miktarının artırılması veya su azaltıcı katkı kullanılması gerektiğini bildirmektedirler.

Chenkui ve Guafon [31] çelik tel boyu/kaba agregat boyutu oranının dayanıma etkisini araştırmışlar ve bu oranın 1.5 ve 2 arasında değiştiğini, bu oranlar dışında çelik telin etkisinin daha az olduğunu belirtmektedirler. Çelik tellerin kaba agregat-çimento hamuru ara yüzeyini iyileştirme eğilimi gösterdiği ve mikro çatlakların bu ara yüzeyde gelişmesinden dolayı çelik tel boyunun kısa olması durumunda çatlakları köprüleyemeyeceği ve çatlak genişlemesini durdurma etkisinin az olacağı belirtilmektedir. Çelik tel boyunun çok büyük olması durumunda işlenebilmenin kötü olacağını ve buna bağlı olarak betonun özelliklerinin istenmeyen biçimde etkileneceği belirtilmektedir. Ayrıca, çelik tellerin sadece ince agregat içeren betonların takviyesinde değil, maksimum tane büyüklüğü 40 mm'ye kadar olan betonların takviyesinde de kullanılabileceğini, ancak tel boyunun 35 mm den küçük olmaması gerektiği bildirilmektedir.

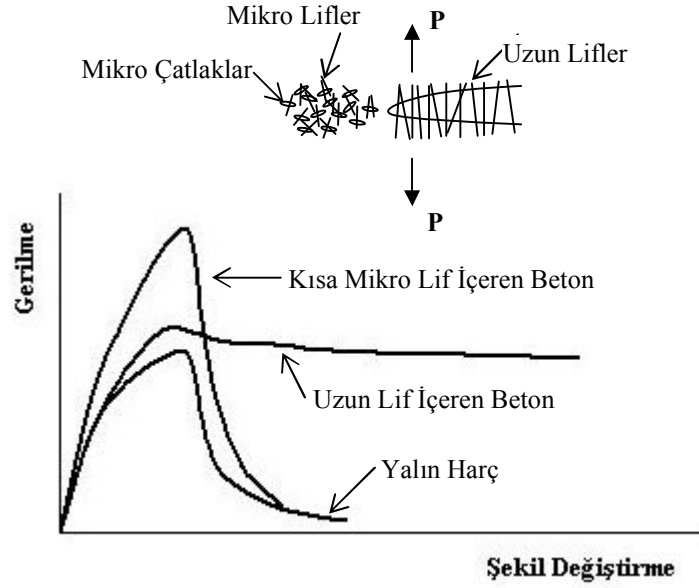
Eren ve Çelik [32] beton takviyesinde kullanılan çelik tel çapının artmasıyla betonun VeBe süresinin arttığını ve buna bağlı olarak işlenebilmenin azaldığını ifade ettiler. Benzer biçimde, Yıldırım [33] ve Taylor ve diğ. [34] çelik tel kullanımının betonun çökme değerini düşürdüğünü ve VeBe süresini yükselttiğini belirttiler.

Bayramov ve diğ. [35] çelik tellerin taze betonun işlenebilirliğini azalttığını, özellikle uzun çelik tel kullanıldığında bu etkinin belirgin olarak görüldüğünü belirttiler. İşlenebilirliği etkileyen en önemli faktörlerin çelik tel narinliği ve tel hacmi olduğunu ifade ettiler. Ayrıca çelik tellerin taze betonun işlenebilirliğine etkisinin belirli bir seviyede tutulması ve betonun özellikleri üzerinde yapacağı iyileştirmenin korunması ve sağlanması için kullanılacak çelik tel hacminin ve narinliğinin sınırlandırılmasının gerekliliğini vurguladılar.

Soroushian ve Bayasi [21] çelik tel tipinin taze betonun işlenebilmesini önemli ölçüde etkilediğini ifade ettiler. Farklı tel tipleri kullanarak yaptıkları çalışmalarda çelik tel içeren taze betonların işlenebilmesinin bütün çelik tel tiplerinde normal betonlara kıyasla azaldığını, sadece kıvrımlı çelik tel içeren taze betonların işlenebilmesinde daha çok değişiklik olduğunu ve çelik tel boyluluğunun belirli bir değerden fazla olmaması gerektiği sonucuna vardılar.

2.3.2 Çelik lifli betonların mekanik davranışı

Çelik teller genel olarak betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azaltmakta, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, darbe, yorulma ve çekme dayanımını arttırmaktadır [19, 70, 25, 71, 10, 30, 36, 37]. Çelik teller kendi çekme mukavemetlerine ulaşınca kadar beton matrisinde basınç ve çekme yüklerinden dolayı meydana gelecek olan çok sayıdaki kılcal çatlak oluşumunu kısıtlamaktadır. Bunun yanı sıra, çelik teller mikro çatlak oluşumunu ve yayılmasını geciktirir, ayrıca çatlak köprüleme etkisi ve tutma başarısı ile ÇTDB'ların göçme modunda iyileştirme yapar [38]. Farklı lif boyutlarına sahip liflerin çatlak köprüleme etkisi Şekil 2.5'te verildi [39].



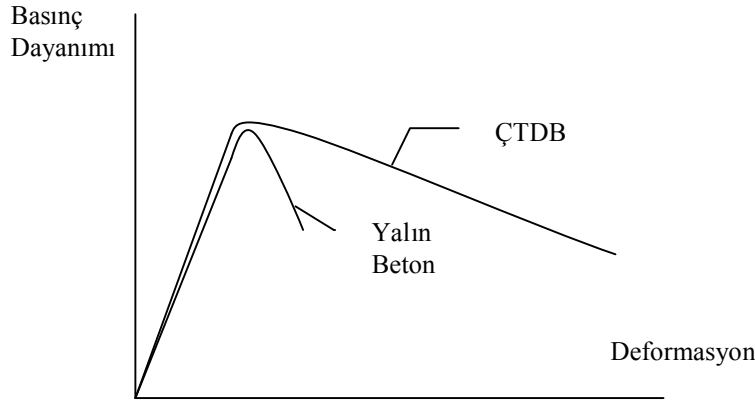
Şekil 2.5 : Farklı lif boyutlarının çatlak köprüleme etkisi [39].

Beton elemanların kırılma davranışlarının betimlenmesinde çatlak sonrası davranışları büyük önem taşımaktadır. Gevrek matrislerde göçme, çatlak sonrası ânî oluşmaktadır, buna karşılık çelik tel içeren betonlarda sünek olan teller matrisin çatlak sonrası yük taşımasını sağlamakta, böylece yapının bütünlüğünü korumaktadır [6].

Çelik tellerin betona eklenmesiyle betonun çekme yükü taşıma kapasitesi artar, ayrıca taşıma gücüne erişmesine rağmen yük taşıma özeliği gösterirler. Yani ilk kırılma yükünden sonra yüksek bir sünekliliğe sahip olurlar, bu da kırılma enerjilerinin yüksek olmasını sağlar [40, 41].

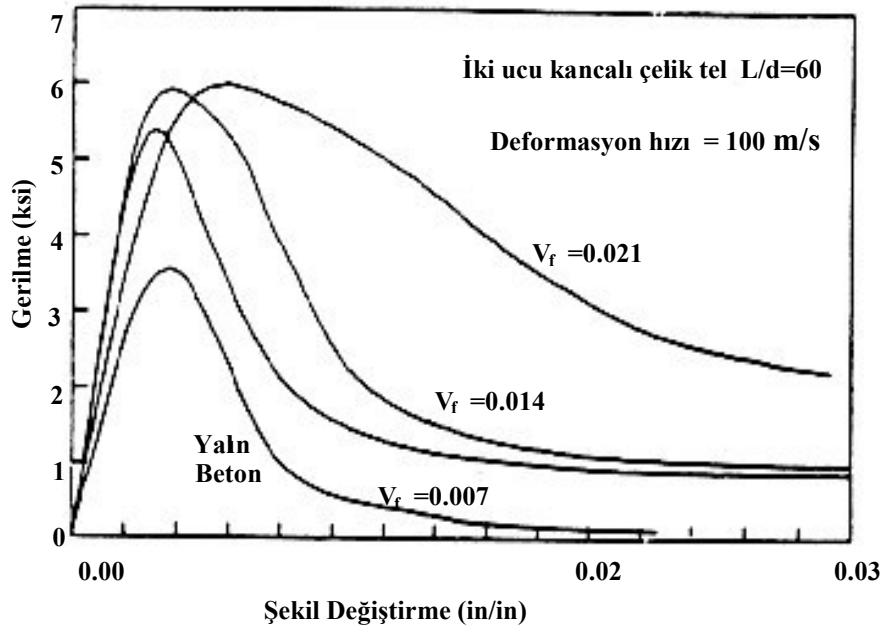
2.3.2.1 Basınç dayanımı

Çelik tellerin betonun basınç dayanımına etkisi eğilme ve çekme dayanımlarına nazaran daha azdır [27]. ACI Committe 544 [27] tarafından, %1.5 çelik tel içeriğinde betonların basınç dayanımlarında %0 ile %15 arasında bir artış olabileceği ifade edilmektedir. ÇTDB'ların basınç dayanımını etkileyen en önemli etmenler çelik tel geometrisi ve matris dayanımıdır [42]. ÇTDB ve yalın betonun tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 2.6'da verilmektedir.

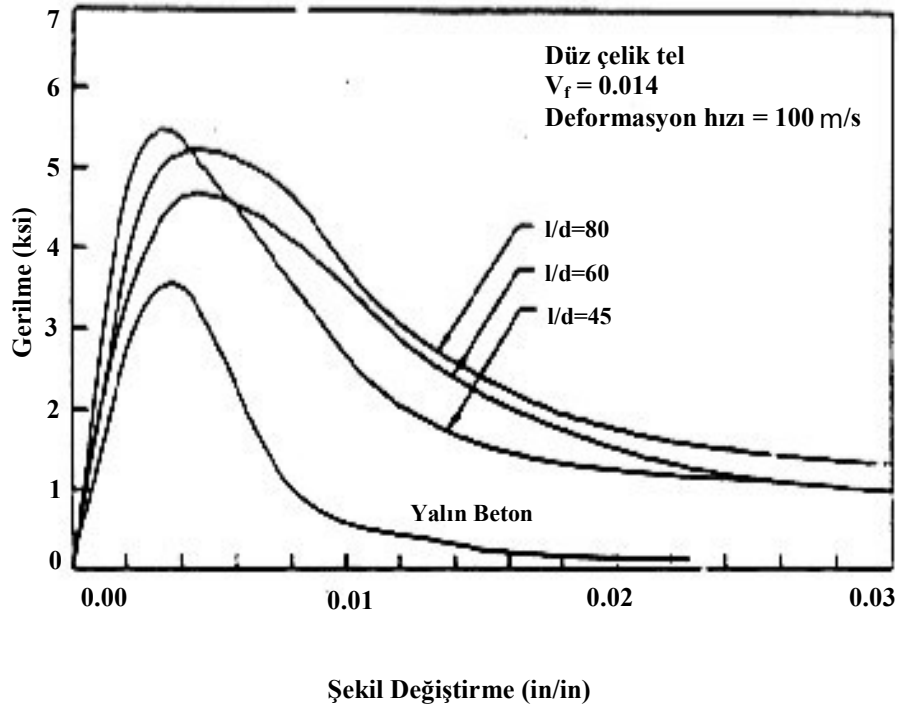


Şekil 2.6 : ÇTDB'un ve yalın betonun basınç dayanımları [5].

Çelik teller yüksek dayanımlı betonların oldukça dik olan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmını belirgin şekilde değiştirmektedir. Ayrıca şekil değiştirme-yumuşama davranışını keskin halden uzaklaştırmakta ve basınç tokluğunu arttırmaktadır [43, 44]. Basınç tokluğundaki bu artış genel olarak kullanılan çelik tel miktarına ve boyluluğuna bağlı olarak değişmektedir. Kullanılan çelik tel miktarı ve boyluluk arttıkça basınç tokluğu artmaktadır [45]. Çelik tel içeriğinin ve narinliğinin ÇTDB'ların gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi Şekil 2.7 ve 2.8'de verilmektedir [22]. Karışım içerisindeki tel hacmi arttıkça matris fazında homojenlik bozulmakta ve kusurlar artmaktadır, buna rağmen basınç altında tokluk artmaktadır [67].



Şekil 2.7 : Çelik tel içeriğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisine etkisi[22].



Şekil 2.8 : Çelik tel narinliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisine etkisi [22].

2.3.2.2 Yarmada çekme dayanımı

ÇTDB'ların tek eksenli çekme, basınç ve eğilme dayanımlarını etkileyen bütün parametreler; çelik tel hacmi, boyluluk oranı ve çelik tel matris özellikleri yarmada çekme dayanımını da etkilemektedir [25, 33, 34, 46, 47].

Gao ve diğ. [47] Çelik tel içeren betonların yarmada çekme dayanımlarında büyük artış olduğunu ve bu artışın çelik tellerin çatlak frenleme özeliğine bağlı olduğunu, maksimum yükün çelik tel boyluluk oranının ve miktarının artmasıyla arttığını bildirmektedirler.

Taylor ve diğ. [34] çelik tel içeriği artıkça eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının arttığını saptadılar.

Song ve Hwang [48] çelik tellerin çeşitli hacimlerde betona katılmasıyla yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımlarının ve yarmada çekme dayanımlarının arttığını belirttiler.

Lim ve Oh [46] çelik tellerin betonun basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını artırdığını ve en büyük artışın yarma dayanımında görüldüğünü ifade ettiler.

2.3.2.3 Kırılma enerjisi

Birim alan başına çatlak oluşturmak için gereken enerji miktarı malzemenin kırılmaya karşı direncini belirler. Betonda çelik telin esas görevlerinden biri kırılma için gereken enerjiyi arttırmaktır. Kırılma enerjisi GF yük-sehim ve yük-ÇAAD eğrilerinin altında kalan alanlar kullanılarak çeşitli yöntemlere göre hesaplanabilmektedir [67].

Peng ve diğ., [58] 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dayanımın düşerken, kırılma enerjisinin etkili bir şekilde arttığını ifade ettiler.

Rao ve Prasad [59] maksimum agrega büyüklüğü arttıkça kırılma tokluğunun ve kırılma enerjisinin arttığını, ayrıca basınç dayanımının artmasıyla kırılma enerjisinin arttığını belirttiler.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, ÇTDB'ların kırılma enerjilerinin boyluluğun artmasıyla arttığı, ayrıca iki ucu kancalı tellerin düz olanlara kıyasla daha yüksek sıyrılma yüküne sahip olduğu belirtilmektedir [60, 61].

Eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu çelik tel donatılı betonları çelik tel içermeyen betonlardan ayıran en belirgin iki özeliğdir. Tokluk, ÇTDB'ların sünekliğinin bir ölçüsüdür ve betonların enerji yutma kapasitelerini gösteren bir parametredir. Tokluk, önceden belirlenen bir sehime ve çatlak ağzı açılma değerine kadar yutulan toplam enerjiyi ifade eder. Çelik tel donatılı betonların toklukları büyük ölçüde çatlağın konumuna, çelik tel tipine, hacmine, matris içerisindeki yönelmesine ve telin matristen sıyrılma direncine bağlıdır [20, 35]. ÇTDB'ların eğilme tokluk düzeylerinin belirlenmesi için deney yöntemleri ve şartnameler bulunmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanları ÇTDB kirişler için ASTM, JSCE ve RILEM tarafından önerilen deney yöntemleridir [53, 73, 54, 55].

Tokluk değeri yük-sehim eğrisi altında kalan alandan elde edilir. ÇTDB'ların tokluğu, enerji yutma kapasiteleri olarak tanımlanır. ÇTDB'ların toklukları genellikle üçte bir veya orta noktalarından yüklenen (dört noktalı veya üç noktalı eğilme deneyleri) çentikli veya çentiksiz prizmatik kiriş numuneler üzerinde yapılan eğilme veya dört kenarı serbest oturan plak deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrilerine bağlı olarak belirlenir [67].

Kiriş numuneler için en yaygın kullanılan tokluk ölçümleri, enerji esaslı boyutsuz olarak ifade edilen tokluk indisleridir. Bu indislerin uygulamaya girişleri Heneger [64] tarafından yapılan çalışmalar esas alınarak hazırlanan ACI tokluk indeksleri ile başlar.

ACI Committee 544 [27] tarafından tanımlanan tokluk indisleri, çelik tel donatılı betonun belirli bir sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanın “ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında kalan alana” oranı olarak ifade edilmektedir.

Banthia ve diğ. [49] çelik tellerin püskürtme betona eklenmesiyle betonun eğilme tokluğunun önemli ölçüde arttığını ve iki ucu kancalı çelik tellerin toklukta en iyi iyileştirmeyi yaptığını belirtmişlerdir.

Moyson ve diğ. [56] genel olarak, ÇTDB’ların davranış özelliklerini belirleyen en önemli iki parametrenin eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu olduğunu, ilk çatlak yükünün (veya dayanımının) beton özelliklerine bağlı olduğunu ve çelik tel içeriğinden etkilenmediğini ifade ettiler.

Banthia ve Trottier [70] tokluğu etkileyen etkenlerin çelik tel geometrisi ve matris dayanımı olduğunu ifade ettiler. En önemli etkenin ise tellerin matristen sıyrılma direnci olduğunu ve toklukta en iyi etkiyi ucu kancalı tellerin yaptığını vurguladılar.

Balendran ve Zhou [57] boyut etkisinin tokluk indisleri üzerindeki etkisini incelediler ve numune boyutu artıkça ÇTDB’ların tokluk indislerinin azaldığını ifade ettiler.

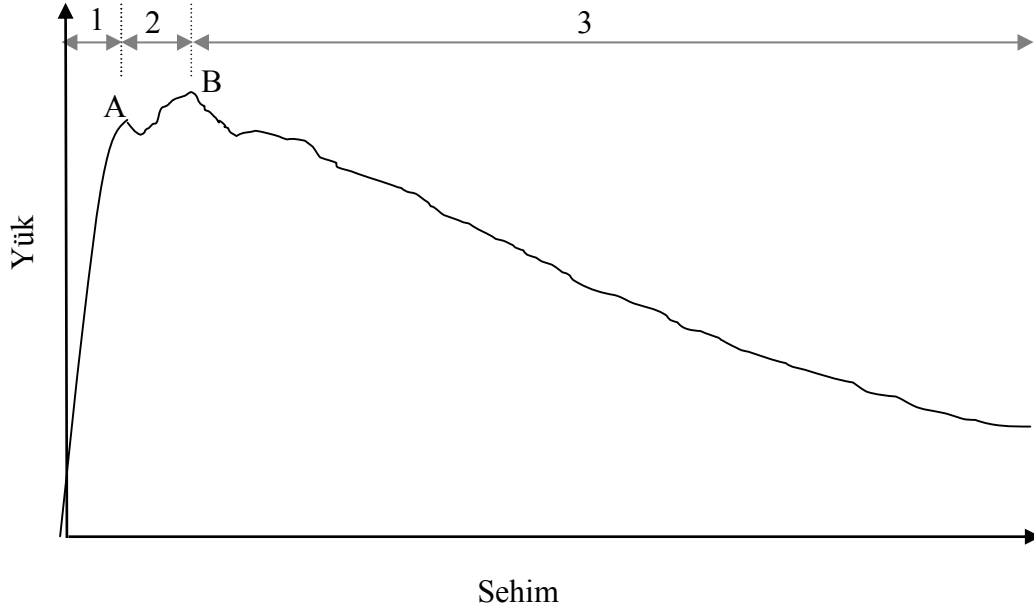
2.3.2.4 Eğilme dayanımı

Çelik teller, betonlar üzerindeki en iyi iyileştirmeyi onun eğilme dayanımı ve eğilme tokluğunda yapmaktadır. Çelik tel donatılı betonlar yüksek eğilme rijitliğine sahiptirler ve servis yükleri altında daha az çatlak genişliğine sahip olurlar. Çelik tel kullanımı ile eğilme dayanımındaki iyileşme geleneksel olarak kullanılan donatı çubuklarının gösterdiği iyileşme potansiyeline karşı oldukça yetersizdir [67].

Çelik tel donatılı betonların eğilme davranışını ve dayanımını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar çelik tel tipi ve şekli, tel boyu, boyluluğu, tel içeriği, matris içerisindeki yönelmesi ve matris ile aderans özellikleri olarak sıralanabilir. Bunun yanında işlenebilirliği etkileyen su/çimento oranı, hava içeriği ve yoğunluk gibi parametreler de etkilemektedir[19, 70, 25, 37, 47, 72, 49, 50].

Nihai eğilme dayanımı ise tel hacmine, boyuna, aderans özelliklerine ve telin çekme dayanımına bağlı olarak değişmektedir [19, 70, 25, 37, 47, 72, 49, 50].

Nihai eğilme dayanımı bu parametrelerin katkısına bağlı olarak ilk çatlak dayanımından yüksek veya düşük olabilmektedir [51]. Şekil 2.9’da kiriş deneylerinden elde edilen tipik yük-sehim eğrisi verilmektedir.



Şekil 2.9 : ÇTDB kirişler için tipik yük-sehim eğrisi [67].

Eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisi üç bölümde incelenebilir [67]:

İlk Bölüm: A noktasına kadar hemen hemen doğrusal bir davranış görülmektedir. Bu kısımdaki davranış tel-matris arayüz yardımıyla matristen tellere aktarılan gerilme transferini içermektedir. Bu bölgede gerilmeler, ilk çatlak dayanımı (orantılılık sınırı) denilen ve matrisin çatladığı noktaya kadar matris ve çelik teller tarafından taşınır.

İkinci Bölüm: A noktası ve maksimum yükün olduğu B noktası arasında doğrusal olmayan bir geçiş bölgesi vardır. (Burada B noktasındaki yük A noktasındaki yükten büyük olduğu kabul edilmiştir. Özellikle düşük çelik tel içeriklerinde ($V_f < \%0,5$) B noktası A noktasından daha düşük olmakta, hatta bazen A noktasından B noktasına ani düşme gözlenmektedir.) Çatlak sonrası oluşan bu bölgede gerilmeler tamamen çelik tellere aktarılır. Yükün artmasıyla çelik teller, B noktasındaki nihai eğilme dayanımına ulaşmaya kadar doğrusal olmayan yük-sehim davranışı sergileyerek matristen sıyrılma eğilimi gösterirler. Bu nokta “tepe yükü” olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede şekil değiştirmeler belirgin biçimde yerleşmektedir.

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

Çelik tellerin çatlak tutma yetenekleri ve matrizen sıyrılma dirençleri ÇTDB'ların eğilme dayanımında ve sünekliğindeki iyileşmeler için belirleyici rol oynar. Yapılan çalışmalarda iki ucu kancalı çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu üzerinde en iyi iyileştirmeyi sağladıkları gözlenmiştir [19, 70, 37, 52, 49, 50].

Ramakrishnan ve diğ. [20] çelik tellerin betona katılması ile betonların ilk çatlak yüklerinde %15 ile %90 ve statik eğilme dayanımlarında ise %15 ile %129 arasında değişen artışlar olduğunu belirlemişlerdir. İki ucu kancalı tellerin en çok, buna karşılık düz olanların ise en az iyileştirmeyi yaptığını bildirmişler, topaklanmaya neden olmaması için iki ucu kancalı tel hacminin %1 ile sınırlandırılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Balaguru ve diğ. [19] iki ucu kancalı çelik tellerin, kıvrımlı ve sonlanmış çelik tellere göre ÇTDB'ların ilk çatlak yükü ve eğilme tokluğu üzerinde en iyi performans gösterdiğini ifade ettiler. Benzer şekilde Banthia ve diğ. [49] çelik tellerin betonun eğilme dayanımı ve tokluğunu önemli ölçüde arttırdığı ve iki ucu kancalı çelik tellerin toklukta en iyi iyileştirmeyi yaptığını belirttiler.

Banthia ve Trottier [70] eğilme tokluğunu etkileyen etkenlerin çelik tel geometrisi ve matris dayanımı olduğunu vurgulamakta, en önemli etkenin ise çelik tellerin matrizen sıyrılma direnci olduğunu ve toklukta en iyi etkiyi ucu kancalı tellerin yaptığını belirtmektedirler.

Gao ve diğ. [47] çelik tel içeren betonların eğilme dayanımlarında normal betonlara kıyasla büyük artış olduğunu ve maksimum yükün çelik tel boyluluk oranının ve içeriğinin artmasıyla arttığını ifade ettiler. Hacimce %1 ve %1,5 çelik tel içeriklerinde betonların eğilme ve kırılma tokluğunda büyük ölçüde iyileşme gözlemlendiğini belirttiler.

2.4 Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Atık çelik liflerin betonun özelliklerine etkisi konusunda diğer araştırmacıların yaptıkları çalışmalar ve sonuçları şöyledir.

G. Centonze ve diğ. [62], deneylerinde uzunlukları; 3mm - 170mm ortalama uzunlukları ise 31,4 mm, çapları; 0,1 mm - 2 mm arasında değişen ortalama çap 0,24 mm olan atık çelik tel kullanmışlar. Endüstriyel çelik tel olarak ise 0,6 mm çapında 60 mm uzunluğunda boylulukları $L/D = 67$ olan teller kullanmışlar. Dört çeşit beton karışımı hazırlamışlar. Bir tanesi lifsiz, bir diğeri endüstriyel çelik tel kullandıkları tel oranı %0,46 olan karışım ve diğer ikisinde ise atık çelik tel oranını %0,23 ve % 0,46 olarak kullanmışlar. Atık tel kullandıklarında işlenebilirliği sağlayabilmek için akışkanlaştırıcı miktarını arttırmak zorunda kalmışlardır. Çökme, basınç ve eğilme deneylerini uygulamışlar ve çatlak oluşuktan sonra betonun mekanik davranışını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar şöyledir:

- Endüstriyel çelik lifli betonlarda olduğu gibi atık çelik liflilerde işlenebilirlik düşmüştür. Bunu önlemek için akışkanlaştırıcı miktarını arttırmışlardır.
- Atık çelik liflerin betonun basınç dayanımına etkisi belirgin olmayıp lifsiz betona çok yakın değerler bulunmuştur.
- Atık çelik liflerin betonun çatlak oluşumundan sonraki mekanik davranışları incelendiğinde tokluğu %100 arttırdığını bulmuşlar. Tokluk indekslerine bakıldığında da endüstriyel çelik lifli betonlarla atık lifli betonların değerleri çok yakın olduğunu saptamışlardır.
- Her iki tip lif türünde de çatlak köprüleme etkisi göstermiştir.

Syaidathul Athira ve diğ. [63], deneylerinde uzunlukları 0,2 mm -1,39 mm ve çapları 20 mm - 90 mm arasında değişen atık çelik tel kullanmışlar. Lifsiz ve lif içerikleri %0,2, %0,4, %0,6, %0,8, %1,0 olmak üzere 6 çeşit beton numune üretmişler. Çimento, su, kum, ince agrega akışkanlaştırıcı ve su/çimento oranını 0,53 olarak sabit tutmuşlar. Elde ettikleri çökme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve çekme dayanımı deney sonuçları Çizelge 2.3'te görülmektedir. Lif içeriği arttıkça %0,4'e kadar basınç, çekme ve eğilme dayanımı artmış işlenebilirlik azalmıştır. Lif içeriği hacimce %0,4'ten daha fazla olduğunda çekme dayanımı artmaya devam etmiş ancak eğilme ve basınç dayanımları düşme eğilimi göstermiştir. Hattâ basınç dayanımı lifsiz betonun dayanımından daha aşağıya düşmüştür. Betona çelik tel katılmasının basınç çekme ve eğilme dayanımına artırıcı katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 2.3 : Syaidathul Athira ve diğ. elde ettikleri deney sonuçları [65].

Lif Hacmi V _f (%)	Çökme (mm)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
0	55	35.10	45.96	5.355	3.886
0.2	60	39.41	51.99	5.449	3.392
0.4	30	47.18	59.17	7.486	3.988
0.6	10	29.72	34.50	6.243	3.903
0.8	30	27.66	40.13	6.358	3.503
1.0	10	27.44	42.26	6.321	4.436

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Kullanılan Malzemeler

Numunelerin hazırlanmasında kullanılan çimentonun, suyun, agregaların, atık çelik liflerin ve katkı malzemesinin gerek ön deneylerle elde edilmiş ve gerekse üretici firmaları tarafından verilmiş özellikleri alt başlıklarda verilmiştir.

3.1.1 Çimento

Deneylerde, tane yoğunluğu $3,12 \text{ Mg/m}^3$ olan CEM I 42,5 R çimentosu kullanıldı. Kullanılan çimento TS EN 197-1 standardına uygundur [65]. Bütün betonlarda çimento içeriği 360 kg/m^3 olarak sabit tutuldu.

3.1.2 Su

Beton karışımlarında karma suyu olarak İstanbul-Maslak şehir şebeke suyu kullanıldı.

3.1.3 Agregalar

Hazırlanan tüm numunelerde ince agregalar olarak Doğal Kum ve Kırma Kum (0-4 mm), kaba agregalar olarak Kırmataş I (4-16 mm) ve Kırmataş II (16-31,5 mm) kullanıldı. Çalışmada agreganın en büyük tane büyüklüğü 32 mm olarak seçildi. Agregalar numune üretiminden önce laboratuvar ortamında kurutuldu. Agregaların tane yoğunlukları Çizelge 3.1’de ve agregaların tane büyüklüğü dağılımları Çizelge 3.2’de verildi.

Çizelge 3.1 : Agregaların tane yoğunluk deneyi sonuçları.

Agregalar	Tane Yoğunluğu (Mg/m^3)
Kırmataş II (KT2)	2,73
Kırmataş I (KT1)	2.74
Kırma Kum (KK)	2,76
Doğal Kum (DK)	2,65

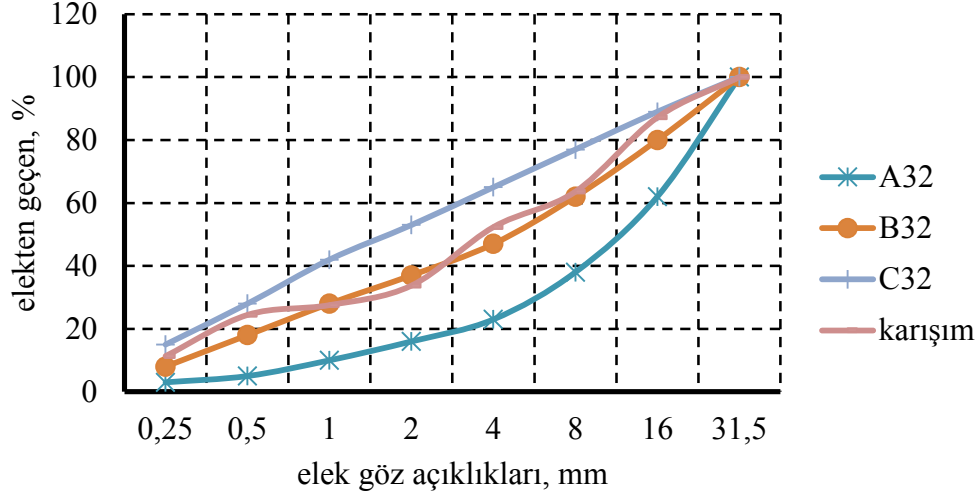
Çizelge 3.2 : Agregaların tane büyüklüğü deneyi sonuçları.

Elek Göz Açıklıkları (mm)	Elekten Geçen Miktar (%)			
	KT2	KT1	KK	DK
0	1	13	7	36
1	1	14	13	99
1	2	14	22	100
2	2	15	40	100
4	2	23	92	100
8	2	66	100	100
16	57	100	100	100
32	100	100	100	100

Karışımlarda agrega granülometrisi için B32 eğrisine yakın değerler hedeflendi. Çizelge 3.3'te verilen karışım oranları kullanıldı ve Şekil 3.1'de gözlenen granülometri eğrisine ulaşıldı.

Çizelge 3.3 : Numunelerde kullanılacak agrega karışım oranları.

Elek Göz Açıklıkları (mm)	Standart Granülometri Eğrileri			Agregalar				Karışım
	A32	B32	C32	KT2	KT1	KK	DK	
0,25	3	8	15	1	13	7	36	11
0,5	5	18	28	1	14	13	99	24
1	10	28	42	2	14	22	100	28
2	16	37	53	2	15	40	100	34
4	23	47	65	2	23	92	100	52
8	38	62	77	2	66	100	100	64
16	62	80	89	57	100	100	100	87
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100
Karışım Oranları				%30	%20	%33	%17	



Şekil 3.1 : Granülometri eğrisi (Karışım agregasının tane büyüklüğü dağılım eğrisi).

Kullanılan bütün agregalar kare gözlü eleklerden elenerek bölütlere ayrıldı ve kabul edilen granülometri eğrisine göre gerekli miktarlarda alınarak karışıma katılmıştır.

3.1.4 Atık çelik lif

Betonlara karıştırılabilecek en fazla lif miktarı, kullanılan agreganın en büyük dane büyüklüğüne ve lifin boyluluk oranına bağlı olarak TS 10514'te [66] verilmiştir. Standartta göre en büyük agrega çapı 32 mm olan karışımlarda $L/d = 60$ için 50 kg/m^3 , $L/d = 75$ için 40 kg/m^3 ve $L/d = 100$ için 30 kg/m^3 kullanılabileceği belirtilmektedir. Yine aynı standartta beton ve harçların takviye edilmesinde kullanılacak çelik tellerin kırılmadan bükülebilir özellikte, her türlü pas, yağ, petrol ve diğer zararlı maddelerden arındırılmış ve temiz olmaları gerektiği belirtilmektedir.

Deneyde kullanılan atık çelik lifler bir atık lastik dönüşüm tesisinden alındı. Temin edilen teller üzerlerindeki tekstil iplikleri, kauçuk artıkları gibi kalıntılar ayıklandı. Bu kalıntıların ağırlıkça oranı %26 olarak bulundu.

Ayıklanan atık çelik lifler şekil ve boyutlarına göre üç sınıfa ayrıldı. Her bir türden rastgele seçilen liflerin mikrometre ile çapları ölçüldü ve ortalamala çapları hesaplandı. Liflerin resimleri Şekil 3.2'de görülmektedir.



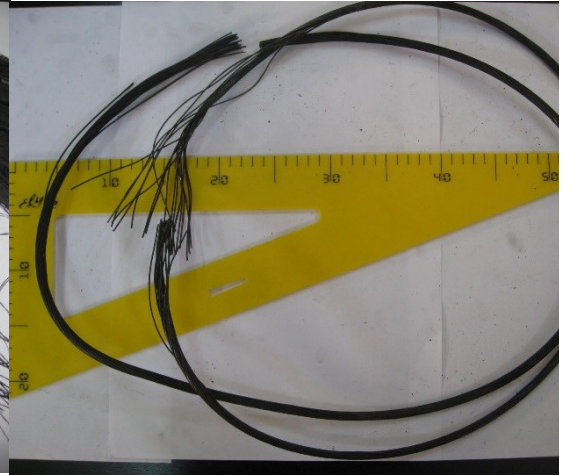
‘B kıvrık’ lif (ayıklanmadan önce)



‘B kıvrık’ lif (ayıklandıktan sonra)



‘C düz’ lif



‘D kalın’ lif

Şekil 3.2 : Deneyde kullanılan atık çelik lifler.

Atık çelik lif içermeyen beton numunesi ‘A’ olarak adlandırıldığı için atık çelik lifler ‘B’, ‘C’ ve ‘D’ olarak isimlendirildi.

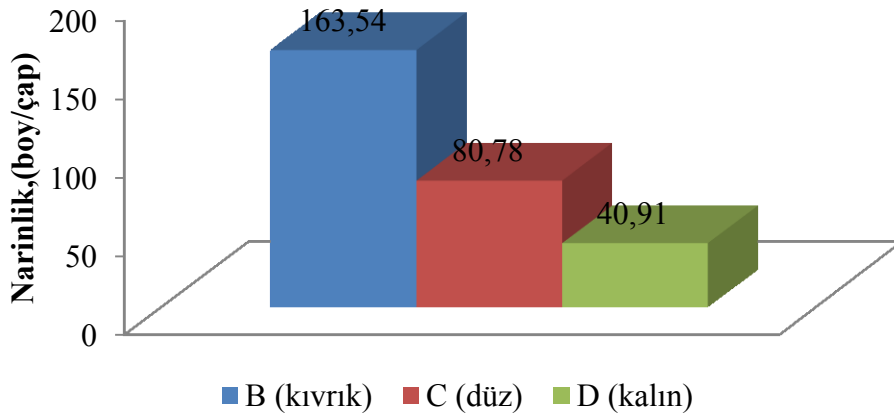
Kıvrık ‘B’ olarak adlandırdıklarımızın şekilleri kıvrık ve dalgalı; uzunlukları ise 20 mm-90 mm arasında değişmektedir. Çapları $d_{ort} = 0,309$ mm ve ortalama boylulukları $L/d = 164$ ’tür.

Düz ‘C’ olarak adlandırdıklarımızın birbiri üzerine sarılmış 1-6 arasında değişen daha ince tellerin sarılmasıyla oluşmuş düz (500 mm - 700 mm uzunluğunda) demetlerlerdir. Çapları $d_{ort} = 0,619$ mm ve ortalama boylulukları $L/d = 81$ ’dir. Bu liflerin ortalama çapları sarılı halde ve sarılı lifler çözülerek ayrı ayrı ölçüldü. Liflerin ortalama çapları Çizelge 3.4’te verildi.

Çizelge 3.4 : Deneyde kullanılan C türü atık çelik liflerin ortalama çapları.

Tel Sayısı	Demet Çapı (mm)	Tel Çapı (mm) (Sarımlar açılmış durumda)					
6	0,694	0,226	0,244	0,271	0,269	0,278	0,237
5	0,633	0,317	0,213	0,219	0,22	0,181	
4	0,697	0,355	0,332	0,358	0,338		
3	0,642	0,313	0,311	0,309			
2	0,314	0,291	0,297				
tek	0,582	0,582					

Kalın ‘D’ olarak adlandırdığımız teller 1,5 m- 5 m uzunluğunda tellerdir ve diğerlerine oranla çapları daha kalındır. Ortalama boylulukları $(L/d)_{ort} = 41$ olan bu teller kendi aralarında çaplarına göre üç sınıfa ayrıldı. D₁ olarak adlandırılanlar çapları ortalama $d_{ort} = 1,1$ mm ve ortalama boylulukları $(L/d)_{ort} = 47$ ’dir. D₂ olarak adlandırılanlar çapları ortalama $d_{ort} = 1,5$ mm ve ortalama boylulukları $(L/d)_{ort} = 34$ dür. dir. D₃ olarak adlandırılanlar çapları ortalama $d_{ort} = 2,1$ mm ortalama boylulukları $(L/d)_{ort} = 24$ ’dür. Deneyde kullanılan atık çelik liflerin boyluluklarını gösteren grafik Şekil 3.3’te ve özellikleri Çizelge 3.5’te verildi.



Şekil 3.3 : Deneyde kullanılan atık çelik liflerin boyluluk oranları.

Çizelge 3.5 : Deneyde kullanılan atık çelik liflerin özellikleri.

Atık Çelik Lif L_{ort}= 50 mm	Ortalama Çap (mm)	Ortalama Boyluluk (L/d)	Çekme Dayanımı (MPa)
(kıvrık) B	0,3	164	*
(düz) C	0,6	81	*
(kalın) D₁	1,1	47	1100
(kalın) D₂	1,5	34	1100
(kalın) D₃	2,1	24	1100

*Bu Atık lifler çok küçük oldukları için çekme dayanımları ölçülemedi.

Bir örnekliliği ve beton karışımında kullanımını kolaylaştırmak açısından C ve D kodlu atık çelik lifler 50 mm olarak kesildi. Kıvrık ve düz tellerin çekme dayanımları teller çok küçük oldukları için ölçülemedi. Kesildikten sonra atık çelik liflerin resimleri Şekil 3.4'te görülmektedir.



'B' $(L/d)_{ort} = 164$



'C' $(L/d)_{ort} = 81$



'D₁' $(L/d)_{ort} = 47$



'D₂' $(L/d)_{ort} = 34$



'D₃' $(L/d)_{ort} = 24$



'D₃' $(L/d)_{ort} = 24$

Şekil 3.4 : Atık çelik liflerin 50 mm boyda kesildikten sonraki resimleri.

3.1.5 Katkı

Yeterli işlenebilmeyi sağlamak amacıyla yoğunluğu 1.1 Mg/m^3 olan üçüncü nesil (çok yüksek düzeyde su gereksinimi azaltıcı) akışkanlaştırıcı katkı maddesi karışımlarda çimento kütlesinin yaklaşık olarak %1,33'ü oranında kullanıldı.

3.2 Deney Numunelerinin Özellikleri ve Üretimi

3.2.1 Beton bileşimleri

Atık çelik lif içermeyen bir şahit beton ve 10 adet atık çelik lif içeren beton olmak üzere toplam 11 farklı beton üretildi. Karışımlar 4 seri halinde hazırlandı. İlk seri lifsiz beton numuneler, ikinci seri B türü lif içeren beton numuneler, üçüncü seri C türü lif içeren betonlar ve dördüncü seride D türü lif içeren beton numunelerdir. Lifli serilerde 5 kg/m³, 10 kg/m³, 15 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³, 60 kg/m³ lif içeren karışımlar üretildi.

Atık çelik lifler boyluluk ve boyutlarına göre B, C ve D olarak adlandırıldı. Sırasıyla B boyluluğu $(L/d)_{ort} = 164$ olan kıvrık şekilli liflerdir. C boyluluğu $(L/d)_{ort} = 81$ olan düz şekilli liflerdir. D boyluluğu $(L/d)_{ort} = 41$ olan liflerdir. Lif içermeyen karışımlar A olarak adlandırıldı.

Karışımların adlandırılmasında sırasıyla bir harf ve iki rakam kullanıldı. İlk harf beton karışımında kullanılan lifin türünü temsil etmektedir. Sonraki sayı ise beton karışımında kullanılan lif içeriğini “kg/m³” olarak belirtmektedir. Örneğin, ‘C30’ kodlu numune 30 kg/m³, boyluluğu $(L/d)_{ort} = 81$ olan C türü atık çelik lifler içermektedir.

Beton numunelerin üretiminde 100×100×500 mm boyutlarında kalıplar kullanıldı. Karışımların, kodları ve karışımlardaki lif oranları Çizelge 3.6’da verildi.

Çizelge 3.6 : Üretilen numunelerin kodları.

Numunelerin adlandırılması	Lif Türü			
Lif İçeriği (kg/m ³)	A (Lifsiz)	B (L/d) _{ort} = 164	C (L/d) _{ort} = 81	D (L/d) _{ort} = 41
0	A	-	-	-
5	-	B5	-	-
10	-	B10	C10	-
15	-	B15	-	-
20	-	-	C20	D20
30	-	-	C30	-
40	-	-	C40	D40
60	-	-	-	D60

Agrega olarak doğal kum, kırma kum, kırmataş I, kırmataş II kullanıldı. Bütün betonlarda çimento dozajı 360 kg/m³ ve su/çimento oranı 0.50 olarak sabit tutuldu. Katkı maddesi karışımlarda çimento ağırlığının yaklaşık % 1,33'ü oranında kullanıldı. Hesaplarda hava içeriği hacmen %1,5 kabul edildi. Üretilen betonların bileşimleri ve hesabında göz önüne alınan değerler Çizelge 3.7'de verildi.

Çizelge 3.7 : Üretilen betonların gerçek bileşimleri.

Karışım Bileşenleri Numune Adı		Çimento	Su	Katkı	Lif	DK	KK	KT1	KT2	Birim Hacim Kütle (deneysel) (kg/m³)
1 m³ Beton İçin Malzeme Ağırlıkları (kg)	A	366	183	5	0	314	635	382	571	2455
	B5	365	182	5	5	312	631	380	568	2448
	B10	367	184	5	10	314	636	382	572	2470
	B15	364	182	5	15	311	629	378	565	2448
	C10	363	182	5	10	311	628	378	565	2441
	C20	368	184	5	20	315	636	383	572	-
	C30	368	184	5	31	314	635	382	571	-
	C40	376	188	5	42	320	646	389	581	-
	D20	362	181	5	20	310	626	377	563	2443
	D40	362	181	5	40	308	623	375	560	2453
	D60	363	182	5	61	308	623	375	560	2475

3.2.2 Numunelerin üretimi

Karışım hesaplarında bulunan hedef miktarlara göre beton bileşenleri tartılarak hazırlandı. Betonların üretiminde 50 dm³ kapasiteli laboratuvar karıştırıcısı kullanıldı.

Karma işlemi dört aşamada yapıldı. İlk olarak miksere irden inceye doğru olmak üzere agregalar ve çimento yerleştirilerek karıştırmaya başlandı. Ardından karma suyunun bir kısmı eklendi. Üçüncü aşamada çelik lifler karışıma ilave edildi. Son olarak karma suyunun kalan kısmı ve akışkanlaştırıcı da ilave edilerek bileşenlerin gözlemsel bakımdan düzgün olarak dağılımı gerçekleşene kadar karıştırmaya devam edildi.

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi B10, B15, C30 ve C40 çelik liflerde topaklanma gözlemlendi, bu nedenle bu karışımlardaki topaklanmalar el ile dağıtıldı. Topaklanma nedeniyle daha yüksek oranlarda lif kullanımı mümkün olmadı. Karışımlarda lif hacim oranı maksimum %0,77 (60 kg/m³) lif içeriği maksimum 60 kg/m³ olarak belirlendi.



Şekil 3.5 : Beton üretimi sırasında topaklanan atık çelik lifler.
(üstte B20 altta C60 deneme karışımları)

Üretilen betonların taze beton deneyleri birim kütle (taze yoğunluk) ve çökme deneyleri yapıldıktan sonra 100×100×500 mm boyutlarında kalıplara yerleştirildi ve vibrasyon işlemine tabi tutuldu. Her bir karışımdan üç numune üretildi.

Beton numuneleri üretimden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak daha önceden belirlenen bakım ortamlarına alındılar. Numuneler kalıp alındıktan sonra 28 gün boyunca sürekli olarak 20°C ± 2°C’de kirece doymuş su içerisinde bekletildi.

28inci günde sudan çıkartılan numuneler 56ncı güne kadar laboratuvar içi hava şartlarında muhafaza edildi. Sertleşmiş beton deneyleri 56 günlük numuneler üzerinde yapıldı. Eğilme deneyi öncesi numunelere kesit yüksekliğinin 1/6 sı yani 17 mm derinliğinde çentik açıldı. Çentikler açıldıktan sonra kumpasla numunelerin ölçüleri hesaplarda kullanılmak üzere alındı.

Sırasıyla eğilme deneyi, eğilme deneyinden çıkan parçalar üzerinde de basınç ve yarma deneyleri yapıldı. Bu parçalar basınç ve yarma deneyinden önce 100×100×100 mm boyutlarında kesilerek hazırlandı.

3.3 Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

3.3.1 Taze beton deneyleri

Taze beton numuneleri üzerinde, birim kütle (taze yoğunluk) ve çökme deneyleri yapıldı.

3.3.1.1 Birim kütle deneyi

Üretilen betonlar kalıplara yerleştirilmeden önce, silindir şeklinde hacmi bilinen bir kap içerisine yerleştirilerek taze beton birim kütleleri belirlendi.

3.3.1.2 Çökme deneyi

Taze betonun işlenebilirlik özeliğinin saptanabilmesi için Çökme deneyi yapıldı. Taze beton çelik koni içerisine, her tabakası 25 kez şişlenerek üç tabaka halinde yerleştirildi. Daha sonra koni tek seferde yukarı kaldırıldı ve çökme miktarı en yakın 10 mm doğrulukla ölçüldü. C30 ve C40 kodlu betonlarda çökme gerçekleşmedi.

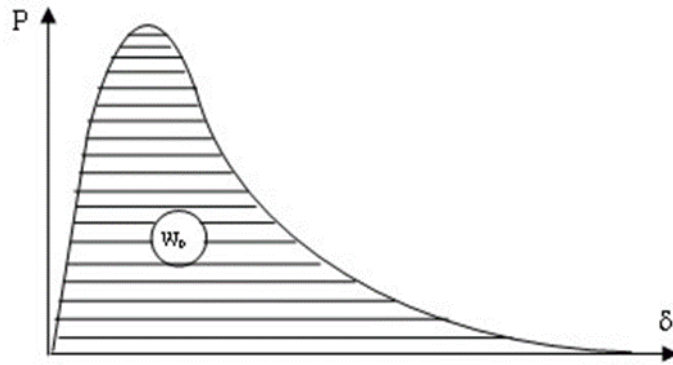
3.3.2 Sertleşmiş beton deneyleri

3.3.2.1 Eğilme dayanımı deneyi

Birim alanlı çatlak oluşturmak için gereken enerji miktarı malzemenin kırılmaya karşı direncini belirler. Çentikli bir beton numune üzerinde eğilme veya çekme deneyi yapıldığında numune iki parçaya ayrılincaya kadar yapılan iş, harcanan toplam enerjiyi verir ve bu enerjinin yayılan çatlak için harcadığı varsayılır. Çatlak alanı, esas çatlak yönüne paralel doğrultuda düzlem üzerindeki izdüşüm alanıdır [54, 55].

Kırılma enerjisinin saptanması için RILEM 50-FMC Teknik Komitesi (1985) tarafından standart deney yöntemi olan çentikli harç veya beton kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapıldı [54].

G_F , yük-sehim eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilir. G_F bir malzeme sabiti değildir ve kiriş derinliğindeki artma ile arttığı, çentik derinliğindeki artma ile azaldığı bilinmektedir. Bu çalışmada yük sehim ve yük çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri altında kalan alandan kırılma enerjileri hesaplandı. Şekil 3.6'da şematik olarak yük sehim eğrisi görülmektedir. Kiriş numunelerin Kırılma enerjisi RILEM 50-FMC'nin önerdiği bağıntı ile (3.1) ve net eğilme dayanımları ise (3.2) de verilen bağıntı ile hesaplandı.



Şekil 3.6 : Yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi.

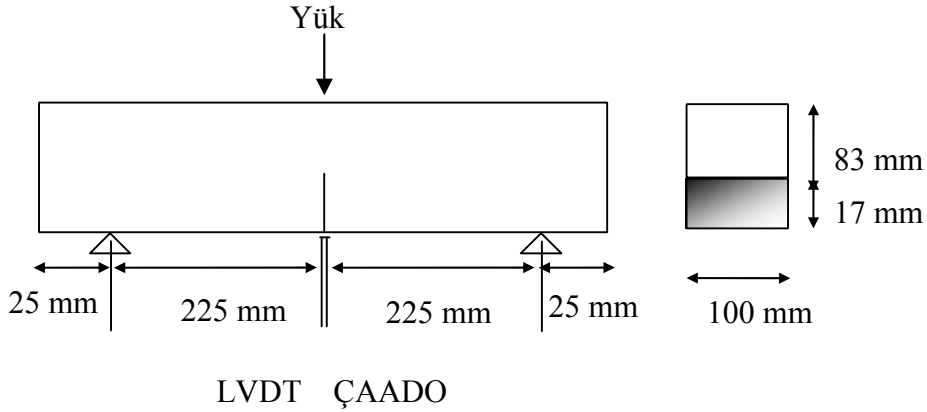
$$G_F = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (3.1)$$

Bağıntıda G_F özgül kırılma enerjisi (N/m veya J/m²), W_o yük-sehim eğrisi altında kalan alan (Nm), m kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg), G yer çekimi ivmesi (9,81 m/s²), δ_o kirişin göçme sırasındaki son sehim değeri (m), A_{lig} etkin kesit alanı (m²)dir.

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

Bağıntıda P kırılma yükünü (N), L mesnetler arası uzaklığı (mm), B numune kesitinin genişliğini (mm), D numune kesitinin yüksekliğini (mm) göstermektedir.

Kiriş numuneler üzerinde eğilme deneyi 56ncı günde yapıldı. Kırılma enerjisinin belirlenmesi için çentikli 100×100×500 mm'lik kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi gerçekleştirildi. Her numuneye elmas testere ile kesilerek 17 mm'lik bir çentik açıldı ve etkin kesit alanının 83×100 mm olması sağlandı. Beton kiriş numunelere yük, maksimum kapasitesi 100 kN olan Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi ile uygulandı. Yükleme hızı, lifsiz numunelerde 0,002 mm/dk, lifli numunelerde ise 0,050 mm/dk'da sabit tutuldu. Çentikli kiriş numune için eğilme deneyi düzeneği Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7 : RILEM kırılma enerjisi deneyi yükleme düzeneği.

Deneyden önce numunenin yan yüzeyine yapıştırılan korniyere sehimi ölçmek amacıyla bir adet LVDT alıcı yerleştirildi. Bu deney düzeneğiyle uygulanan yükler ve bu yüklere karşılık gelen düşey deplasmanlar alıcılardan bilgisayara aktarılarak yük-sehim grafiklerine geçildi. Çatlak ağzına da hazırlanan bir aparat takılarak çatlak ağzı açılma deplasmanı ölçer (ÇAADO) yerleştirildi ve bu alıcı yatay deplasmanı ölçerek verileri bilgisayara aktardı ve yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı grafikleri elde edildi. Numunelere ait yük-sehim eğrileri, yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı ve gerilme-sehim eğrileri Sırasıyla Ek A ve Ek B ve EK C'de verildi.

3.3.2.2 Basınç dayanımı deneyi

Basınç deneyi eğilme deneyinden çıkan parçalar üzerinde 56ncı günde yapıldı ve yükleme hızı 6,00 kN/s olarak sabit tutuldu. Bu deneyler sonucunda numunelerin kırılma yükleri kesit alanlarına bölünerek basınç dayanımları hesaplandı.

3.3.2.3 Yarmada çekme dayanımı deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi eğilme deneyinden çıkan parçalar üzerinde 56. günde yapıldı ve yükleme hızı 4,00 kN/s sabit tutuldu. Yük numunelere alttan ve üstten 10 mm genişlikli ve 4 mm kalınlıklı kontduralit çubuklar vasıtası ile aktarıldı. Elde edilen verilerden yarmada çekme dayanımları hesaplandı.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Taze Beton Deneyleri

Taze beton deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Numunelerin birim kütleleri ve çökmeleri.

Karışım Adı	A	B5	B10	B15	C10	C20	C30	C40	D20	D40	D60
Çökme (mm)	140	100	80	60	100	40	yok	yok	140	170	70
Birim Kütle (kg/m ³) (deneysel)	2455	2448	2470	2448	2441	-	-	-	2443	2453	2475
Birim Kütle (kg/m ³) (teorik)	2414	2418	2421	2424	2421	2427	2434	2440	2427	2440	2454

4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneylerinden hesaplanan dayanım ve kırılma enerjileri Çizelge 4.2’de verildi. Deneyler sonucu elde edilen Yük-Sehim Eğrileri EK A’da, Yük-Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı Eğrileri EK B’de ve Gerilme-Sehim Eğrileri EK C’de verildi.

Çizelge 4.2 : Sertleşmiş beton deneyleri sonuçları.

Numune Adı	Lif Miktarı (kg/m ³)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Yarma Dayanımı (MPa)	Ortalama Kırılma Enerjisi (J/m ²)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
A	0	69,4	6,7	153	5,6
B5	5	69,7	5,6	463	7,4
B10	10	66,0	6,5	630	5,0
B15	15	70,9	6,6	1132	7,2
C10	10	64,0	6,0	562	5,7
C20	20	64,6	7,2	932	5,4
C30	30	61,6	7,9	1375	7,7
C40	40	71,5	9,0	1856	9,4
D20	20	68,9	6,8	514	6,8
D40	40	67,0	7,2	1151	6,7
D60	60	59,5	7,0	1394	6,7

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Taze Beton Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

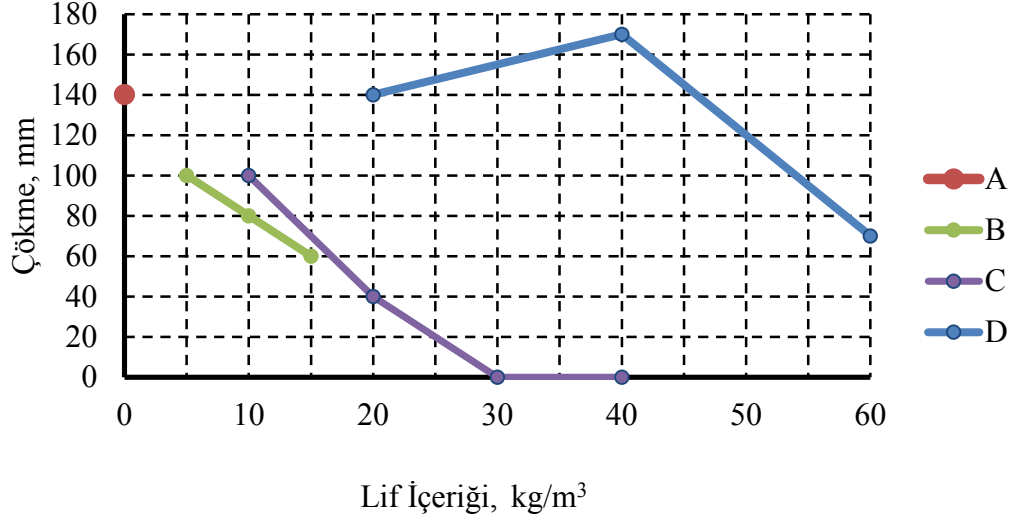
Deneyde Atık çelik liflerin hacim oranları B türünde $M_f = 5 \text{ kg/m}^3$, 10 kg/m^3 , 15 kg/m^3 , C türünde $M_f = 10 \text{ kg/m}^3$, 20 kg/m^3 , 30 kg/m^3 , 40 kg/m^3 , D türünde $M_f = 20 \text{ kg/m}^3$, 40 kg/m^3 , 60 kg/m^3 şeklindedir.

Atık çelik liflerin hacim oranına ve boyluluklarına bağlı olarak betonunu işlenebilme, karışma ve kalıplara yerleşebilme özelliklerinde değişiklikler olmaktadır. Bunun sebebi, atık çelik liflerin hacim oranlarına ve boyluluklarına bağlı olarak birbirlerinin içine girerek hareketi ve şekil değişikliğini nispeten engellemeleri ve belirli bir değer üzerinde çıkılması ile birlikte tellerin topaklanmalarına neden olmasıdır.

Deneylerde B10, B15, C30 ve C40 çelik liflerde topaklanma gözlemlendi, topaklanmalar el ile dağıtıldı. Bundan dolayı B türü liflerle 15 kg/m^3 ve C türü liflerle 40 kg/m^3 'ten daha fazla lif içeren numuneler üretilemedi. Karışımlarda lif hacim oranı maksimum $V_f = \%0,77$ (60 kg/m^3) olarak belirlendi.

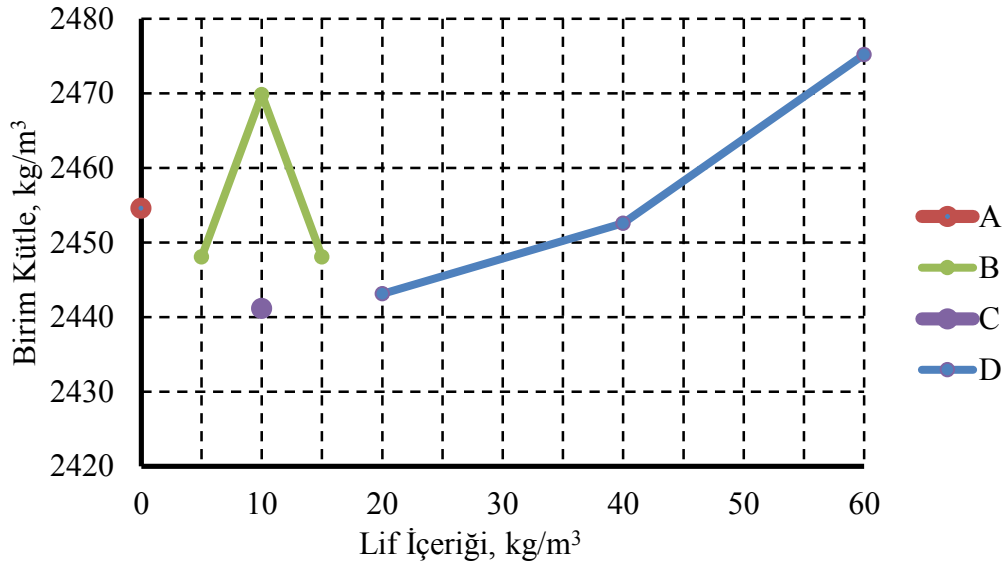
Atık çelik lif miktarına ve boyluluğuna bağlı olarak taze betonun akıcılığı ve çökmesi oldukça belirgin bir şekilde azalmaktadır. Deneyi yaparken gözlemlediğimiz bu olguyu ölçüm sonuçları da doğrulamaktadır.

Boyluluk ve lif içeriğinin artması çökme ile ölçülen işlenebilirliği azaltmaktadır. En yüksek boyluluğa sahip B ($L/d = 164$) türü lifli karışımlarda en az işlenebilme ve çökme gözlemlendi. Lif içeriği 15 kg/m^3 ($\%0,19$) değerinin üstünde kullanılamadı. Boyluluğu $L/d = 81$ olan C türü lifli karışımlarda ise 40 kg/m^3 ($\%0,5$) değerinden büyük lif içeriği kullanılamadı. En kolay işlenebilme boyluluğu en düşük olan D ($L/d = 41$) türü lifli karışımlarda gözlemlendi. Lif içeriği ve çökme miktarı grafiği Şekil 5.1'de verildi.



Şekil 5.1 : Numunelerin lif içeriği ve çökme miktarı grafiği.

Taze beton birim hacim kütleleri genelde karışım oranlarına bağlı olarak normal betonunkinden yüksektir. Birim kütleler boyluluk ve lif içeriği ile genelde artmaktadır. Büyükten küçüğe doğru sıralandığında en yüksek birim kütle B türü lifli karışımlarda en düşük birim kütle ise D türü lifli betonlarda gerçekleştiği görülmektedir. Lif içeriği ve birim kütle grafiği Şekil 5.2’de verildi.



Şekil 5.2 : Numunelerin lif içeriği ve birim kütle grafiği.

5.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

5.2.1 Eğilme deneyleri

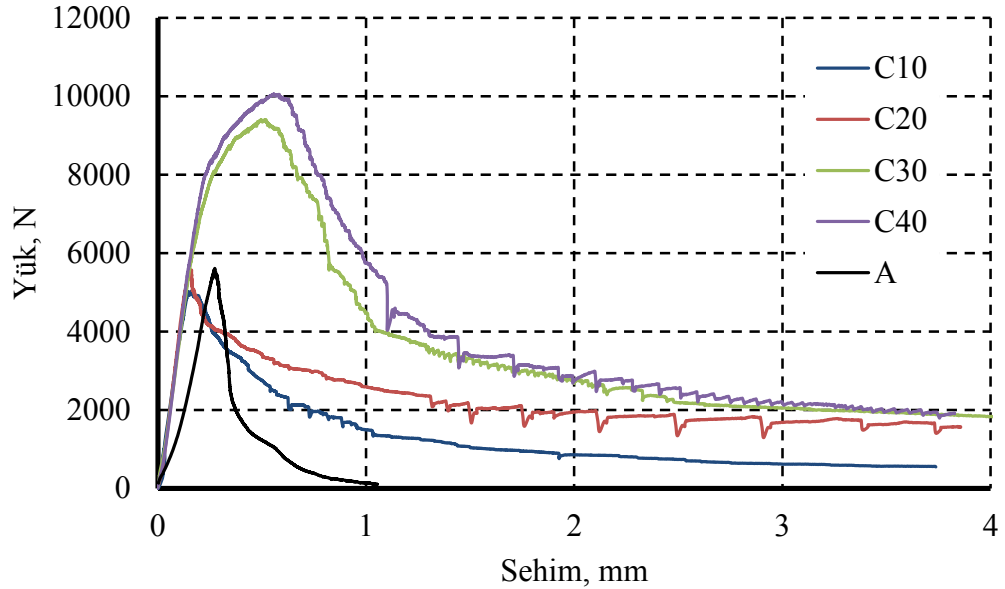
5.2.1.1 Yük sehim eğrileri ve ilk çatlak yükü

Sırasıyla Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te B, C ve D türü liflerden farklı miktarlarda kullanılarak üretilen betonların yük-sehim eğrileri lifsiz A betonuyla karşılaştırmalı olarak verildi. Şekil 5.9'de ise üretilen tüm numunelere ait yük-sehim eğrileri birlikte verildi.

Lifsiz A numunesine ait yük-sehim eğrisi incelendiğinde tepe yükünden sonra eğri ani biçimde azalmakta ve beton numunede gevrek bir davranış meydana gelmektedir.

Şekil 5.3'de görüldüğü gibi C türü lif içeren betonlarda lif içeriği arttıkça ilk çatlak yükü artmaktadır. Ayrıca artan lif içeriği ile birlikte ilk çatlak yükündeki sehim değeri ile maksimum yükteki sehim değeri arasındaki fark büyümektedir.

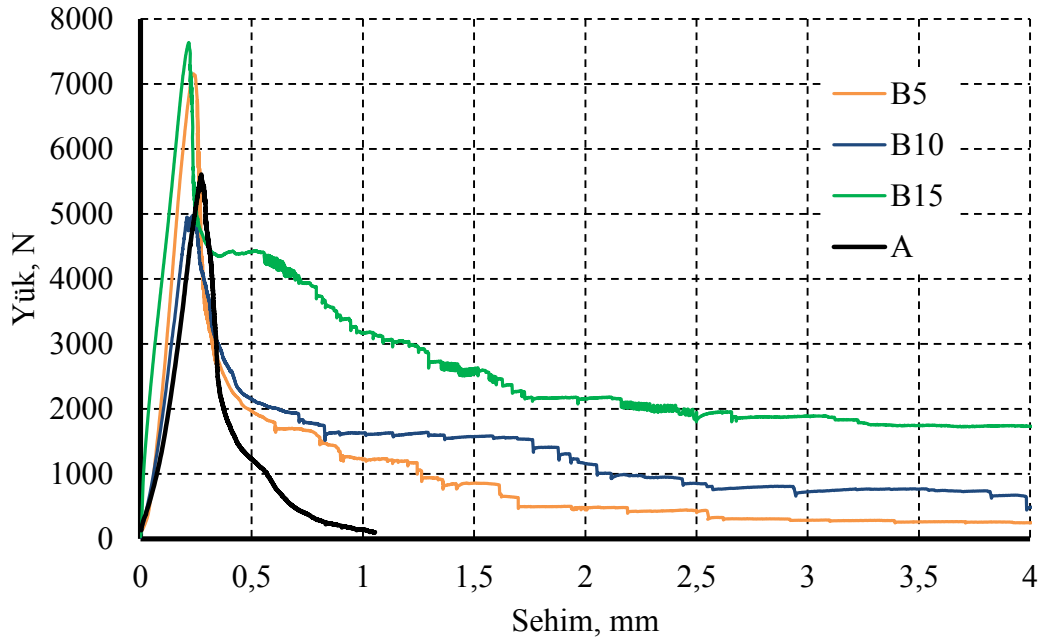
Düşük lif içeren C10 ve C20 numunelerinde ilk çatlak yükü lifsiz betonla yaklaşık olarak aynıdır. Ancak bu betonlar tepe yükünden sonra aşağı inen eğri azalan bir eğimle daha yüksek bir sehime kadar yük taşımaya devam etmektedir. C10 lifsiz betonun 3,7 katı, C20 ise 6,1 katı kadar enerji yutmaktadır.



Şekil 5.3 : C türü lifli numunelerden elde edilen yük-sehim eğrileri.

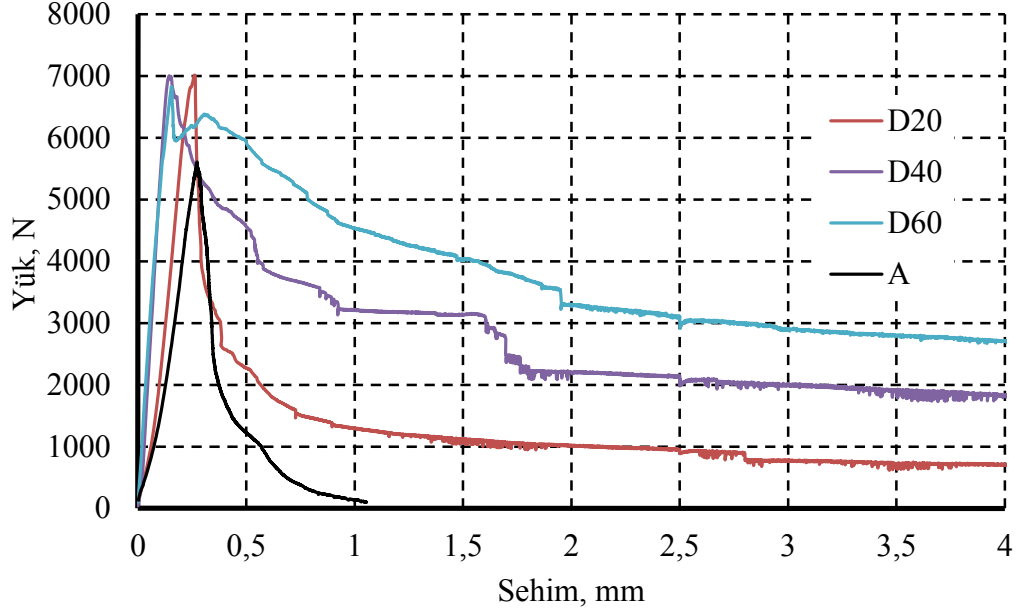
Yüksek lif hacim oranında atık çelik lif içeren C30 ve C40'ta ise hem ilk çatlak yükü oldukça fazla artmış hem de ilk çatlak yükünden sonra tepe yüküne kadar eğri yukarı yönlü devam etmiş ve tepe yükünden sonra da azalan bir eğimle daha yüksek bir sehime kadar yük taşımaya devam etmiştir. Beton ilk çatlak sonrası şekil değiştirme sertleşmesi ve ardından şekil değiştirme yumuşaması davranışlarını sergilemiştir ve yutulan enerji oldukça büyük bir oranda artış göstermiştir. C30'da lifsiz betonun 9 katına, C40'ta ise 12,2 katına kadar enerji yutma kapasitesi artmıştır.

Şekil 5.4'de görüldüğü gibi B türü liflerle hazırlanan betonlarda da lif hacim oranı arttırıldıkça ilk çatlak yükü artmaktadır. B10'daki düşmenin beton üretimindeki kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. B5, B10 ve B15 numunelerinin yük-sehim eğrilerinden de görülebileceği gibi tepe yükünden sonra aşağı inen eğri azalan bir eğimle daha yüksek bir sehime kadar yük taşımaya devam etti. B5 lifsiz betonun 3 katı, B10 4,1 katı kadar ve B15 7,4 katı kadar enerji yuttu.



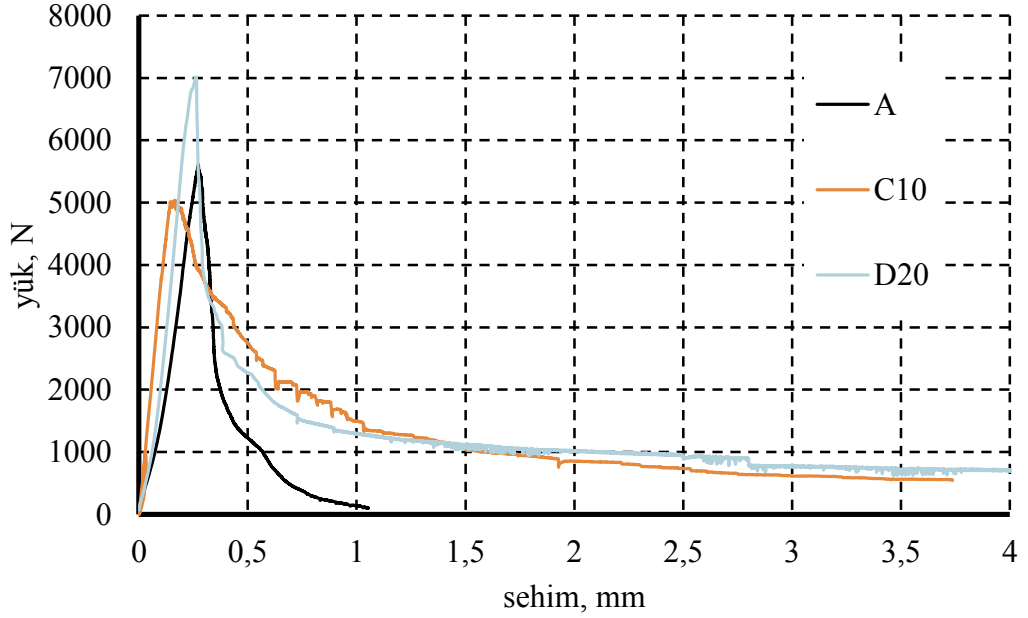
Şekil 5.4 : B türü lifli numunelerden elde edilen yük-sehim eğrileri.

Şekil 5.5'te görüldüğü gibi D türü liflerle hazırlanan betonlarda da lif içeriği arttırıldıkça ilk çatlak yükü artmaktadır. D20, D40 ve D60 numunelerinin yük-sehim eğrilerinden de görülebileceği gibi tepe yükünden sonra aşağı inen eğri azalan bir eğimle daha yüksek bir sehime kadar yük taşımaya devam etmektedir. D20'nin lifsiz betonun 3,4 katı, D40'ın 7,5 katı kadar ve D60'ın ise 9,1 katı kadar enerji yuttuğu görülmektedir.

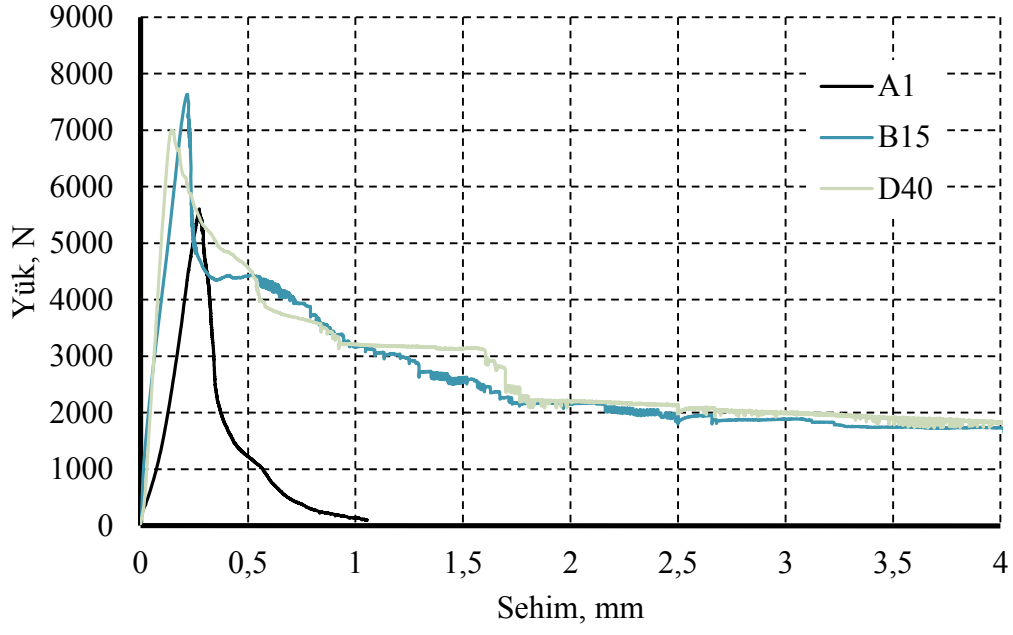


Şekil 5.5 : D türü lifli numunelerden elde edilen yük-sehim eğrileri.

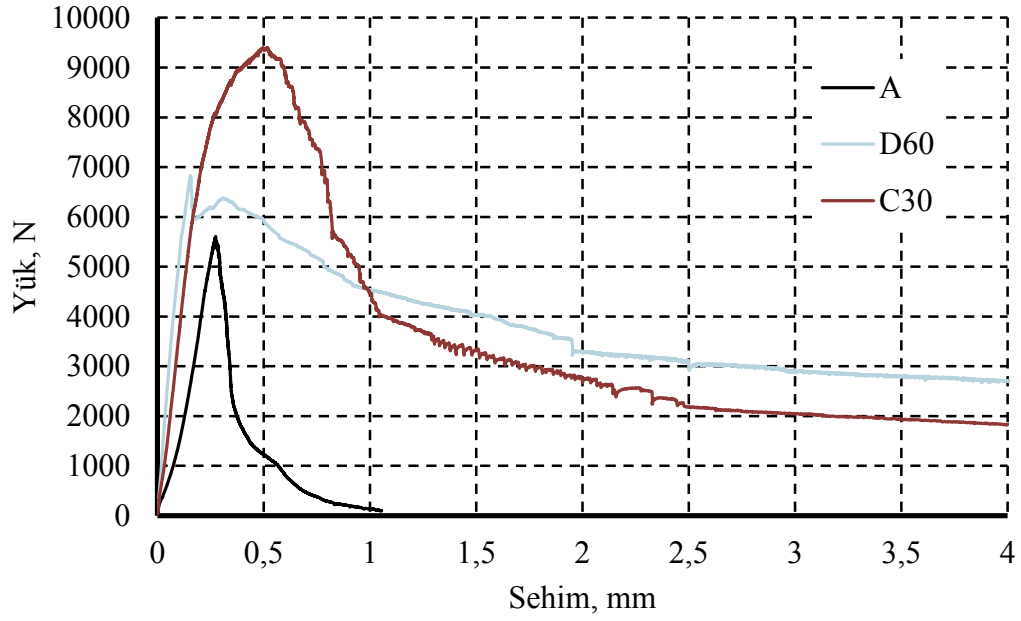
Yük-sehim eğrilerinden hesaplanan kırılma enerjileri ile beraber değerlendirildiğinde şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de görüldüğü gibi yaklaşık aynı enerji yutma kapasitesine sahip bir beton eldesi için C10 D20 ile, B15 D40 ile, C30 D60 ile yaklaşık eşdeğerdir.



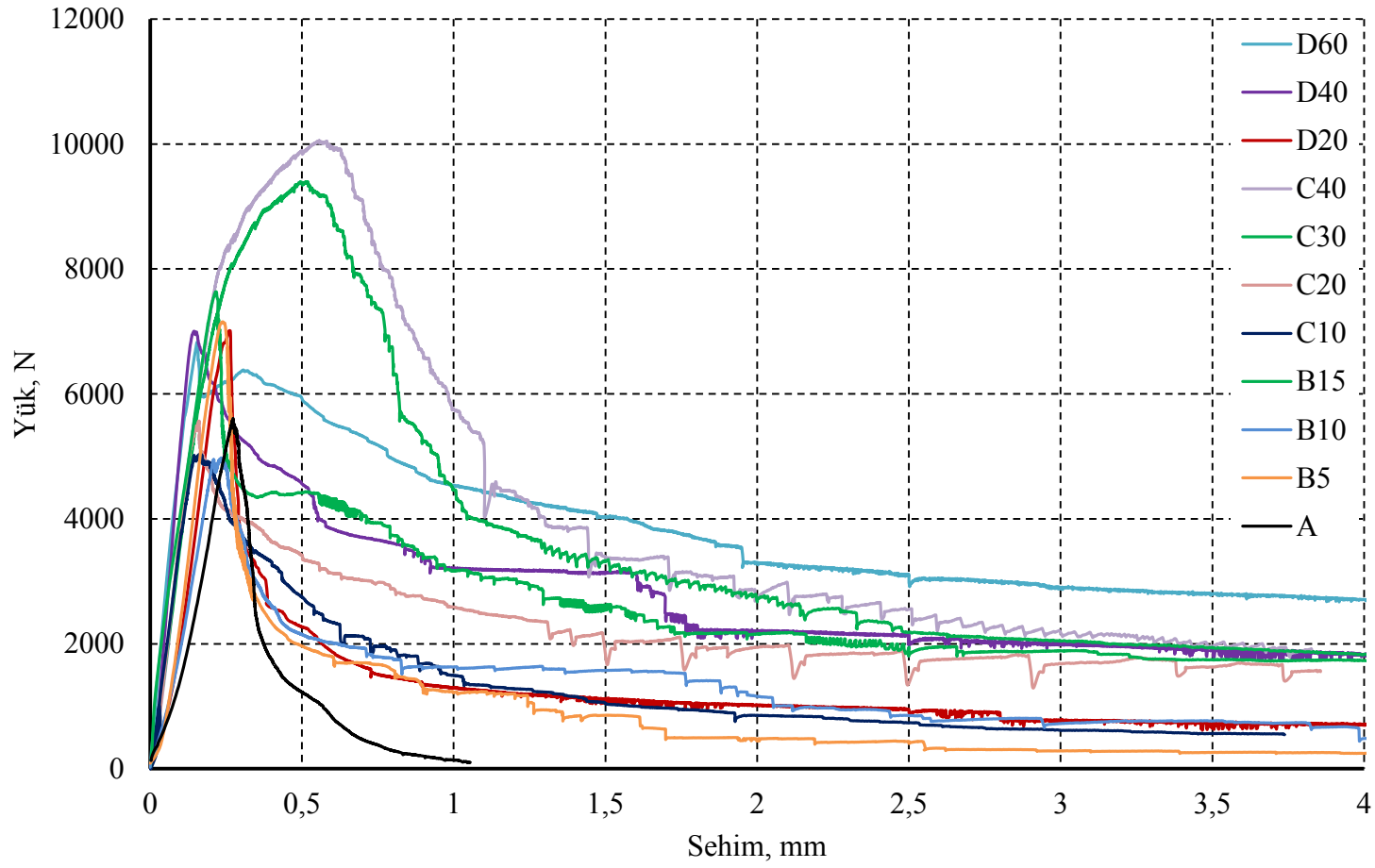
Şekil 5.6 : A, C10, D20 betonlarının yük-sehim eğrileri.



Şekil 5.7 : A, B15, D40 betonlarının yük-sehim eğrileri.



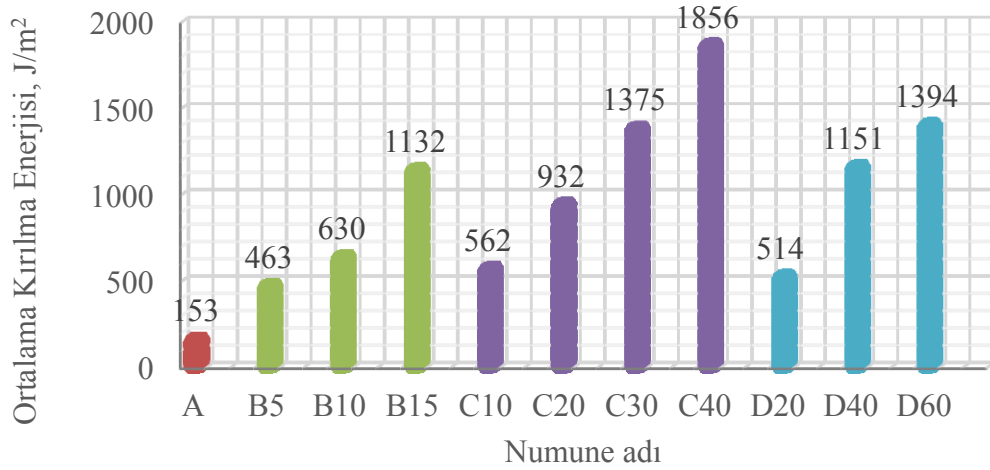
Şekil 5.8 : A, C30, D60 betonlarının yük-sehim eğrileri.



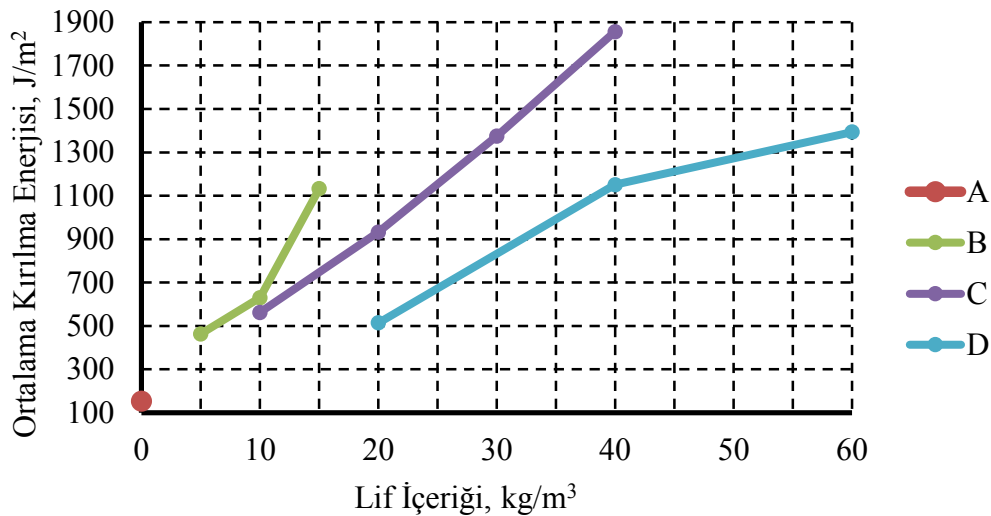
Şekil 5.9 : Her üretimden alınan bir numuneye ait yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması.

5.2.1.2 Kırılma enerjisi

Kırılma enerjileri ile liflerin hacim oranlarının ilişkisini gösteren grafik Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verildi. Atık çelik lif içeriği açısından en yüksek kırılma enerjisi boyluluğu $L/d = 81$ olan C türü lif kullanılan ve lif içeriği 40 kg/m^3 (%0,5) olan beton numunelerinden elde edilmiştir ve lifsiz betonun kırılma enerjisinin 12,2 katıdır. En düşük kırılma enerjisi ise, lifsiz betonun yaklaşık 3 katı olarak B türü boyluluğu $L/d = 164$ olan liflerin kullanıldığı, 5 kg/m^3 (%0,064) lif içerikli beton numunelerinde gözlemlendi.



Şekil 5.10 : Numunelerin ortalama kırılma enerjisi grafiği.



Şekil 5.11 : Numunelerin ortalama kırılma enerjisi-lif içeriği grafiği.

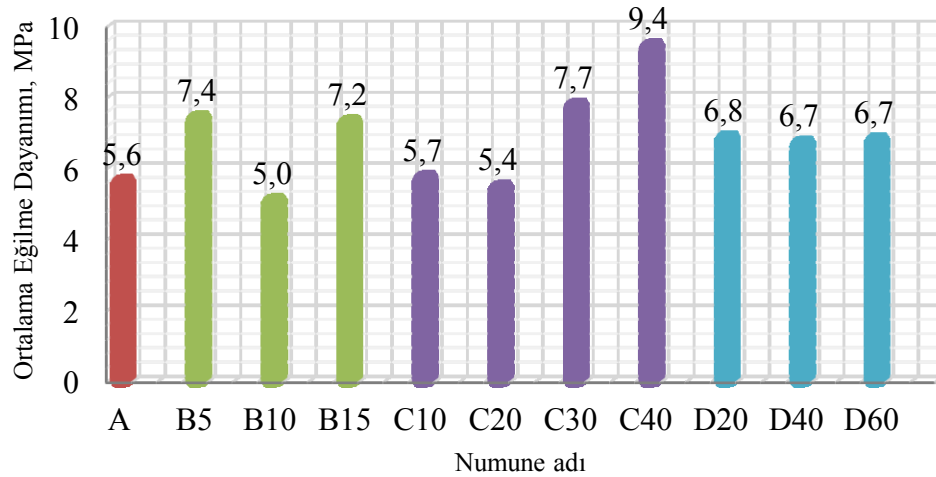
Atık çelik liflerin boylulukları açısından karşılaştırıldığında en yüksek boyluluğa sahip B türü lifle üretilen karışımların tokluğa katkısı en fazla, boyluluğu en düşük olan D türü lifle hazırlanan betonların tokluğuna katkısı en düşüktür.

Genelde atık çelik lif hacim oranı ve boyluluk arttırıldıkça üretilen betonların kırılma enerjileri sürekli bir artış göstermektedir.

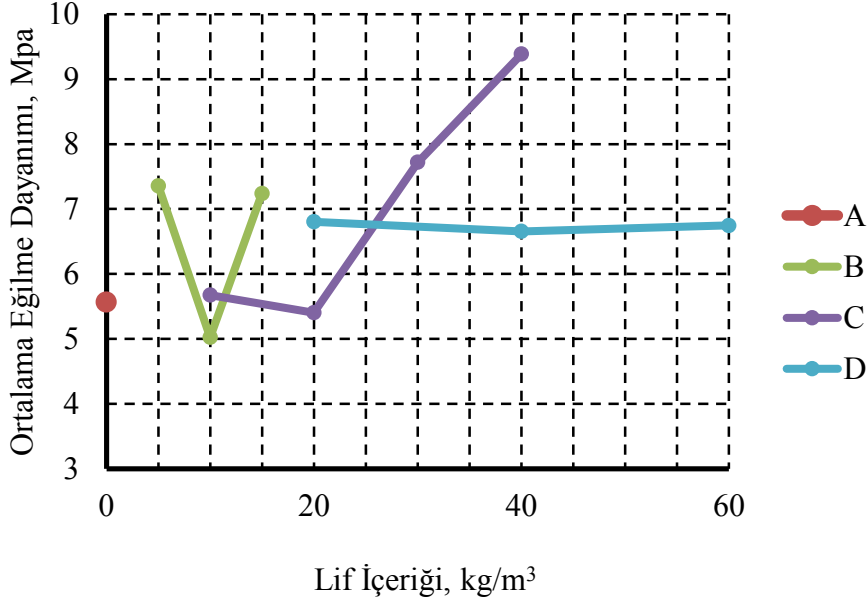
5.2.1.3 Eğilme dayanımı

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de görüldüğü gibi atık çelik lif katılmasıyla betonun dayanımında belirgin bir artış gözlenmektedir. B ve C türü liflerle hazırlanan beton numunelerinde lif içeriğinin ilk arttırılışında lifsiz betonun dayanımının da altına düşmesi beton karışımındaki çelik tel hacminin artması sonucu tellerin gruplaşmasıyla ortaya çıkan karıştırma ve yerleştirmedeki zorluklar sonucu betondaki boşlukların artmasıyla dayanımın düşmesi olabilir. D türü lif kullanılan betonlarda da dayanım ilk arttırılıştaki lifsiz betondan elde edilen dayanımın altına olmasa da azalmıştır.

Lif hacim oranındaki artış 40 kg/m^3 (%0,5)’ün üzerine çıkartıldığında eğilme dayanımı tekrar azalmıştır.



Şekil 5.12 : Numunelerin ortalama eğilme dayanımı grafiği.

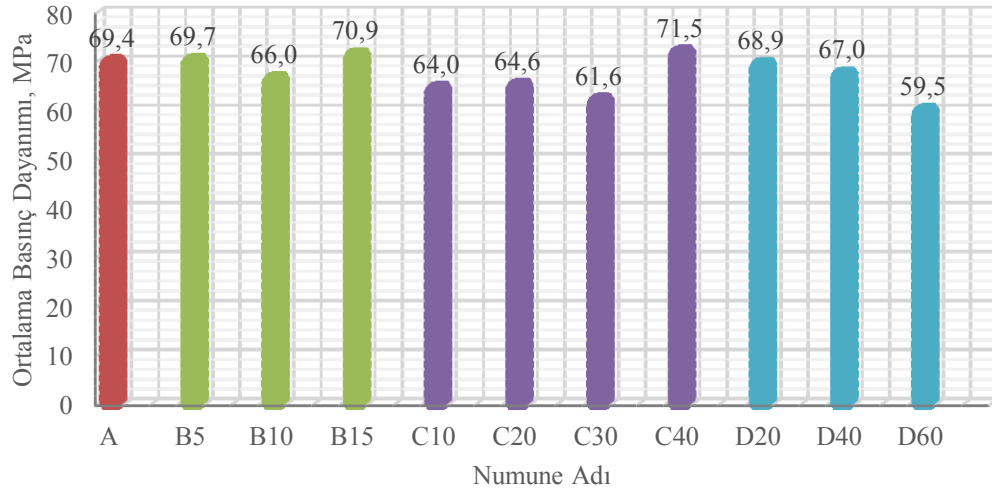


Şekil 5.13 : Numunelerin ortalama eğilme dayanımı-lif içeriği grafiği.

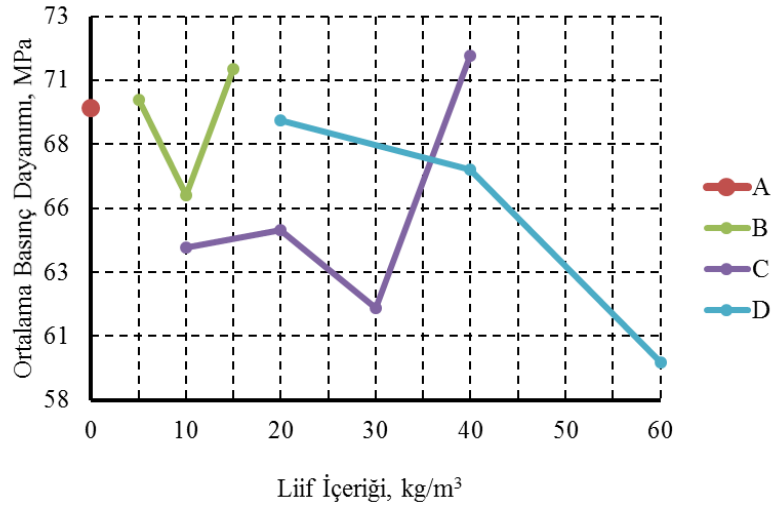
Atık çelik lifin türünün değiştirilmesi yani narinliklerinin etkisi incelendiğinde, narinliği $L/d = 81$ olan, C türü lif lif içeriği 40 kg/m^3 (%0.5) olan beton numunelerinde en yüksek dayanımların elde edildiği gözlemlendi. En düşük eğilme dayanımı B türü Narinliği $L/d = 164$ olan liflerin kullanıldığı, hacim oranı 10 kg/m^3 (%0,13)'lük beton numunelerinde gözlemlenmiştir ve dayanım lifsiz betonun dayanımının da altına düşmüştür.

5.2.2 Basınç dayanımı deneyi

Betonların basınç dayanımının atık çelik lif içeriğine bağlı olarak değişiminin verildiği Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de görüldüğü gibi atık çelik lif katılmasıyla dayanımda bir düşüş görülmekte, lif içeriğinin 10 kg/m^3 (%0,13)'ün üstündeki değerlerinde dayanımdaki bu düşüşün ortadan kalktığı, hattâ nisbî bir yükselme eğiliminin bile görüldüğü izlenmektedir. Ancak homojen bir karışımın sağlanamadığı 40 kg/m^3 (%0,5) lif içeriğinin üzerine çıkıldığında basınç dayanımının tekrar belirgin biçimde düşmeye başladığı gözlemlenmektedir.



Şekil 5.14 : Numunelerin ortalama basınç dayanımı grafiği.



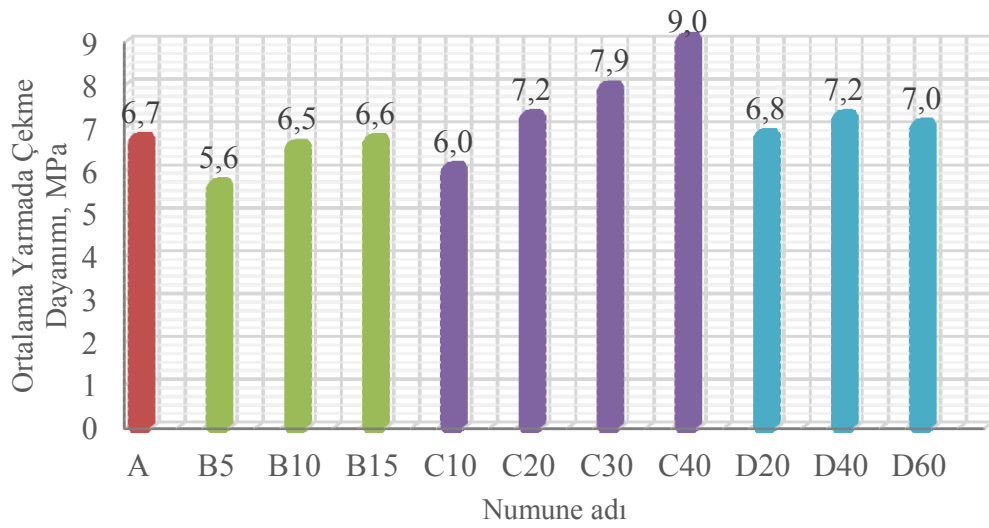
Şekil 5.15 : Numunelerin ortalama basınç dayanımı-lif içeriği grafiği.

Boyluluk açısından çelik liflerin betonun basınç dayanımına en büyük katkısı boyluluğu $L/d = 81$, C türü lif içeriği 40 kg/m^3 olduğunda sağlanabildi. Boyluluğu en düşük ($L/d = 41$) olan D türü lifli numunelerde ise 60 kg/m^3 lif içeriğinde en düşük basınç dayanımı elde edildi.

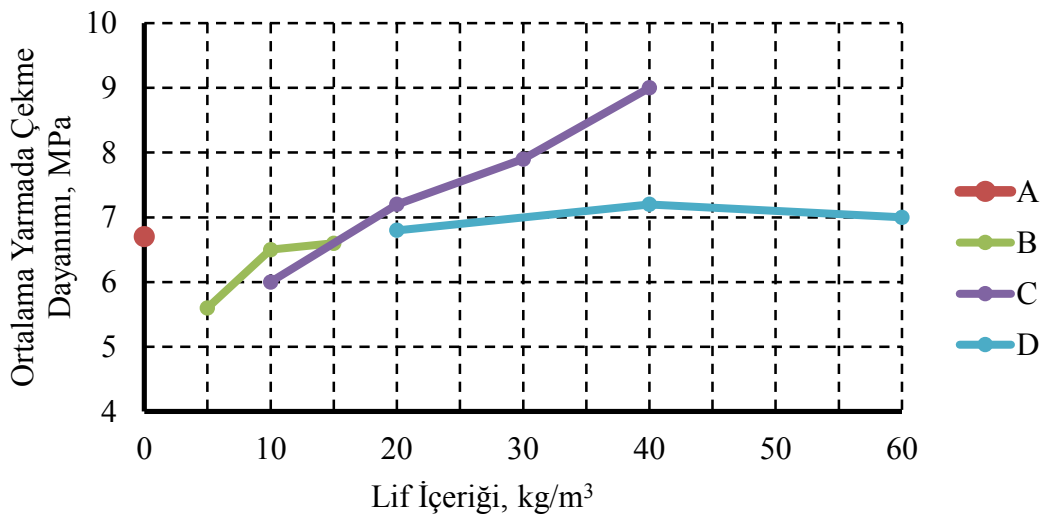
Betona lif katılmasının dayanımı artırıcı etkisi en yüksek %3,03 gibi çok düşük oldu; çoğu numunede yalın betondan daha düşük dayanımlar elde edildi. Sonuç olarak bu çalışmada kullanılan atık çelik tellerin betonların basınç dayanımlarında önemli bir artış oluşturmadığı söylenebilir.

5.2.3 Yarmada çekme dayanımı deneyi

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’deki grafikte görüldüğü gibi atık çelik lif katılmasıyla birlikte dayanımda sürekli bir artış gözlenmektedir. Yarma-çekme dayanımındaki bu artışlara deney sırasında uygulanan kuvvetten dolayı betonda oluşan çatlaklara karşı liflerin göstermiş olduğu köprüleme etkisi neden olabilir. Ancak yarma dayanımının lifsiz betonun dayanımının üstüne çıkması, lif içeriğinin 15 kg/m^3 (% 0,19)’ten büyük olması durumunda gerçekleşti. Atık çelik lif içeriği 40 kg/m^3 (%0.5)’in üzerine çıktığında dayanım düşmeye başlamaktadır.



Şekil 5.16 : Numunelerin ortalama yarmada çekme dayanımı grafiği.



Şekil 5.17 : Numunelerin ortalama yarmada çekme dayanımı-lif içeriği grafiği.

Atık elik lif boyluluğu açısından incelendiğinde betonun yarma-çekme dayanımında en büyük artış %34 olarak boyluluğu $L/d = 81$, C türü 40 kg/m^3 lif içeriğinde gerçekleşti. Aslında boyluluk arttıķa yarma dayanımı artmaktadır, ancak lif içeriği arttıķa işlenebilme uygulamada kullanılamaz düzeylere düşmektedir. En düşük yarma-çekme dayanımı ise %16 azalma olarak $L/d=164$, B türü 5 kg/m^3 lif içeriğinde elde edildi.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada boylulukları farklı üç tür atık çelik lifin beton karışımına değişik içerik düzeylerinde eklenerek üretilen numuneler üzerinde yapılan deneylerle betonun mekanik özelliklerine etkisi araştırıldı. Elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

- Atık çelik lif içeriğinin ve atık çelik lif boyluluğunun artması işlenebilirliği belirgin biçimde azaltmaktadır. Boyluluğu en yüksek olan B ($L/d = 164$) türünde işlenebilme düştü, en düşük olan D ($L/d = 41$) türünde arttı. Lifsiz betona en yakın işlenebilme D20 de sağlandı.
- Atık çelik liflerin boylulukları arttıkça lif içeriğinin yükseltilmesi topaklanma nedeniyle kısıtlandı. B türünde 15 kg/m^3 C türünde 40 kg/m^3 'ten fazla lif kullanılamadı.
- Atık çelik lif içeriğinin arttırılması ve atık çelik liflerin boyluluğunun artması taze beton birim kütlelerini arttırdı.
- Her üç lif türünde de betonlarda lif içeriği arttıkça ilk çatlak yükü, tepe yükü ve ilk çatlak yüküne karşılık gelen sehim değeri arttı. Ayrıca artan lif içeriği ile birlikte ilk çatlak gerilmesindeki sehim değeri ile maksimum çatlak gerilmesindeki sehim değeri arasındaki fark büyüdü. Tepe yükünden sonra aşağı inen yük-sehim eğrisi azalan bir eğimle daha yüksek bir sehime kadar yük taşımaya devam etti.
- Yük-sehim eğrilerinde çatlak ötesi şekil değiştirme davranışlarında lif içeriklerine ve boyluluklarına bağlı olarak değişen davranış farklılıkları görüldü. Lifsiz beton numune çatlak sonrası gevrek bir davranış sergilerken, B ve D türü liflerin kullanıldığı numunelerde şekil değiştirme yumuşaması, C türü liflerin kullanıldığı numunelerde ise düşük lif hacim oranlarında (C10 ve C20) şekil değiştirme yumuşaması, yüksek hacim oranlarında (C30 ve C40) önce şekil değiştirme sertleşmesi ardından şekil değiştirme yumuşaması gözlemlendi.

- Atık çelik lif içerikleri ve boylulukları arttıkça betonların kırılma enerjileri sürekli bir artış göstermekte; daha sünek davranan betonlar elde edilmektedir. En yüksek kırılma enerjisi C40 kodlu numunede 1856 J/m^2 (lifsiz betonun 12.2 katı) ve en düşük kırılma enerjisi B5 kodlu numunede 463 J/m^2 (lifsiz betonun 3 katı) olarak hesaplandı.
- Atık çelik lif içeriğinin ve lif boyluluğunun artması eğilme dayanımını belirgin biçimde arttırmaktadır. En yüksek dayanım C40 (9,4 MPa) kodlu numunede en düşük dayanım ise B10 (5 MPa) kodlu numunede elde edilmiştir.
- Betona atık çelik lif katılmasının dayanıma katkısı en yüksek %3.03 gibi çok düşük oldu, çoğu numunede yalın betondan daha düşük dayanımlar elde edildi. Basınç dayanım deneyi sırasında numunelerde dağılma olmaması lif boyluluğunun, lif içeriklerinin arttırılmasının ve liflerin olası yönlenmesinin basınç dayanımına belirgin bir katkı sağlamasa da basınç göçmesindeki sünekliğin artmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir.
- Betona katılan atık çelik lif içeriğindeki artış betonun yarma dayanımına önemli bir katkıda bulunmaktadır. Ancak yarma dayanımının lifsiz betonunkinin üstüne çıkması 15 kg/m^3 (hacmen %0,19) lif içeriğinin üstüne çıkılmasıyla gerçekleşti.
- En yüksek yarma dayanımları C türü lifli numunelerde elde edildi. C40 kodlu numunede lifsiz betona göre %35 artış gözlemlendi. En yüksek narinliğe sahip kıvrık ve dalgalı olan B türü numunelerdeki dayanımların lifsiz betonun da altında kaldığı gözlemlendi. Düşük dayanımın sebebinin boyluluktan çok lifin geometrisine bağlı olduğu düşünülmektedir.

Öneriler:

- Deneysel çalışma kapsamında üretilen tüm karışımlarda etkin su/çimento oranı 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Farklı oranlar kullanılarak da deneysel çalışmalar yapılabilir.
- Atık çelik liflerle ürettiğimiz beton numuneler üzerinde yaptığımız deneylerin dışında kalan darbe dayanımı ve yorulma gibi deneylerin yapılması araştırmaların bütünlüğü açısından verimli olacaktır.
- Atık çelik lif türü; çap, narinlik, geometri, üretim tesisinde geçirdiği işlemler dolayısıyla çok çeşitlilik göstermektedir. Geri dönüşüm ürünü çelik liflerle ilgili karakteristik özelliklerin araştırılması ve bir sınıflandırmaya gidilmesi konusunda çalışmalar yapılmalıdır. Bunun için hem beton teknolojisinde hem de geri dönüşüm teknolojisinde çalışan uzmanların işbirliği yapması; maliyetleri düşürerek, endüstriyel atıkların geri dönüşümünün teşvik edilmesine ve çevrenin korunmasına ciddi katkılar sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Neville, A.M.** (2011). Properties of Concrete, Pearson, London.
- [2] **Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M.** (2001). Concrete: Microstructure, Properties and Materials.
- [3] **ACI Committee 544.** (1996). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.1R-96.
- [4] **Köksal, F.** (2004). Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004.
- [5] **Taşdemir, M.A., Şengül, Ö. ve Şengül, C.** (2013). “Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı”, Beton 2013, Türkiye Hazır Beton Birliği, 21-24 Şubat 2013, İstanbul, s. 1 – 28 (çağrılı bildiri).
- [6] **Bayramov F., İlki A., Taşdemir C., Taşdemir M.A., Yerlikaya M.** (2004). SFRCs for Concrete Roads in Heavily Trafficked Situations, 9th International Symposium on Concrete Roads, 2, Istanbul, Turkey, 73-82, April 4-7.
- [7] **ACIFC,** (1999). Steel Fibre Reinforced Concrete Industrial Ground Floors, Association of Industrial Flooring Contractors, Warwickshire.
- [8] **Taşdemir, M.A., İlki, A., Yerlikaya, M.** (2002). Mechanical Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Used in Hydraulic Structures, Proceedings of HYDRO 2002: International Conference of Hydropower and Dams, Antalya, Turkey, 159-166, November 4-7.
- [9] **Taşdemir, M.A., Bayramov F.** (2002). Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, İTÜ dergisi/d Cilt 1, Sayı 2, 125-144, Aralık.
- [10] **Arslan, A., Aydın, A.C.** (1999). Lifli Betonların Darbe Etkisi Altındaki Genel Özellikleri, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 44-53, 24 Kasım.
- [11] **Taşdemir, M.A., Bayramov F., Yerlikaya, M.** (2003). Geleneksel Ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar TMH- Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 426 - 2003/4 sayfa 76-84.
- [12] **Yakaboylu, O.** (2010). Atık Lastik Yönetimi ve Atık Lastik Pirolizi Model Tesisi İçin Yapılabilirlik Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [13] **Francesco Micelli*, Marianovella Leone, Giuseppe Centonze and Maria Antonietta Aiello, Yang Lu.** (April, 2014). Infrastructure Corrosion and Durability- A Sustainability Study, Chapter: Go Green: Using Waste and Recycling Materials, Published by OMICS Group eBooks 731 Gull Ave, Foster City. CA 94404, USA www.esciencecentral.org/ebooks.
- [14] **Ertas, T.** (1997), Zararlı Atıkların Ozon ile Oksidasyonu. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul
- [15] **Enviromental Solutions for Waste Recycling** web sitesi. Alındığı tarih: 07.06.2010, adres: <http://www.europeanrecycle.com>
- [16] **Ünal, O., Uygunoğlu, T., Gençel, O.** (2007), “Çelik Liflerin Beton Basınç ve Eğilme Özelliklerine Etkisi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 13, Sayı 1, Sayfa 23-30)
- [17] **Balaguru, P.N., Shah, S.P.** (1992). Fiber-Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, Inc.
- [18] **TS10153.** (1992). Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [19] **Balaguru, P.N., Narahari, R., Patel, M.** (1992). Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 89 (6), 541-545.
- [20] **Ramakrishnan, V., Wu, G.Y., Hosalli, G.** (1989). Flexural Behavior and Toughness of Fiber Reinforced Concretes" , Transportation Research Record, No. 1226, 6977.
- [21] **Soroshian, P., Bayasi, Z.** (1991). Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 88 (2), 129-134.
- [22] **Otter, D.E.** (1988). Naaman, A. E., Fiber Reinforced Concrete Under Cyclic and Dynamic Compression Load, Research Report, No. UMCE 88-9, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 178 pp.
- [23] **Swamy, R.N., Mangat, P.S.** (1974). Influence of Fibre-Aggregate Interaction of Some Properties of SFRC, Materials and Structures, 7(41), 307-313.
- [24] **Swamy, R.N.** (1971). Fibre Reinforcement of Cement and Concrete Evaluation of Fibre Reinforcement Cement and Composites, Materials and Structures, 19 FRC Committee, 8(45), 235-254 .
- [25] **Köksal, F., Eyyubov, C., Özcan, D.M.** (2004). Çelik Tel İçeriğinin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi", 5. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, İstanbul, Türkiye, 169-179.
- [26] **Ünal, O.** (1999). Isıl İşlem Uygulanmasının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 72-79, 24 Kasım.
- [27] **ACI Committee 544.** (1993). Guide for Specifying, Mixing, Placing and Finishing Steel Fibre Reinforced Concrete (ACI544.3R-93), ACI Materials Journal, 90(1), 94101.

- [28] **Hartmann, T.** (1999). Steel Fibre Reinforced Concrete, Stockholm.
- [29] **Acun, S.** (2000). Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- [30] **Chang, D-I., Chai, W-K.** (1995). Flexural Fracture and Fatigue Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Structures, Nuclear Engineering and Design, 156, 201207.
- [31] **Chenkui H., Guafon Z.** (1995). Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete, Cement and Concrete Composites, 17,199-206.
- [32] **Eren, Ö., Çelik T.** (1997). Effect of Silica Fume and Steel Fibres on Some Properties of High-Strength Concrete, Construction and Building Materials, 11(7), 373-382.
- [33] **Yıldırım, M.A.** (1994). Hafif ve Yarı Hafif Betonlarda Çelik Tel Kullanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] **Taylor, M., Lydon, F.D., Barr, B.I.G.** (1997). Toughness Measurement on Steel Fibre Reinforced High Strength Concrete, Cement and Concrete Composites, 19, 329340.
- [35] **Bayramov, F. Taşdemir, C., Taşdemir, M.A.** (2002) Optimum Design of Cement Based Composite Materials Using Statistical Response Surface Methodology”, Fifth International Congress on Advanced in Civil Engineering, ITU, İstanbul, Turkey, 725-734, September 25-27.
- [36] **Johnston, C. D., Zemp, R. W.** (1991). Flexural Fatigue Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete - Influence of Fiber Content, Aspect Ratio and Type, ACI Materials Journal, 88(4), 374-383.
- [37] **Ramakrishnan, V., Wu, G.Y., Hosalli, G.** (1989) Flexural Fatigue Strength, Endurance Limit, and Impact Strength of Fiber Reinforced Concretes, Transportation Research Record, No.1226.
- [38] **Miao, C., Mu, R., Tian, Q., Sun, W.** (2002). Effect of Sulfate Solution on the Frost Resistance of Concrete with and without Steel Fibre Reinforcement, Cement and Concrete Research, 32, 31-34.
- [39] **Betterman, L.R., Ouyang, C., Shah, S.P.** (1995). Fiber Matrix Interaction in Microfiber Reinforced Mortar, Advanced Cement Based Materials, 2, 53-61.
- [40] **Taşdemir, M.A.** (2000). Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. Tarafından Getirilen Dramix Çelik Tel Donatılı Beton Plaklar Üzerinde Yapılan Deneyler ile İlgili, Teknik Rapor 1, Proje No: 2000/323, İTÜ, İstanbul.
- [41] **Taşdemir, M.A.** (2000). Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. Tarafından Getirilen Dramix Çelik Tel Donatılı Beton Plaklar Üzerinde Yapılan Deneyler ile İlgili, Teknik Rapor 2, Proje No: 2000/323, İTÜ, İstanbul.
- [42] **Trottier, J.F., Banthia, N.** (1994). Toughness Characterization of Steel Fiber Reinforced Concrete, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 6(2), 264-289.

- [43] **Ezeldin, A.S., Balaguru, P.N.** (1989). Bond Behavior of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 86(5), 515-524.
- [44] **Taerwe, L. R.**(1992). Influence of Steel Fibers on Strain-Softening of High-Strength Concrete, *ACI Materials Journal*, 89(1), 54-60.
- [45] **Williamson, G.R.** (1974). The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete, A State-of-art Report, ACI SP-44, American Concrete Institute, Detroit, MI, 195-207.
- [46] **Lim, D.H., Oh, B.H.** (1999). Experimental and Theoretical Investigation on the Shear Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams, *Engineering Structures*, 21, 937-944.
- [47] **Gao, J., Sun, W., Morino, K.** (1997). Mechanical Properties of Steel Fibre Reinforced High-Strength Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 19, 307-313.
- [48] **Song, P., S., Hwang, S.** (2004). Mechanical Properties of High-Strength Steel Fibre Reinforced Concrete, *Construction and Building Materials*, 18, 669-673.
- [49] **Banthia, N., Trottier, J.F., Beaupre, D., Wood D.** (1994). Properties of Steel Fibre Reinforced Shotcrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21, 564-575.
- [50] **Yang, Q., Zhu, B.** (2005). Effect of Steel Fiber on the Deicer-Scaling Resistance of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 35, 2360-2363.
- [51] **Paul Z, Shuaib A., Michael L.** (1996). High-Performance Concretes a State-of-art Report (1989-1994) FHWA-RD-97-030.
- [52] **Sofren, L., S., Takashi, H.** (2006). Effect of Short Fibres on Residual Permeability and Mechanical Properties of Hybrid Reinforced High Strength Concrete After Heat Exposition, *Cement and Concrete Research*, 36, 1672-1678.
- [53] **ASTM C 1018.** (1992). Standard Test Methods for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (using beam with third point loading), American Society for Testing and Materials, USA.
- [54] **RILEM Technical Committee 50-FMC.** (1985) Draft Recommendation: Determination of the fracture energy mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams, *Materials and Structures*, 18(106), 287-291.
- [55] **RILEM TC 162-TDF.** (2000). Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, RILEM, 2000.
- [56] **Moyson, D., Nemegeer, D.** (1994). Vandewalle, M., The Design of Steel Fibre Reinforced Concrete Tunnel Linings, Technical Report, March, Belgium.
- [57] **Balendran, R.V., Zhou, F.P.** (2002). Influence of Steel Fibres on Strength and Ductility of Normal and Lightweigh High Strength Concrete, *Building and Environment*, 6, 255-258.

- [58] **Peng, G., F. et al.** (2006). Explosive Spalling and Residual Mechanic Properties of Fiber Toughened High Performance Concrete Subjected to High Temperatures, *Cement and Concrete Research*, 36, 723-727.
- [59] **Appa Rao, G., Raghu Prasad, B. K.** (2002). Fracture Energy and Softening Behavior of High-Strength Concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 247-252.
- [60] **Van Gaysel, A.** (1999). A Pull-Out Model for Hooked-End Steel Fibres, *High Performance Fibre Reinforced Composites (HPFRCC3)*, pp. 351-359, Reinhardt, H.W., Naaman A.E.,(eds.), RILEM Publishers.
- [61] **Sullivan, A.P.** (1999). The Effect of Hydro-Thermal Curing at 90°C and the Use of 13 mm Steel Fibres on Reactive Powder Concrete, Master of Science Thesis, University of Wales, Cardiff.
- [62] **G. Centonze, M. Leone, M.A.** (2012). Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization, *Construction and Building Materials*, Volume 36, November 2012, Pages 46–57.
- [63] **Syaidathul Athira Rossli, Izni Syahrizal Ibrahim.** (2013). Mechanical Properties of Recycled Steel Tire Fibres in Concrete. <http://civil.utm.my/iznisyahrizal/files/2013/02/Technical-Report-1.pdf>
- [64] **Heneger, C.H.** (1978). Toughness Index of Fibre Concrete, *RILEM Symposium on Testing and Test Methods of Fiber Cement Composites*, pp. 79-86, Contruction Press, Lancaster, UK.
- [65] **TS EN 197-1.** (2011). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler Ve Uygunluk Kriterleri.
- [66] **TS 10514.** (1992). TS 10514, Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1992.
- [67] **Şahin, Y.** (2007). Çelik Tel Dayanımının Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- [68] **Pay, E.** (2009). Taşıt Lastiklerinin Tasarım Ve Üretim Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [69] **T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı,** (2006). 26357 sayılı Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği, T.C. Resmî Gazete, 25 Kasım 2006.
- [70] **Banthia, N., Trottier, J-F.** (1995). Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers Part II: Toughness Characterization, *ACI Materials Journal*, 92 (2), 146-154.
- [71] **Shah, S. P., Rangan, B.V.** (1971). Fiber Reinforced Concrete Properties, *ACI Materials Journal*, 68 (2), 126-135.
- [72] **Düzgün, O. A., Gül, R., Aydın, A.C.** (2005). Effect of Steel Fibers on the Mechanical Properties of Natural Lightweight Aggregate Concrete, *Materials Letters*, 59, 3357-3363.
- [73] **JSCE-SF4 Standart.** (1984). Standart for flexural strength and flexural toughness, methods of test for steel fiber reinforced concrete, Japan Concrete Institute.

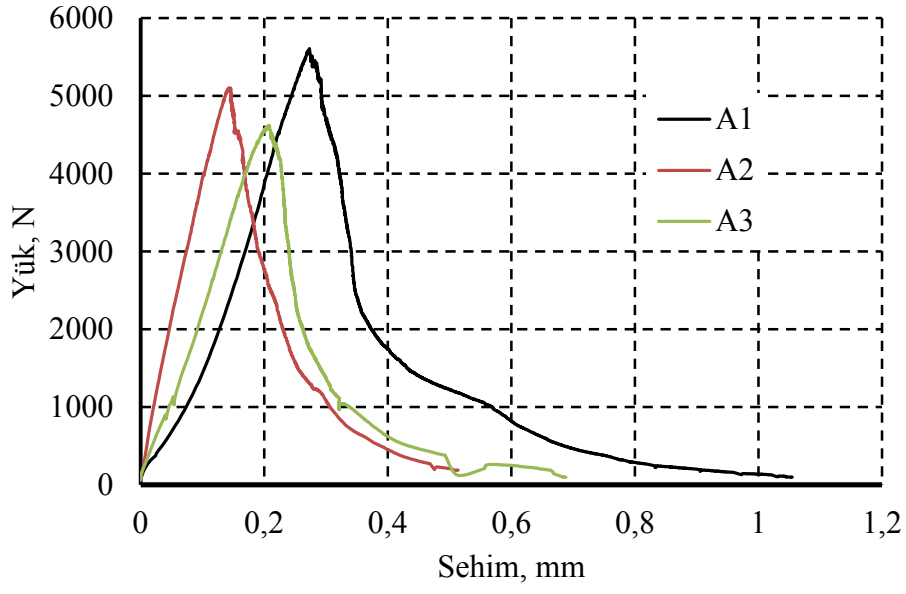
EKLER

EK A: Numunelerin Yük-Sehim Eğrileri

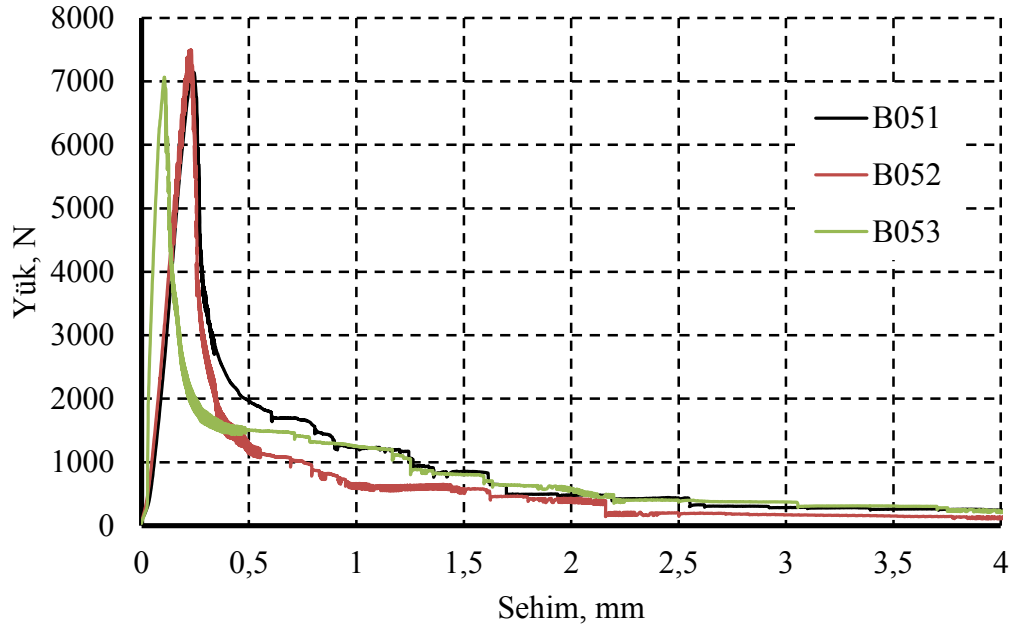
EK B: Numunelerin Yük-Çatlak Ağız Açılma Deplasmanı Eğrileri

EK C: Numunelerin Gerilme-Sehim Eğrileri

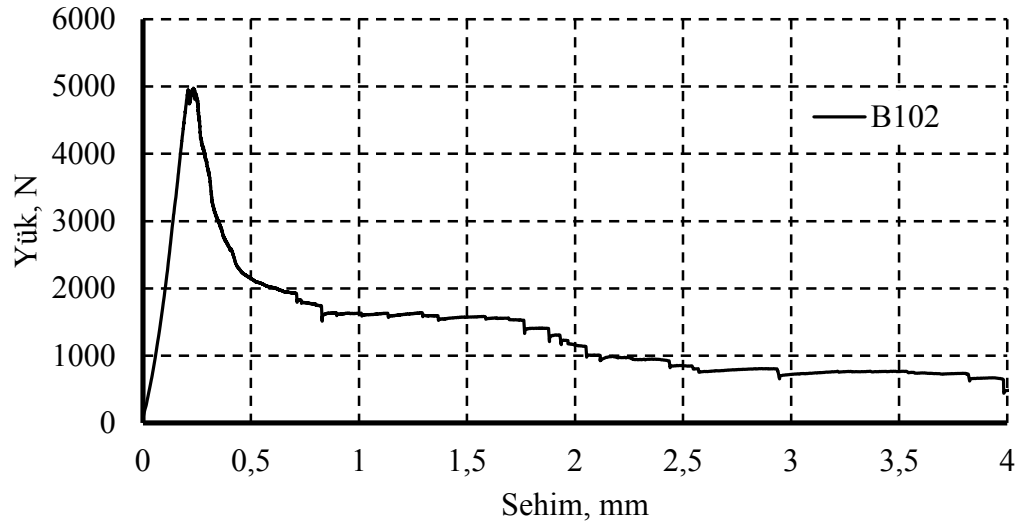
EK A : Numunelerin Yük-Sehim Eğrileri



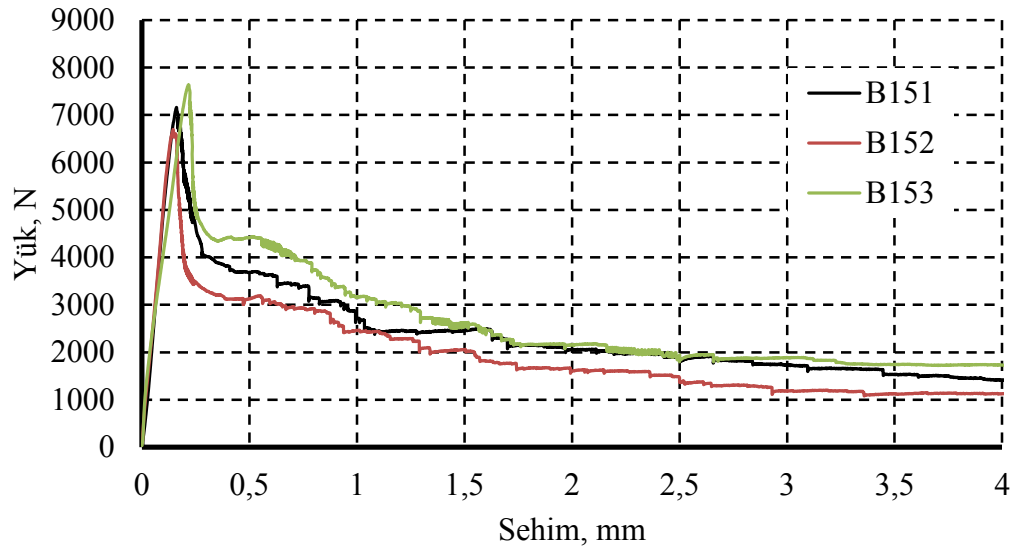
Şekil A.1 : A1, A2, A3 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



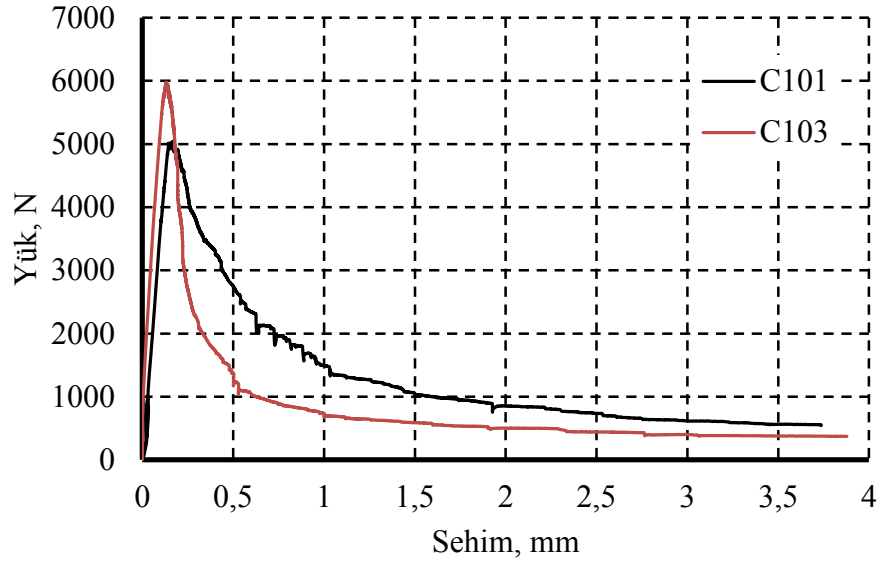
Şekil A.2 : B051, B052, B053 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



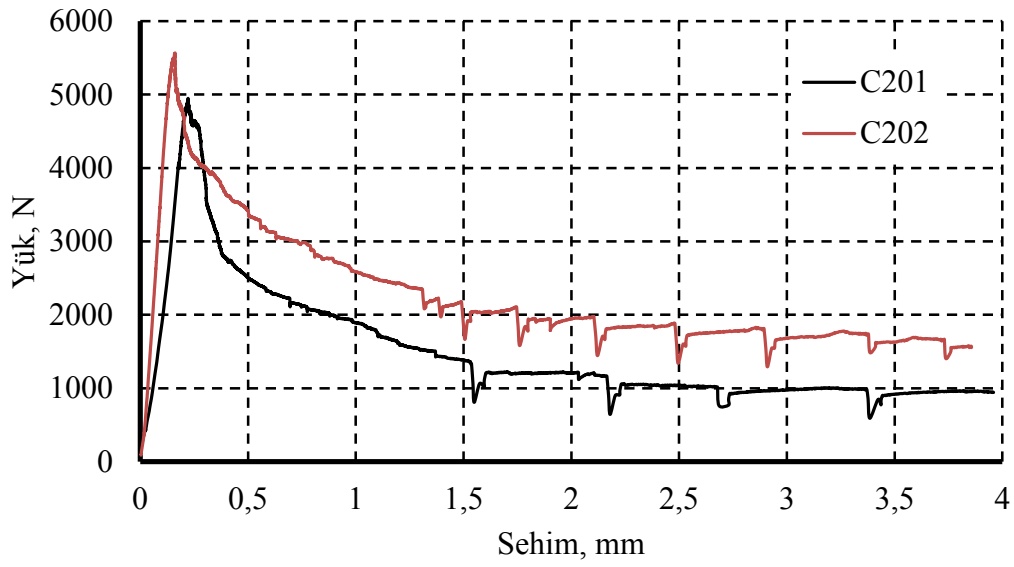
Şekil A.3 : B102 numunesinin yük-sehim eğrisi.



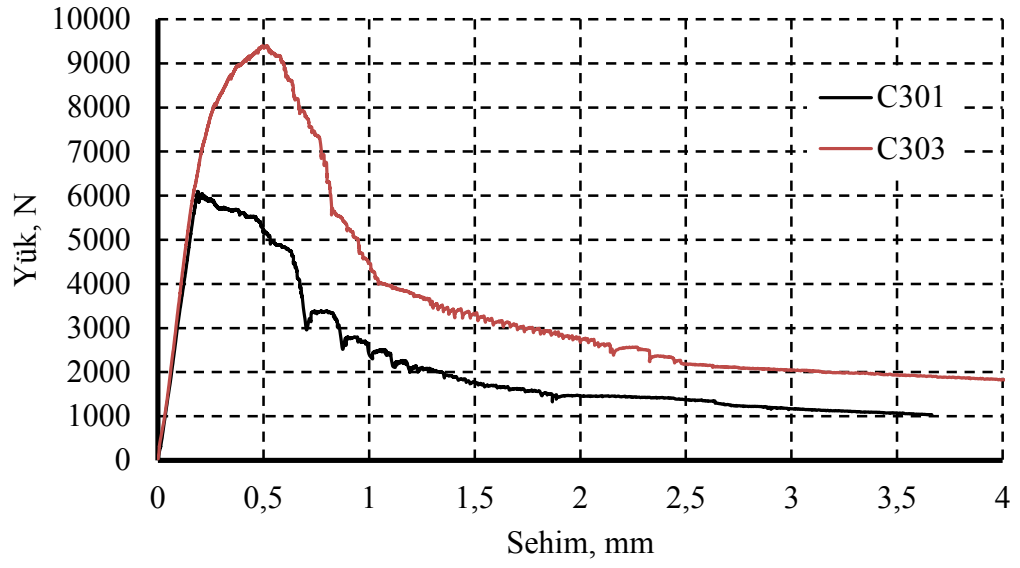
Şekil A.4 : B151, B152, B153 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



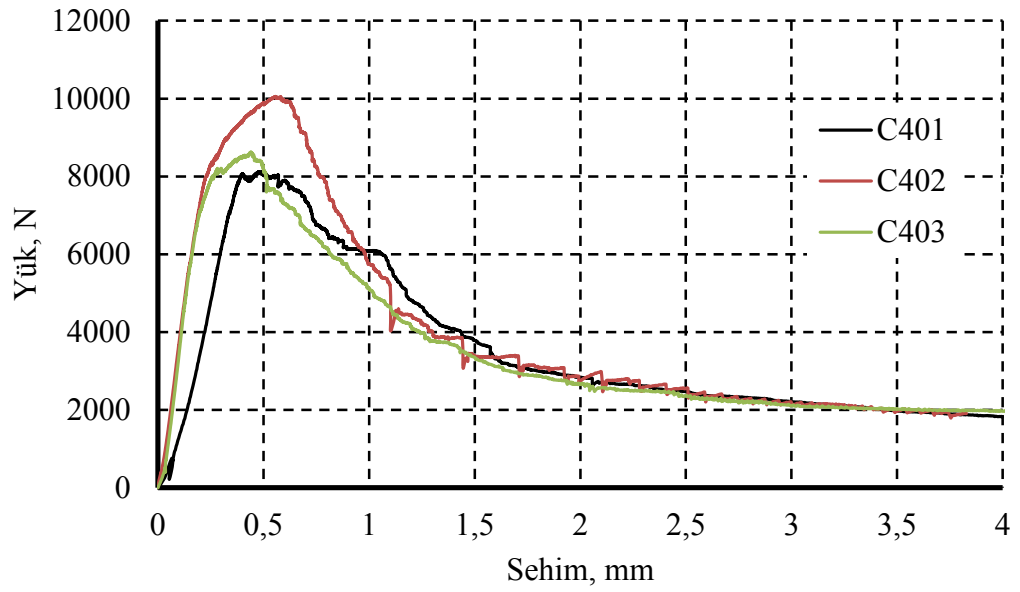
Şekil A.5 : C101, C103 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



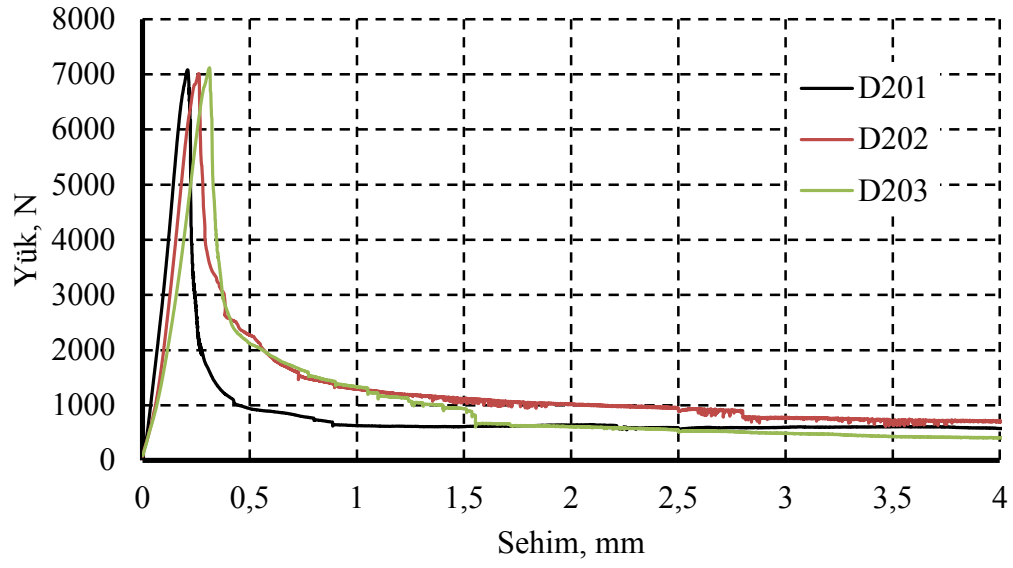
Şekil A.6 : C201, C202 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



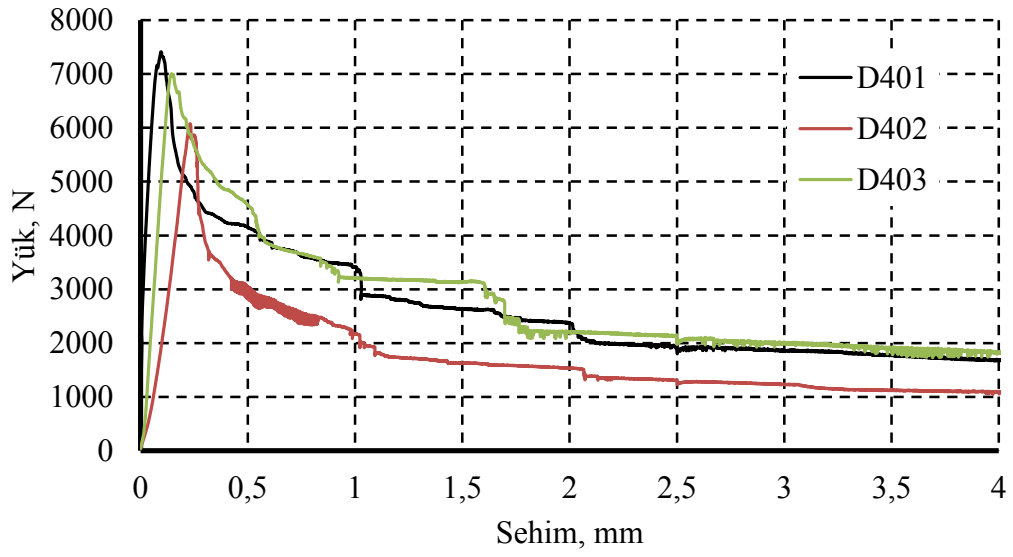
Şekil A.7 : C301, C303 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



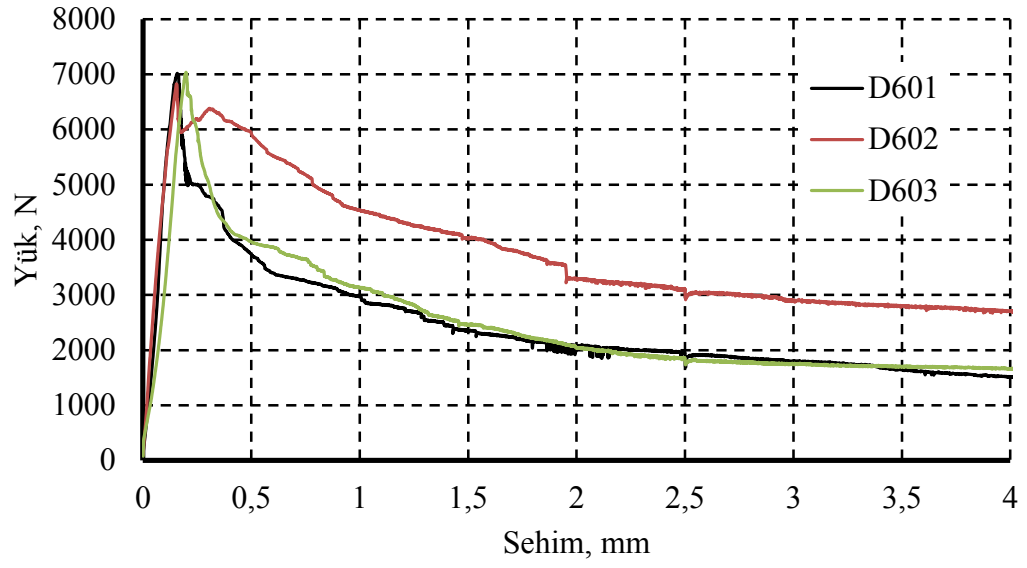
Şekil A.8 : C401, C402, C403 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



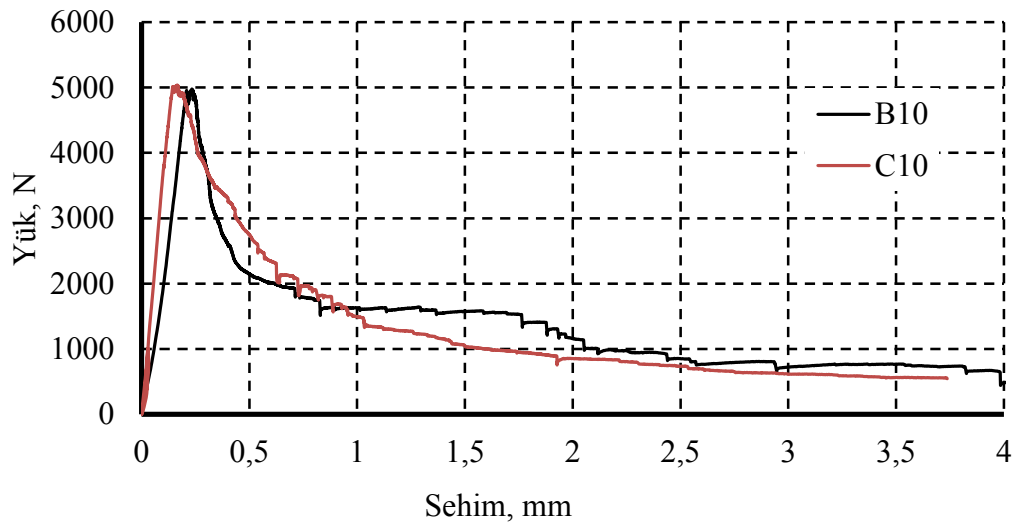
Şekil A.9 : D201, D202, D203 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



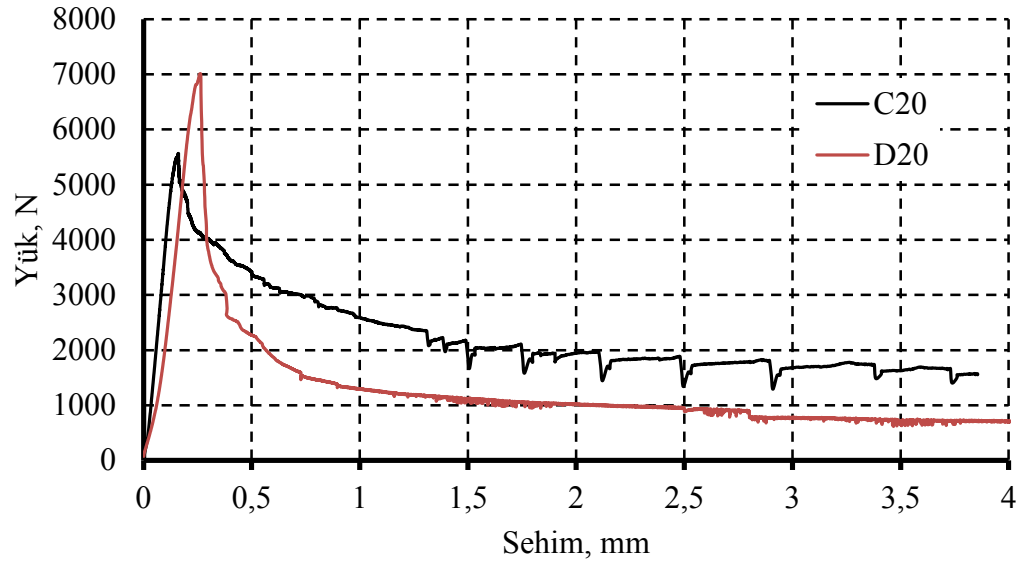
Şekil A.10 : D401, D402, D403 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



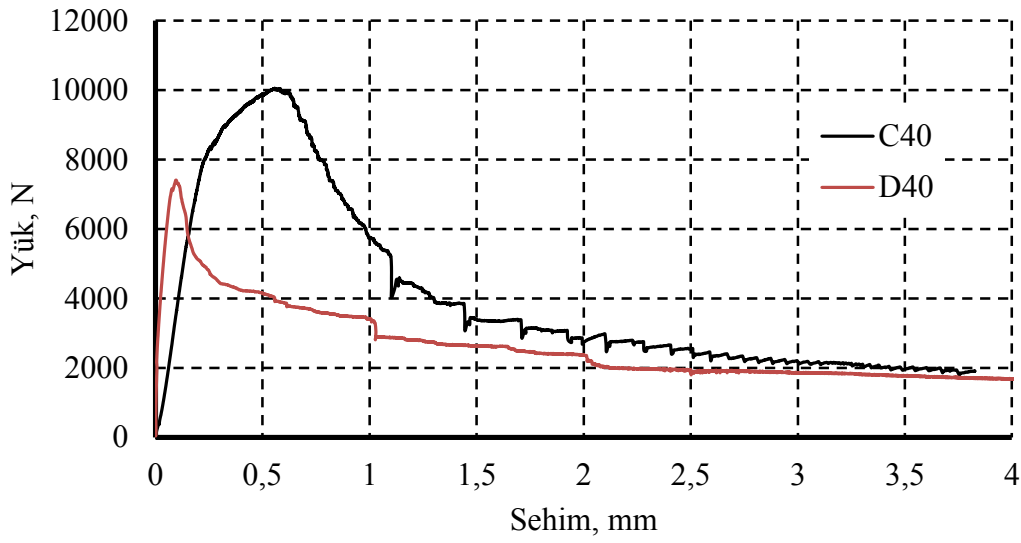
Şekil A.11 : D601, D602, D603 numunelerinin yük-sehim eğrileri.



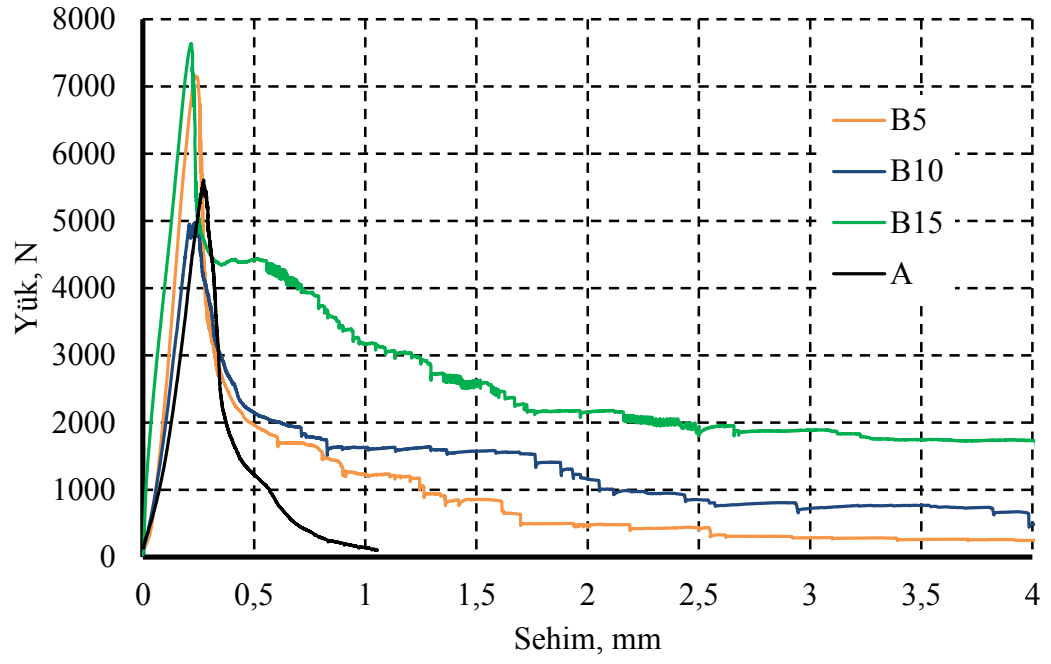
Şekil A.12 : B10, C10 karışımlarından alınan birer numunenin yük-sehim eğrileri.



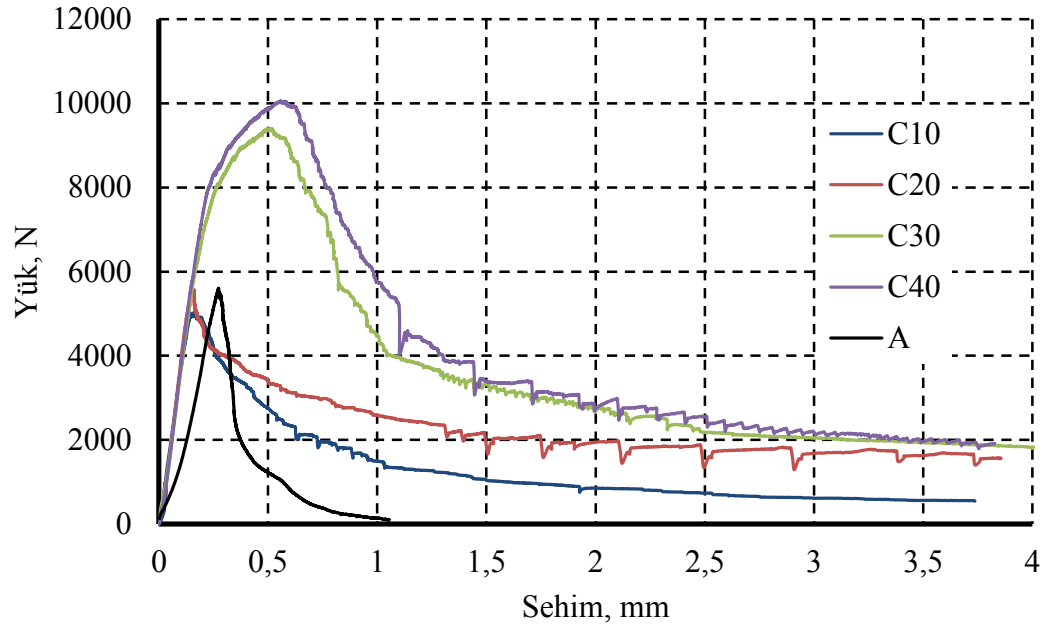
Şekil A.13 : C20, D20 karışımlarından alınan birer numunenin yük-sehim eğrileri.



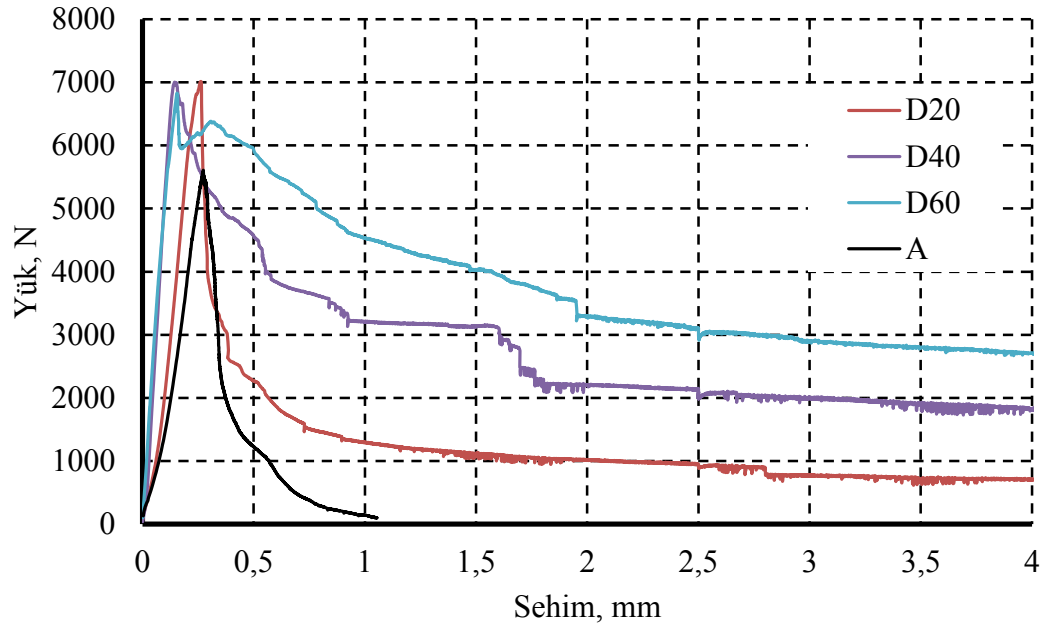
Şekil A.14 : C40, D40 karışımlarından alınan birer numunenin yük-sehim eğrileri.



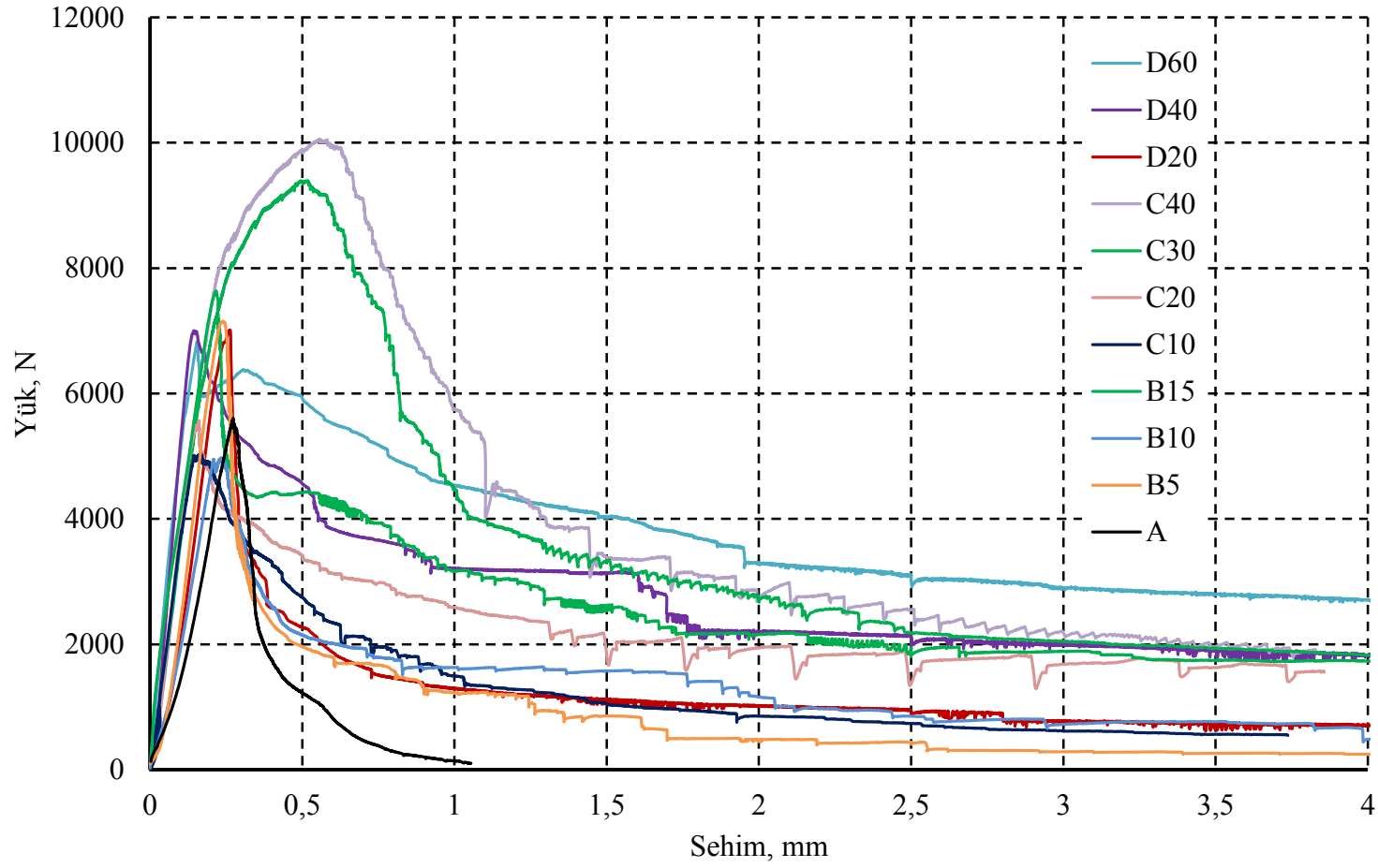
Şekil A.15 : A, B5, B10, B15 karışımlarından birer numunenin yük-sehim eğrileri.



Şekil A.16 : A, C10, C20, C30, C40 karışımlarından birer numunenin yük-sehim eğrileri.

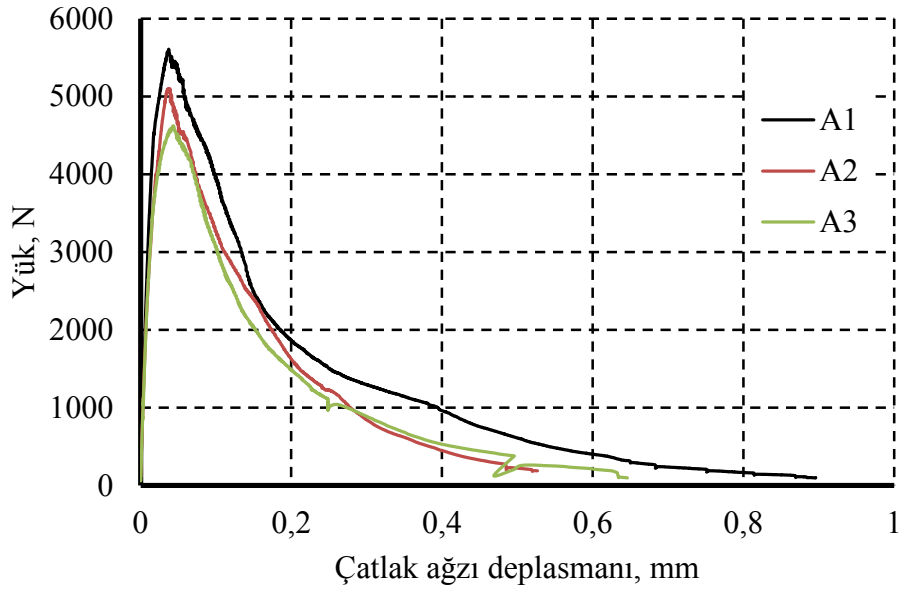


Şekil A.17 : A, D20, D40, D60 karışımlarından alınan birer numunenin yük-sehim eğrileri.

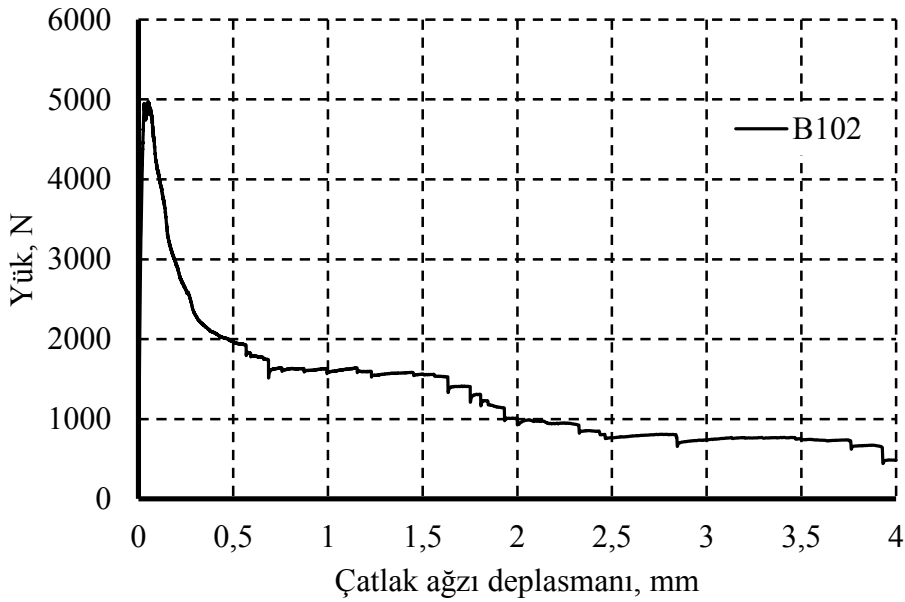


Şekil A.18 : Her üretimden alınan birer numunenin yük-sehim eğrilerinin karşılaştırması.

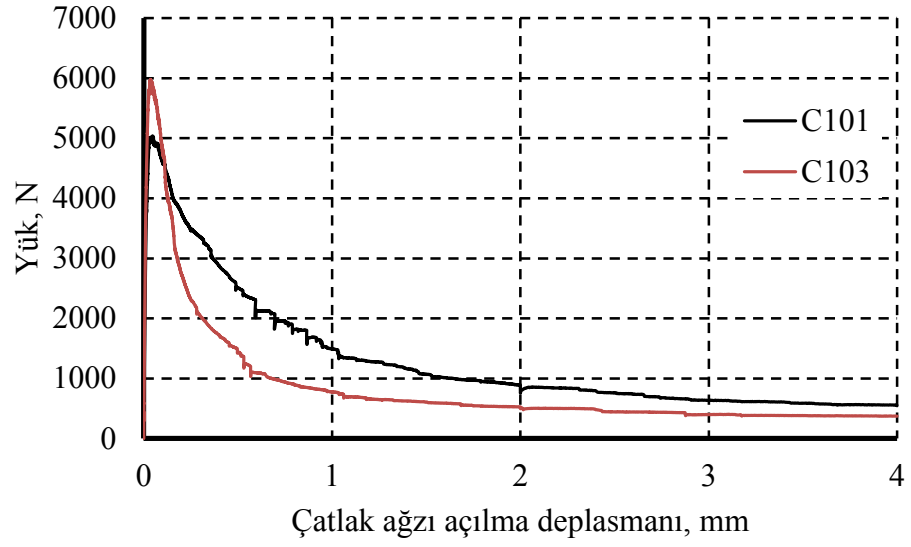
EK B: Numunelerin Yük-Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı Eğrileri



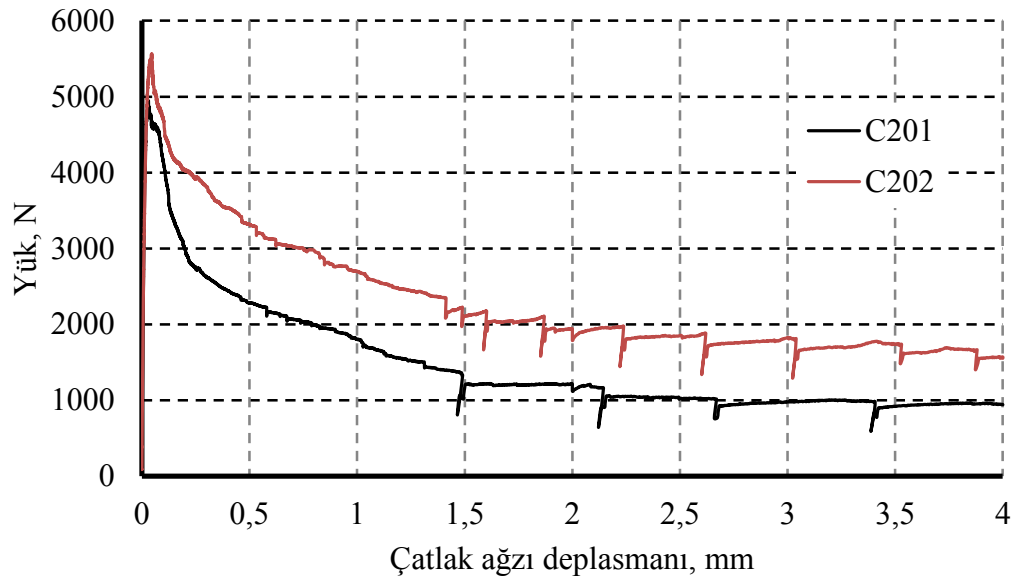
Şekil B.1 : A1, A2, A3 numunelerinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri.



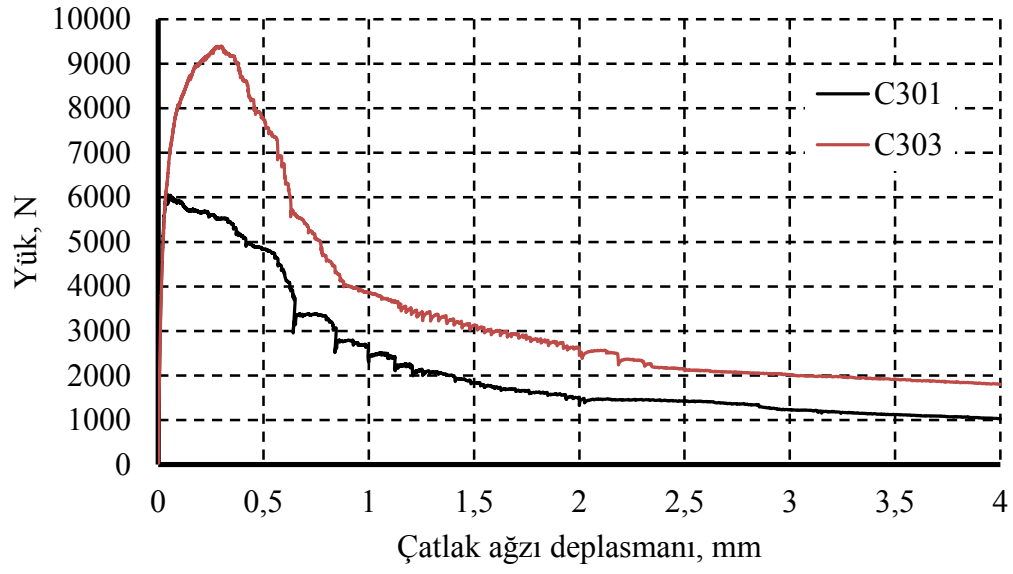
Şekil B.2 : B102 numunesinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri.



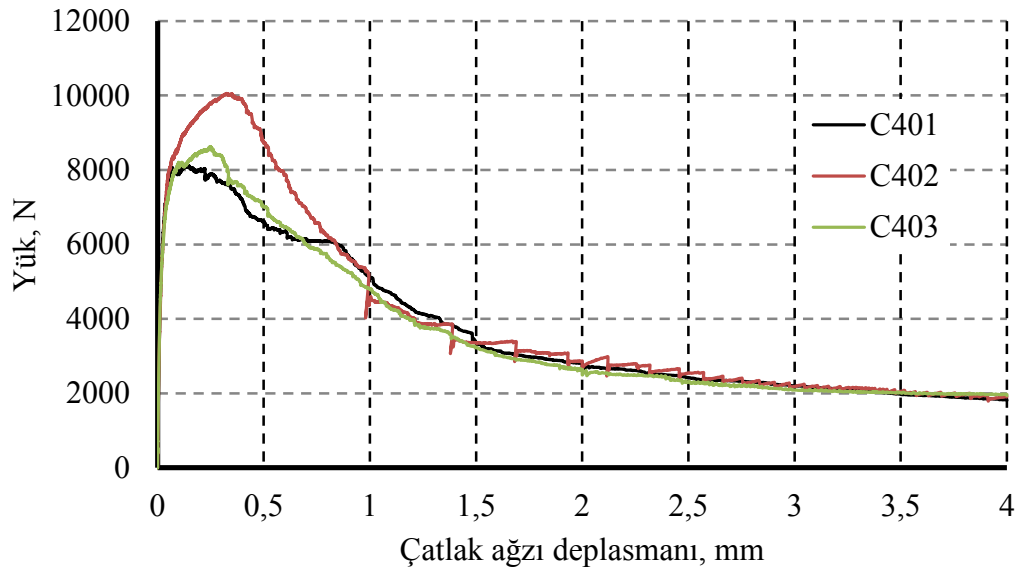
Şekil B.3 : C101, C103 numunelerinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri.



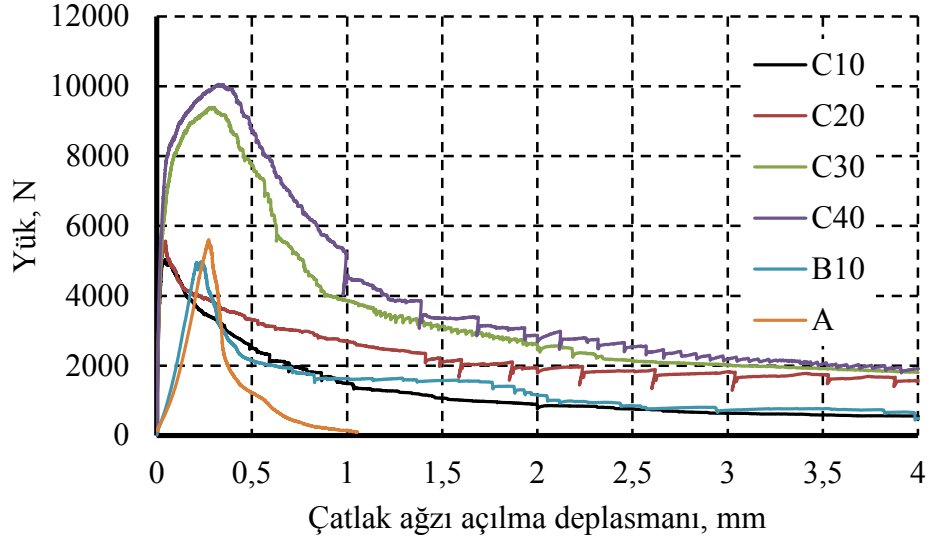
Şekil B.4 : C201, C202 numunelerinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri.



Şekil B.5 : C301, C303 numunelerinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri.

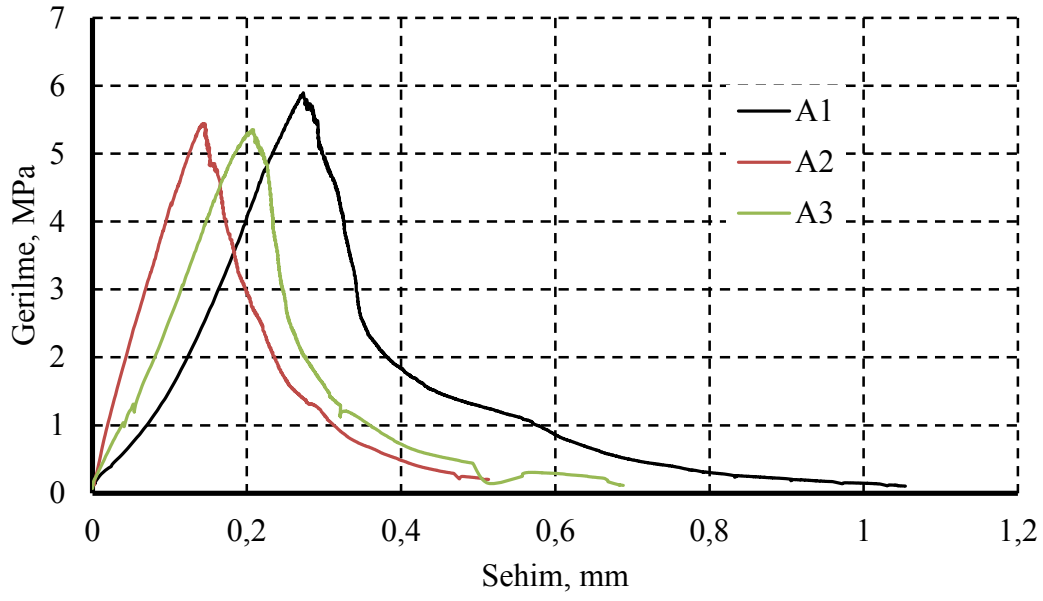


Şekil B.6 : C401, C402, C403 numunelerinin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri.

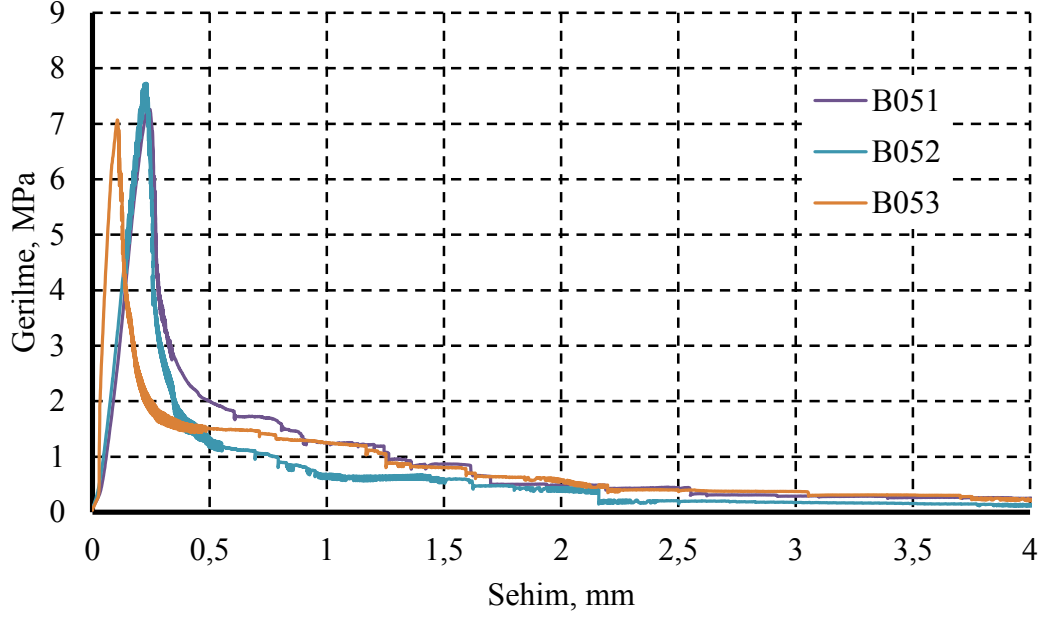


Şekil B.7 : A, B10, C10, C20, C30, C40 karışımlarından alınan birer numunenin yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı eğrileri.

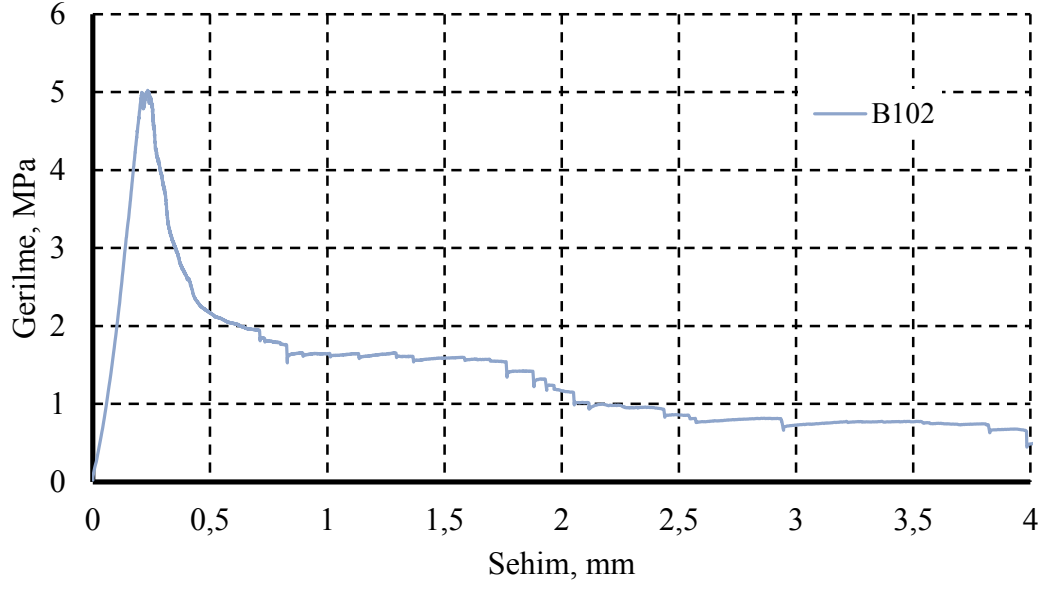
EK C: Numunelerin Gerilme-Sehim Eğrileri



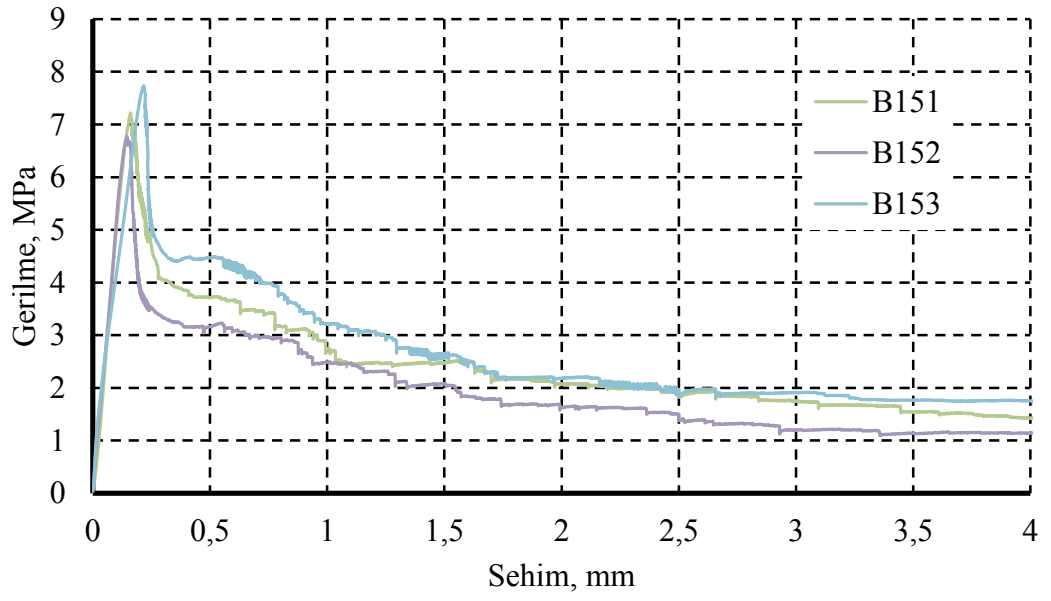
Şekil C.1 : A1, A2, A3 numunelerinin gerilme-sehim eğrileri.



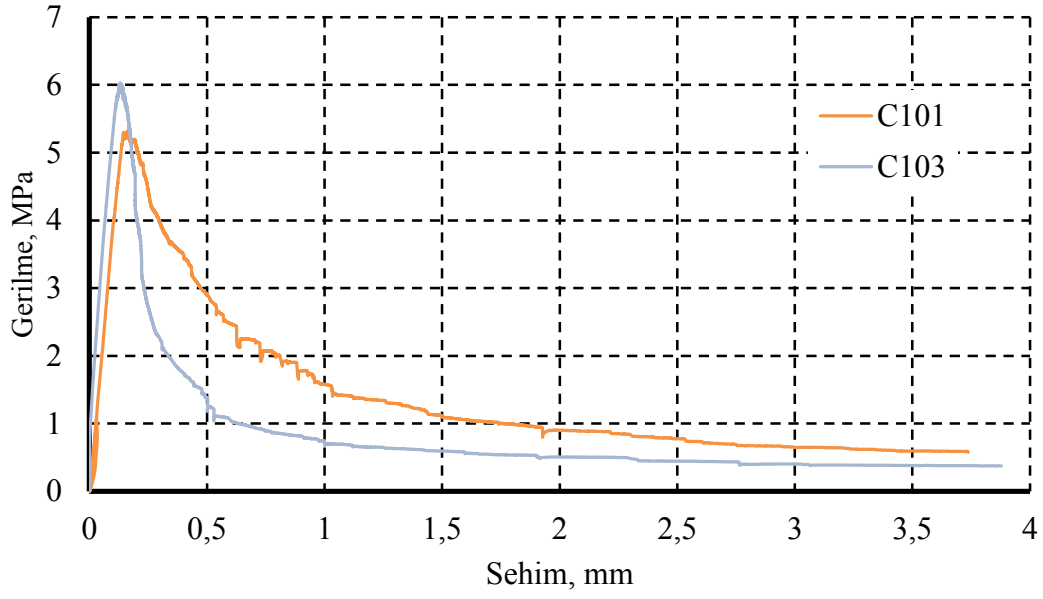
Şekil C.2 : B051, B052, B053 numunelerinin gerilme-sehim eğrileri.



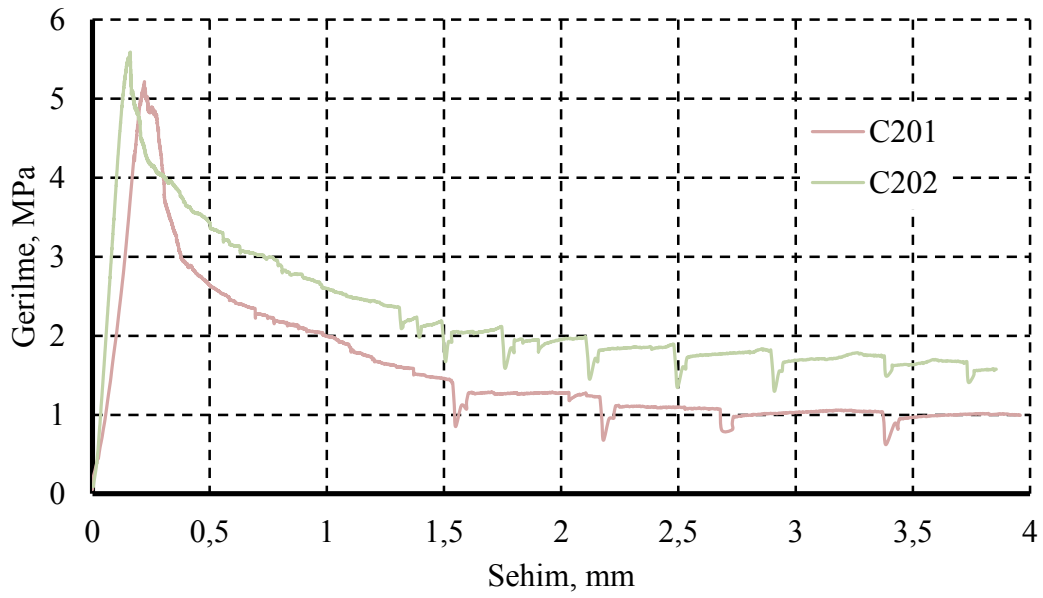
Şekil C.3 : B102 numunesinin gerilme-sehim eğrileri.



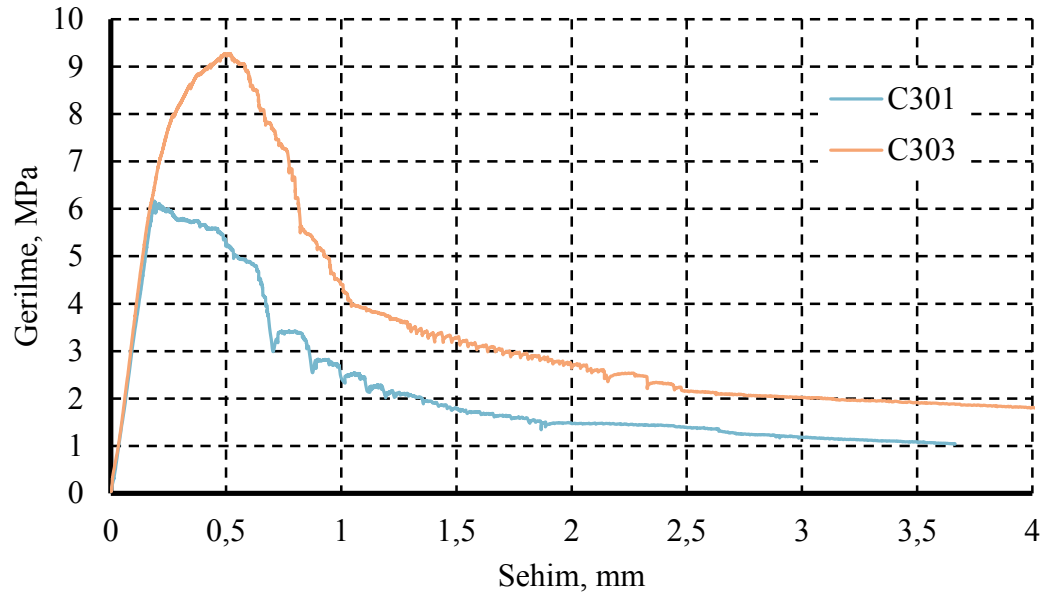
Şekil C.4 : B151, B152, B153 numunelerinin gerilme-sehim eğrileri.



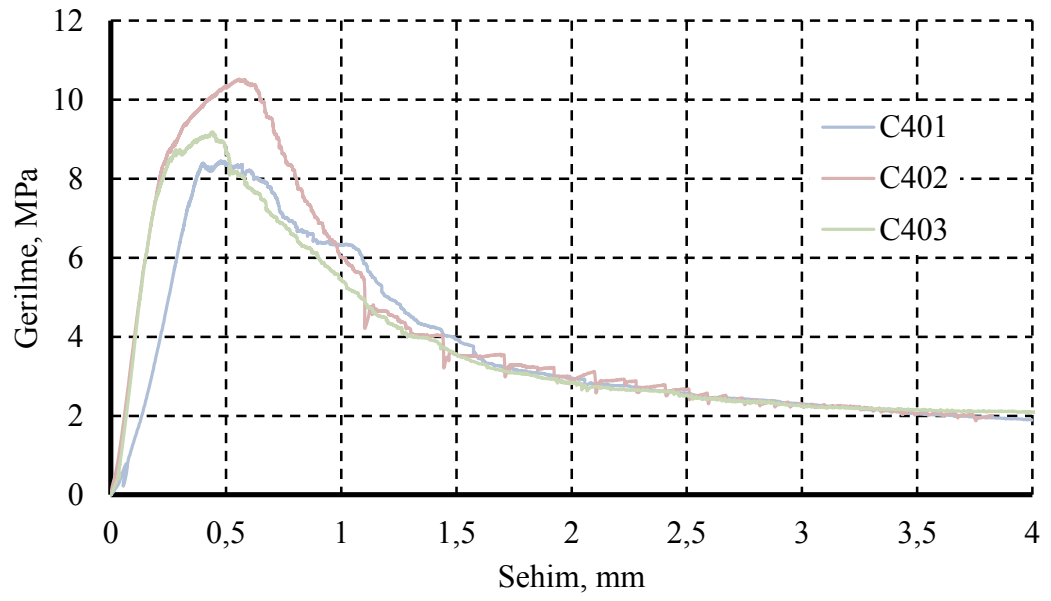
Şekil C.5 : C101, C103 numunelerinin gerilme-sehim eğrileri.



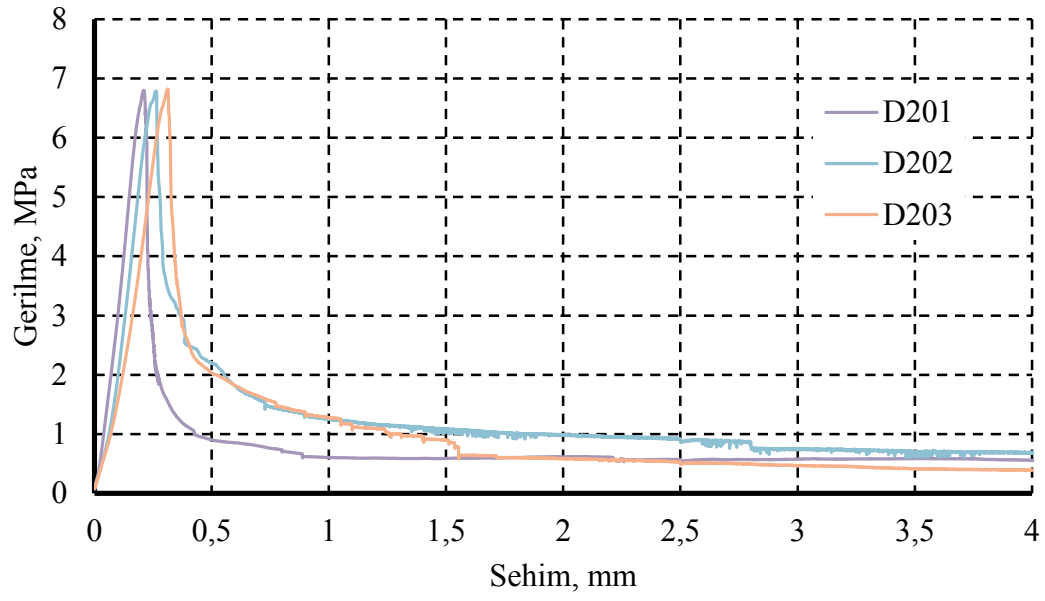
Şekil C.6 : C201, C202 numunelerinin gerilme-sehim eğrileri.



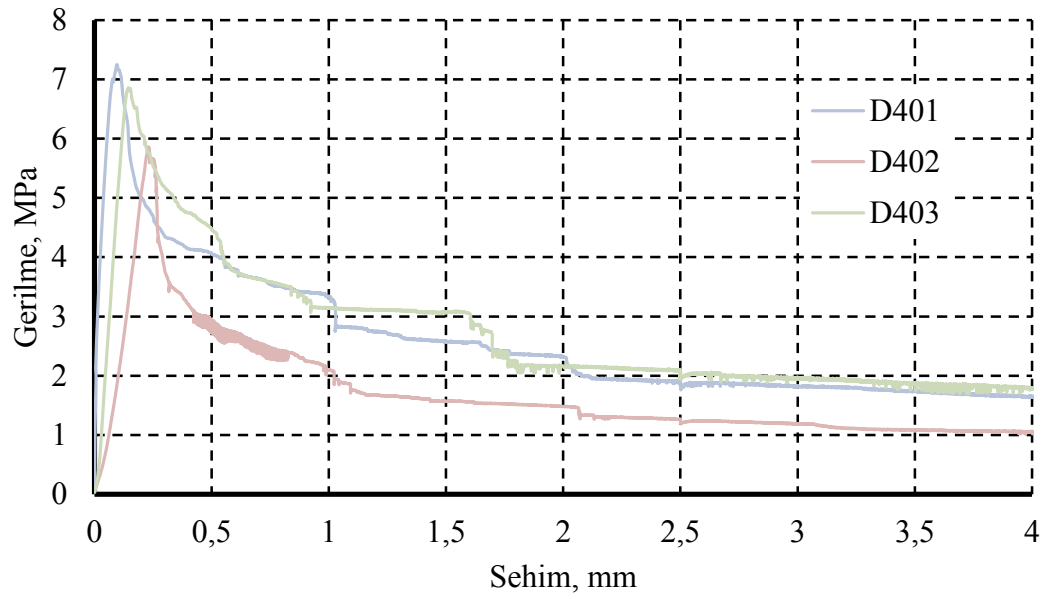
Şekil C.7 : C301, C303 numunelerinin gerilme-sehim eğrileri.



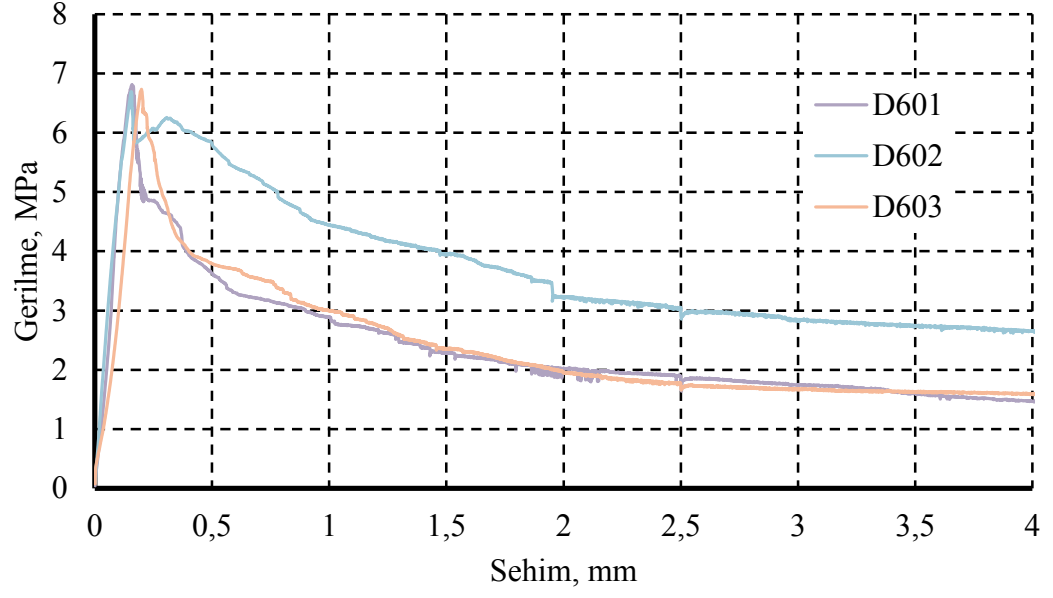
Şekil C.8 : C401, C402, C403 numunelerinin gerilme-sehim eğrileri.



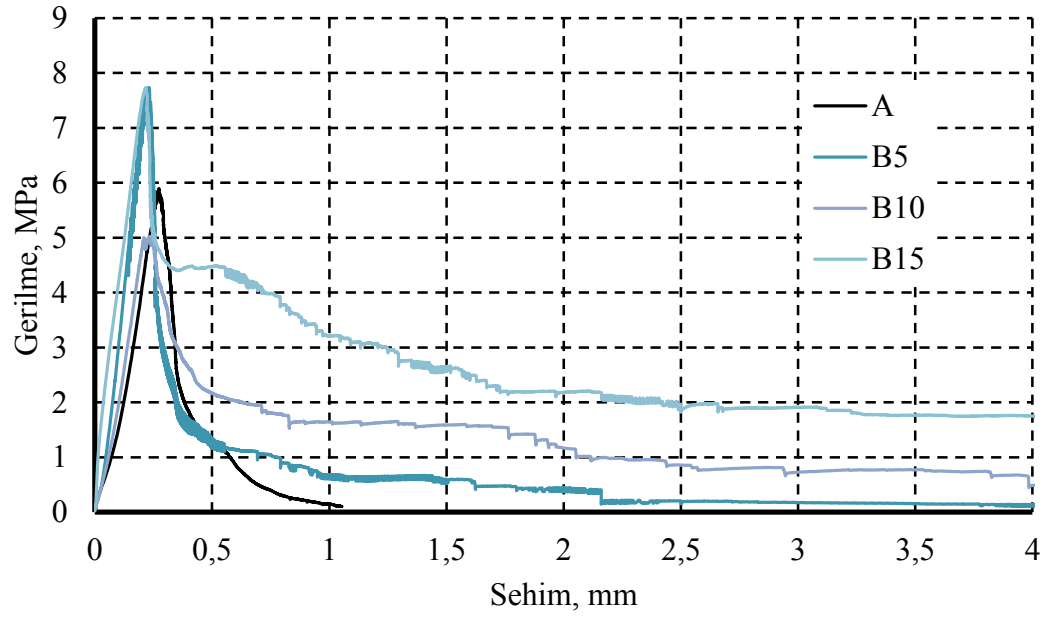
Şekil C.9 : D201, D202, D203 numunelerine ait gerilme-sehim eğrileri.



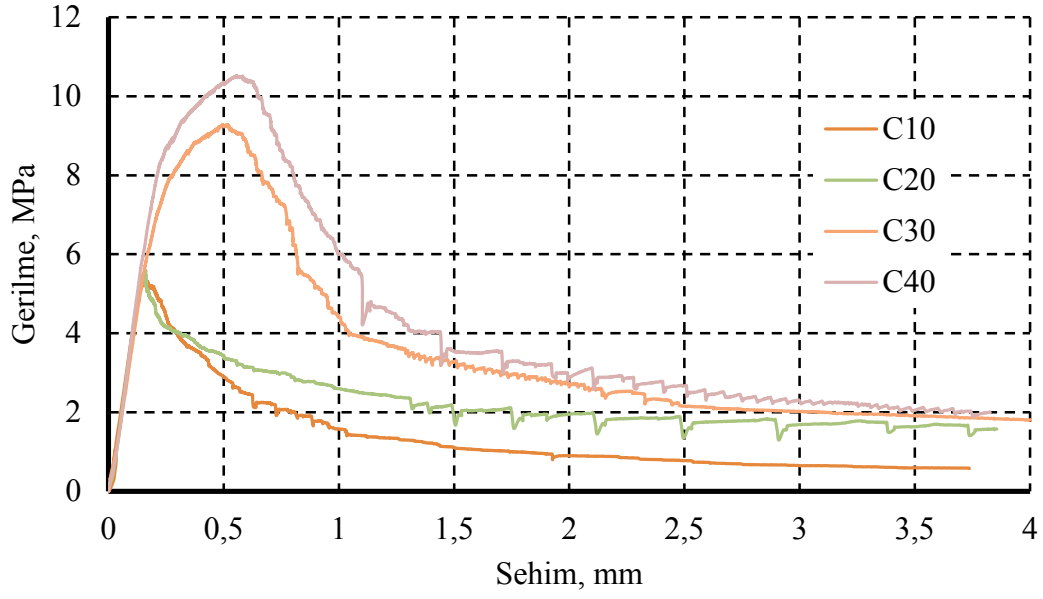
Şekil C.10 : D401, D402, D403 numunelerinin gerilme-sehim eğrileri.



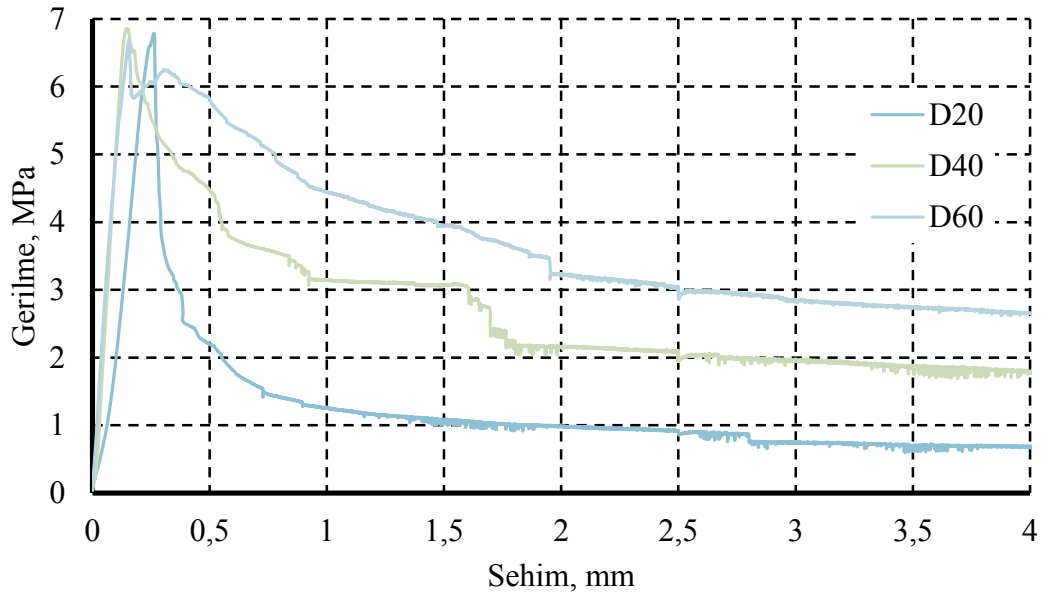
Şekil C.11 : D601, D602, D603 numunelerinin gerilme-sehim eğrileri.



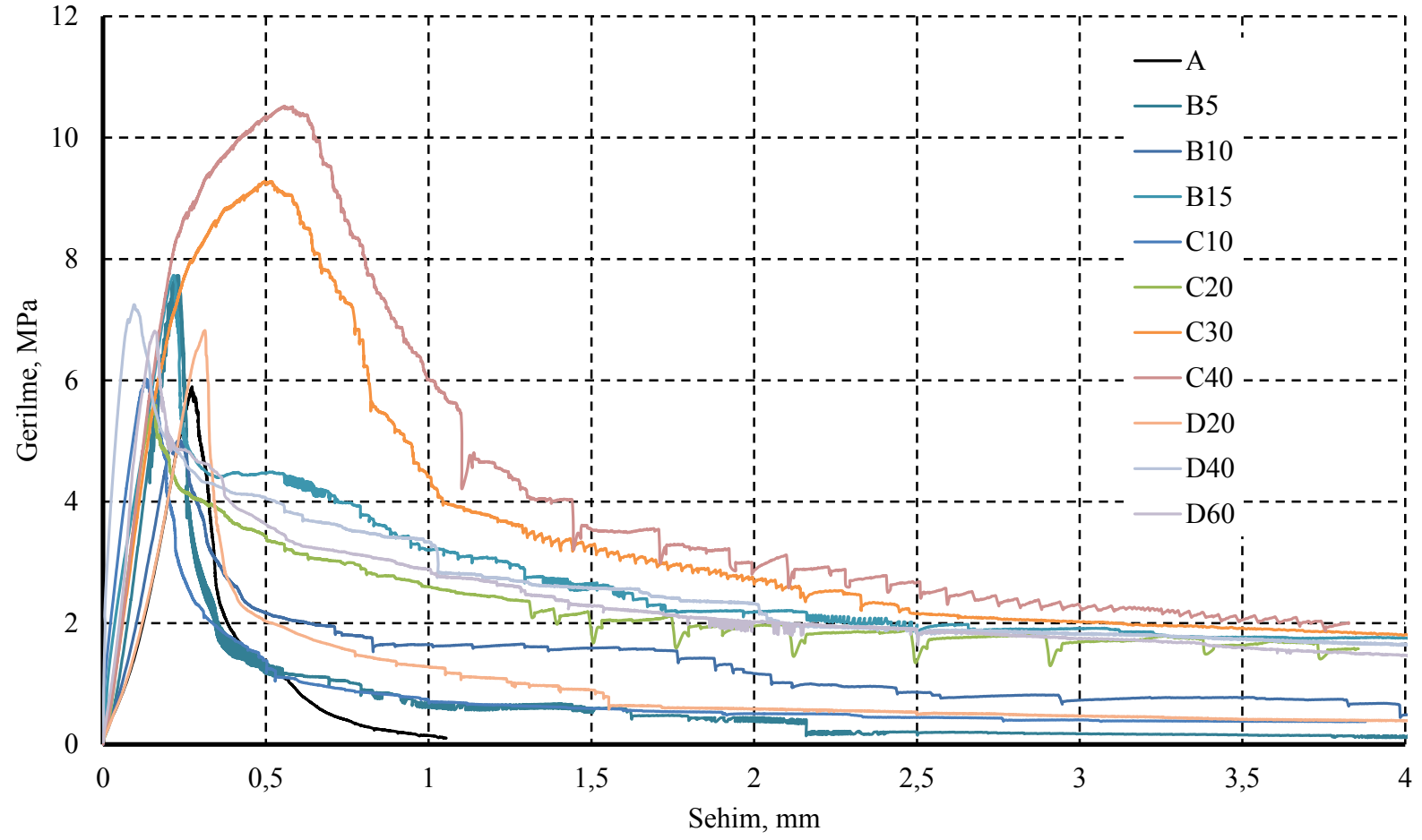
Şekil C.12 : A, B5, B10, B15 karışımlarından alınan birer numunenin gerilme-sehim eğrileri.



Şekil C.13 : C10, C20, C30, C40 karışımlarından alınan birer numunenin gerilme-sehim eğrileri.



Şekil C.14 : D20, D40, D60 karışımlarından alınan birer numunenin gerilme-sehim eğrileri.



Şekil C.15 : Her karışımdan alınan birer numunenin gerilme-sehim eğrileri.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Deniz HAMZAÇEBİ
Doğum Yeri ve Tarihi : Nevşehir, 11.11.1977
E-Posta : dhamzacebi@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2000, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yükseklisans : 2008, Trakya Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler
Fakültesi, Kamu Yönetimi Bölümü