

**T.C.**  
**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**PUZOLAN VE ATIK LASTİK AGREGASI İÇEREN ÇELİK LİFLİ  
BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

**Tacettin ŞAHİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN**  
**Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL**

**TUNCELİ-2023**

**T.C.**  
**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**PUZOLAN VE ATIK LASTİK AGREGASI İÇEREN ÇELİK LİFLİ  
BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

**Tacettin ŞAHİN**  
**(200150001)**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN**  
**Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL**

**TUNCELİ - 2023**

**T.C.**  
**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**PUZOLAN VE ATIK LASTİK AGREGASI İÇEREN ÇELİK  
LİFLİ BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

**Tacettin ŞAHİN**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 04/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

**İmza:.....**  
Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz  
ARUNTAŞ  
(Gazi Üniversitesi)  
**BAŞKAN**

**İmza:.....**  
Dr. Öğr. Üyesi Selim  
CEMAlgİL  
(Munzur Üniversitesi)  
**DANIŞMAN**

**İmza:.....**  
Dr. Öğr. Üyesi Nihan  
GÜLMEZ  
(Munzur Üniversitesi)  
**ÜYE**

Bu tez, Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç.Dr. Murat KORUNUR  
Enstitü Müdürü

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No:.....

**NOT:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı "Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu"ndaki hükümlere tabidir.

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Tacettin ŞAHİN

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL

## TEŞEKKÜR

Çalıőmanın baőlaması ve devam etmesi sürecinde gerek teorik bilgi birikimi gerekse laboratuvar tecrübeleriyle bana yol gösteren, bıkmadan usanmadan sorularıma cevap veren, değerli zamanını bana ayıran kıymetli Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL'e teőekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans eğitimi sırasında beni destekleyen, yanımda olan ve sabır gösteren kıymetli aileme teşekkür ederim.

**Tacettin ŞAHİN**  
**TUNCELİ-2023**



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
<b>ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ</b> .....	<b>I</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>II</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>III</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>V</b>
<b>TABLOLAR LİSTESİ</b> .....	<b>VI</b>
<b>RESİMLER LİSTESİ</b> .....	<b>VII</b>
<b>SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....	<b>VIII</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>X</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Betonda Lif Kullanımı.....	3
1.2. Atık Lastik Parçalarının Agrega Olarak Kullanılabilirliği .....	7
1.3. Puzolan Kullanımının Betona Etkileri.....	12
1.4. Rötire Çeşitleri.....	14
1.4.1. Termik rötire.....	14
1.4.2. Bünyesel rötire.....	15
1.4.3. Plastik rötire.....	16
1.4.4. Hidrolik rötire .....	17
1.4.5. Karbonatlaşma rötiresi.....	17
1.5. Liflerin Beton İçerisindeki Davranışını Etkileyen Faktörler .....	19
1.5.1. Liflerin beton özelliklerine etkisi .....	19
1.5.2. Bağlı fiber-matris sertliği .....	21
1.5.3. Lif tipi .....	21
1.5.4. Lif miktarı.....	22
1.5.5. Lif görünüm oranı (narınlığı) ve lif boyu .....	23
1.5.6. Lif yönelimi .....	24
1.5.7. Homojen lif dağılımı .....	24
1.5.8. Çimento ve agrega .....	24
<b>2. MATERYAL VE METOT</b> .....	<b>25</b>
2.1. Materyal.....	25
2.1.1. Çimento .....	25
2.1.2. Agrega .....	26
2.1.4. Uçucu kül.....	27
2.1.5. Çelik lif.....	28
2.1.6. Atık lastik .....	29
2.1.7. Akışkanlaştırıcı .....	29
2.2. Metot.....	29
2.2.1. Karışımın hazırlanması.....	29
<b>3. DENEY SONUÇLARI</b> .....	<b>33</b>
3.1. Taze Beton Deneyleri .....	33
3.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri .....	36
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>50</b>
4.1. Ses Geçiş Hızı.....	50
4.2. Basınç Dayanımı .....	51
4.3. Eğilmede Çekme Dayanımı.....	52

4.4. Yarmada Çekme Dayanımı .....	53
4.5. Diagonal Yarmada Çekme Dayanımı .....	54
4.6. Donma Çözülme Deneyi .....	55
4.7. Aşınma Direnci Deneyi .....	56
4.8. Kılcal Su Emme.....	56
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>58</b>
5.1. Sonuçlar .....	58
5.2. Öneriler.....	59
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>60</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>65</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1. Termik rötre .....	15
Şekil 1.2. Plastik rötre .....	16
Şekil 1.3. Gerilme-birim uzama grafiği .....	20
Şekil 1.4. Çelik lifli betonlarda gerilme aktarımı .....	21
Şekil 1.5. Çelik lif çeşitleri, a) Düz lif, b) Çentikli lif, c) Dalgalı lif, d) Ay biçimli dalgalı lif, e) İki ucu kancalı lif, f) Bir ucu kancalı lif.....	22
Şekil 1.6. Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi .....	23
Şekil 2.1. Deneylerde Kullanılan Agreganın Granülometri eğrisi .....	27
Şekil 3.1. Ultra ses geçiş hızı ölçüm metodu .....	37
Şekil 4.1. Ses geçiş hızları grafiği .....	50
Şekil 4.2. Beton basınç dayanımları sonuçları .....	51
Şekil 4.3. Eğilmede çekme deney sonuçları.....	52
Şekil 4.4. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	53
Şekil 4.5. Diyagonal yarma deney sonuçları.....	54
Şekil 4.6. Ses geçiş hızları grafiği .....	55
Şekil 4.7. Aşınma kaybı deney sonuçları .....	56
Şekil 4.8. Numunelerin su emme miktarları .....	57

## TABLolar LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
<b>Tablo 1.1.</b> Lif çeşitlerinin tipik özellikleri .....	5
<b>Tablo 2.1.</b> CEM I 42,5 R PÇ Teknik özellikleri (TS EN 197-1) .....	25
<b>Tablo 2.2.</b> CEM I 42,5 R PÇ ve UK Kimyasal Kompozisyonu .....	25
<b>Tablo 2.3.</b> Agreg a özellikleri .....	26
<b>Tablo 2.4.</b> Agreg a elek analizi .....	26
<b>Tablo 2.5.</b> Su analiz değerleri .....	27
<b>Tablo 2.6.</b> Karışım da kullanılan malzeme miktarları (kg/m <sup>3</sup> ) .....	32
<b>Tablo 3.1.</b> Taze beton deney sonuçları .....	34
<b>Tablo 3.2.</b> 28 ve 90 günlük beton basınç dayanımı sonuçları.....	38
<b>Tablo 3.3.</b> 28 ve 90 günlük eğilmede çekme deneyi sonuçları.....	39
<b>Tablo 3.4.</b> 28 günlük kiriş ses geçiş hızı deneyi sonuçları .....	40
<b>Tablo 3.5.</b> 28 ve 90 günlük numunelerde yarmada çekme dayanımı deney sonuçları .....	42
<b>Tablo 3.6.</b> 28 ve 90 günlük diyagonal yarma deney sonuçları .....	44
<b>Tablo 3.7.</b> Donma Çözülme deney sonuçları.....	46
<b>Tablo 3.8.</b> Aşınma kaybı deney sonuçları.....	47
<b>Tablo 3.9.</b> Numunelerin kılcal su emme deneyi sonuçları .....	48
<b>Tablo 4.1.</b> Ses geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki ilişki .....	51

## RESİMLER LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
<b>Resim 1.1.</b> Beton üretiminde kullanılan bazı lif çeşitleri; a) Çelik lifler b) Cam lifleri c) Polipropilen lifler d) Karbon lifler e) Plastik lifler f) Buğday samanı g) Şeker kamışı lifleri h) Sisal Lifleri i) Jüt lifleri j) Bambu lifleri. ....	3
<b>Resim 1.2.</b> (a) Atık lastik agregası, b) ALA'nın SEM görüntüsü.....	8
<b>Resim 1.3.</b> Uçucu külün mikroskop görüntüsü.....	12
<b>Resim 1.4.</b> Karbonatlaşmanın gerçekleşme biçimi.....	18
<b>Resim 2.1.</b> Karışımda kullanılan agrega sınıfları.....	26
<b>Resim 2.2.</b> Karışımda kullanılan malzemeler.....	28
<b>Resim 2.3.</b> Çalışmada kullanılan çelik lifin geometrisi.....	29
<b>Resim 2.4.</b> Laboratuvar tipi mikser.....	30
<b>Resim 2.5.</b> Kuru Karışımda eklenen malzemeler.....	31
<b>Resim 2.6.</b> Taze betonda homojen dağılmış lifler.....	31
<b>Resim 3.1.</b> Slump seti.....	33
<b>Resim 3.2.</b> Slump ölçümü.....	34
<b>Resim 3.3.</b> Hava içeriği ölçümü.....	34
<b>Resim 3.4.</b> Deneylerde kullanılan çelik ve plastik kalıplar.....	35
<b>Resim 3.5.</b> Vibrasyon masası.....	35
<b>Resim 3.6.</b> Priz alması için kalıpta bekletilen numuneler.....	36
<b>Resim 3.7.</b> Kalıptan çıkartılarak kür havuzuna alınan numuneler.....	36
<b>Resim 3.8.</b> Ultra ses geçiş hızı ölçüm cihazı.....	37
<b>Resim 3.9.</b> Basınç deneyi düzeneği.....	38
<b>Resim 3.10.</b> Üç noktadan yüklenen kiriş eğilme testi.....	39
<b>Resim 3.11.</b> Uçları kodlanıp ses geçiş hızlarına bakılan kirişler.....	40
<b>Resim 3.12.</b> Yarmada çekme deneyi düzeneği.....	41
<b>Resim 3.13.</b> Yarmada çekme gerilmesine maruz kalan lifsiz beton numuneler.....	41
<b>Resim 3.14.</b> Yarmada çekme gerilmesine maruz kalan lifli beton numuneler.....	42
<b>Resim 3.15.</b> Diyagonal yarma deneyi düzeneği.....	43
<b>Resim 3.16.</b> Diyagonal yarma deneyi sonrası numunelerin kırılma biçimleri.....	44
<b>Resim 3.17.</b> Donma çözülme cihazı.....	45
<b>Resim 3.18.</b> Rotating cutter yöntemiyle aşınma testi cihazı.....	47
<b>Resim 3.19.</b> Kılcal su emme havuzu.....	48

## SEMBOLLER LİSTESİ

<b>c</b>	: Çimentonun mutlak hacmi
<b>C<sub>2</sub>S</b>	: Dikalsiyum silikat
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	: Kalsiyum hidroksit
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	: Kalsiyum karbonat
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbon dioksit
<b>d</b>	: Çap
<b>e</b>	: Suyun hacmi
<b>H</b>	: Hidrojen
<b>l</b>	: Lif boyu
<b>O</b>	: Oksijen
<b>vh</b>	: Çimento hamurunun mutlak hacmi



## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>ACI</b>	: Amerikan Beton Enstitüsü
<b>AL</b>	: Atık lastik
<b>ALA</b>	: Atık lastik agregası
<b>ASTM</b>	: Amerikan Test Ve Materyalleri Topluluğu
<b>ÇL</b>	: Çelik lif
<b>DYK</b>	: Yüzey kuru suya doymun ağırlık
<b>K0</b>	: Kontrol betonu
<b>K1</b>	: 1 Numaralı karışım; 50 kg lif %10 atık lastik agregalı
<b>K2</b>	: 2 Numaralı karışım; 50 kg lif %15 atık lastik agregalı
<b>K3</b>	: 3 Numaralı karışım; 30 kg lif %10 atık lastik agregalı
<b>K4</b>	: 4 Numaralı karışım; 30 kg lif %15 atık lastik agregalı
<b>KB</b>	: Kontrol betonu
<b>Ksi</b>	: İnç kare başına kilo pound
<b>MÖ</b>	: Milattan önce
<b>PCC</b>	: Portland çimentosu betonu
<b>PVA</b>	: Poli vinil alkol
<b>SA</b>	: Süper akışkanlaştırıcı
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>TS</b>	: Türk Standardı
<b>UK</b>	: Uçucu kül

## ÖZET

Bu çalışmada, Puzolan ve atık lastik agregası kullanımının çelik lifli beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla C30 sınıfında, farklı çelik lif ve atık lastik oranlarına sahip numuneler imal edilmiştir. CEM I 42,5 R sınıfı portland çimentosunun kullanıldığı karışımda, puzolan olarak uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül, karışımdaki çimento ağırlığının % 15'i (67,5 kg/m<sup>3</sup>) oranında ikameli olarak kullanılmıştır. Su/çimento oranı kontrol numunesi karışımında 0,48, akışkanlaştırıcı kullanılan lifli numune karışımlarında ise 0,40 olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu amaçla % 1,5 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Karışımda, 35 mm uzunlukta 0,75 mm çapında galvanize, tutkallı çelik lifler 50 kg/m<sup>3</sup> ve 30 kg/m<sup>3</sup> oranlarında kullanılmıştır. 0-5 mm, 5-12 mm ve 12-22 mm çapında doğal agregalar sırasıyla % 45, % 30 ve % 25 oranlarında kullanılmıştır. Taze beton karışımları % 10 ve % 15 oranlarında öğütülmüş atık lastik, ince agrega yerine ikameli edilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar taze beton deneyleri yapıldıktan sonra kalıplara yerleştirildi. 24 saat sonra kalıptan alınan beton numuneler 28 gün laboratuvarda kür tanklarında, daha sonra açıkta bekletilmiştir. Üretilen numuneler; basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme, diyagonal yarma, ultrases geçiş hızı, kılcal su emme, donma çözülme ve aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Bu testler için 30 adet 100x100x500 mm boyutlarında kiriş, 135 adet 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir.

Deneyler sonucunda çelik lifli betonların neredeyse tamamının lif içermeyen kontrol numunesine kıyasla daha yüksek dayanıma sahip olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca çelik lifli betonlar kendi aralarında kıyaslandıklarında; % 10 atık lastik ve 50 kg çelik lif içeren K1 ile % 10 oranında atık lastik ve 30 kg çelik lif içeren K3 beton numunelerinin diğer betonlara göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu anlaşılmıştır. 150 ve 300 devir donma çözülme etkisine maruz bırakılan tüm lifli numuneler kontrol numunesinden yaklaşık % 50 oranında daha az etkilenmiştir. Kendi aralarında kıyaslandıklarında 50 kg lif ve % 10 öğütülmüş atık lastik içeren beton numunelerin 300 devir donma çözülme etkisine karşı daha dayanıklı olduğu anlaşılmıştır.

Tüm deney sonuçları topluca değerlendirildiğinde, 50 kg/m<sup>3</sup> çelik lif ve % 10 oranında atık lastik agregası içeren K1 betonunun en ideal oranlara sahip karışım olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Lifli beton, uçucu kül, atık araç lastik agregası, süper akışkanlaştırıcı

## ABSTRACT

### Mechanical Properties of Pozzolan And Waste Tire Aggregate Contained Steel Fiber Reinforced Concrete

In this study the effect of using pozzolan and waste tire aggregate on steel fiber reinforced concrete (SFRC) properties was investigated. For this purpose, samples with different steel fiber and waste tire ratios were produced in the C30 class. CEM I 42.5 R class Portland cement was used in the mixture and fly ash used as pozzolan. Fly ash was used as a substitute at the rate of 15 % (67.5 kg/m<sup>3</sup>) of cement weight in the mixture. The water/cement ratio was adjusted to be 0.48 in the control sample mixture and 0.40 in the fibrous sample mixtures using plasticizers. Super plasticizer used as 1,5 % volume of mixture. 35 mm length 0,75 mm diameter galvanized, glued steel fibers were used in the ratio as 50 kg/m<sup>3</sup> and 30 kg/m<sup>3</sup>. Natural aggregates with a diameter of 0-5 mm, 5-12 mm and 12-22 mm were used at the rates of 45 %, 30 % and 25 % respectively. As a substitute for fine aggregate, ground waste tire granules added to fresh concrete mixtures at the rates of 10 % and 15 %. The prepared mixtures were placed in the molds after fresh concrete experiments.

Concrete samples taken from the molds after 24 hours were kept in curing tanks in the laboratory for 28 days, then in the open air for 90 days. The produced samples were subjected to Ultrasonic pulse velocity (UPV), split tensile strength, diagonal-cube splitting, three point bending beam, compressive strength, capillary water absorption, freeze/thaw resistance and abrasion resistance tests. For these tests, 30 beams of 100x100x500 mm dimensions and 135 cubes of 100x100x100 mm dimensions were produced.

As a result of the experiments, it was understood that almost all of the steel fiber concretes had higher strength compared to the fiber-free control sample. In addition, when steel fiber concretes are compared among themselves, K1 concrete samples containing 10 % waste rubber (50 kg steel fiber) and K3 concrete samples containing 10 % waste rubber (30 kg steel fiber) have higher strength than other concretes. All fibrous samples subjected to 150 and 300 cycle freeze-thaw effect were affected approximately 50 % less than the control sample. When compared with each other, it was understood that concrete samples containing 50 kg steel fiber and 10 % ground waste rubber were more resistant to 300 cycle freeze-thaw effect.

When all test results are evaluated collectively, it has been determined that K1 concrete containing 50 kg/m<sup>3</sup> steel fiber and 10 % waste tire aggregate is the mixture with the most ideal proportions.

**Key words:** Fibrous concrete, fly ash, waste vehicle tire aggregate, super plasticizer

## 1. GİRİŞ

Beton; dayanım ve dayanıklılık özellikleri, yangın direnci, suya karşı dayanımı, enerji verimliliği, ekonomik üretimi, şekil verme kolaylığı, yerinde üretilebilirliği ve prefabrik yapı elemanları üretimi, pratik uygulama yöntemleri gibi birçok sebepten ötürü yapı sektöründe en çok rağbet gören malzemelerden biridir. Betona olan talebin fazla olması, betonun farklı özelliklerini geliştirmek için birçok alanda çeşitli araştırmalar yapılmasına neden olmuştur. Bu araştırmalardan bazıları betona değişik orijinli lif takviyesi yapılması, endüstriyel atıkların puzolan olarak kullanılması ve betona çeşitli agregaların katılmasıdır.

Enerji, otomotiv, havacılık, inşaat gibi bir çok sektörde lif olarak cam, boron, karbon, aramid gibi lifler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu tür liflerin doğada çözünmesi çok uzun zaman aldığından bu malzemelerin geri dönüşümünü zorlaştırmaktadır. Doğal kaynakların sınırsız olmadığı ve insanın karbon ayak izinin azaltılmak zorunda olduğu bilinen bir gerçektir. Bundan dolayı özellikle geçtiğimiz yarım yüzyılda, doğal ve yenilenebilir liflerin kullanılabilirliğine dair çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Endüstride; bambu, jüt, kenevir, ağaç lifleri, keten ve pamuk lifi gibi birçok bitkisel doğal lifin yanında görece daha az miktarlarda da olsa örneğin ipek gibi hayvansal kaynaklı lifler kullanılmaya başlanmıştır (Bodur, 2016). Doğal liflerin yüksek biyo-bozunurluğa sahip olması ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilerinin görmezden gelinebilecek kadar az olması önemli tercih sebeplerindedir. Bunu yanında doğal kaynaklı liflerin üretimi, genellikle oldukça düşük bir enerji kullanılarak mümkündür. Doğal liflerin nem absorbe etmeleri, ısı etkisi altında yapılarında yumuşama ya da boylarında değişim yaşanmaması, donma noktasının altında bile kopma olmaması açısından avantajlıdır. Ancak çimento hamurunun yüksek pH değerlerine sahip bazik yapısı sebebiyle liflerde parçalanma yaşanabilmektedir. Bu sebeple beton içinde doğal lif kullanılacaksa eğer, pH değerini düşürecek katkıları kullanılmalıdır (Aral, 2006).

Liflerin yapılarda kullanımına çok eski zamanlardan beri rastlanmaktadır. Harçlarda hayvan kılı, kerpiçte saman kullanımı en eski örneklerdir. 20.yy başlarında asbest lifleri endüstride kullanılmaya başlamıştır. Türkiye 'de daha çok Bursa, Diyarbakır, Denizli, Bitlis, Amasya, Eskişehir, Kütahya, Konya, Sivas, Şanlıurfa gibi bölgelerde

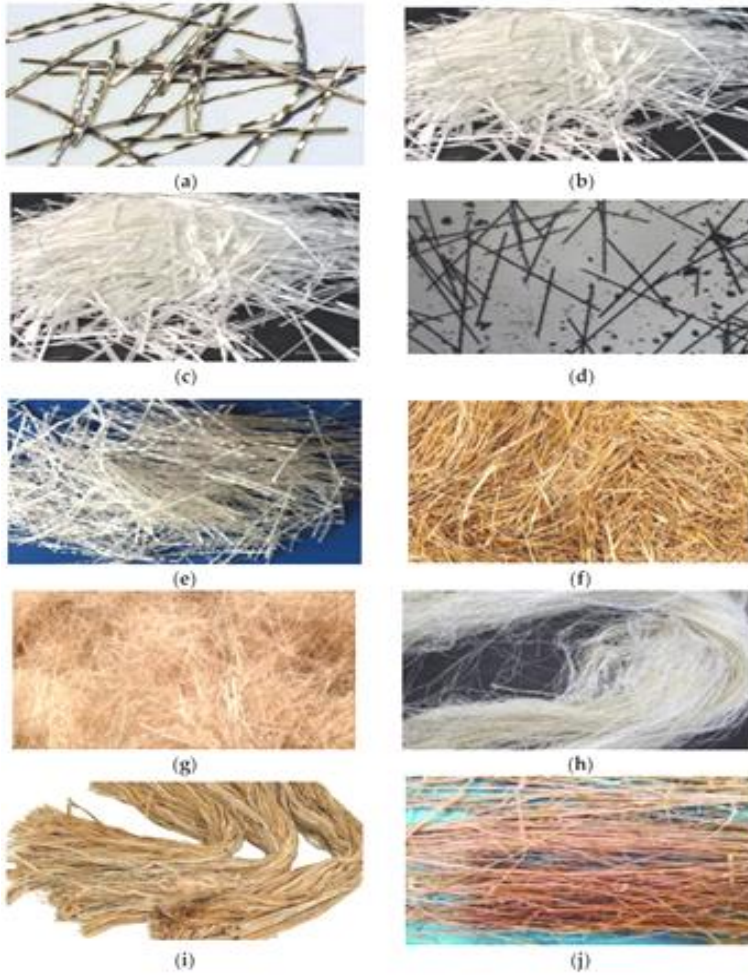
rastlanan asbest, farklı uzunlukta liflere sahip bir mineraldir. Bir silikat olan tremilitin bozulmasından meydana gelen asbestin kolayca eğilip bükülebilen plastik bir yapısı vardır ve kolayca tel tel ayrılabilir kadar düşük bir dayanımı vardır. Asbest, lifli, yumuşak, ateşte niteliği değişmeyen, düşük ısı ve elektriksel iletkenlik, mikro organizmalara direnç gibi özelliklere sahip bir maddedir. Düşük ısı iletkenliğe sahip oluşu ve ısıyla yapısında bozulma olmaması sebebiyle ideal bir yalıtım maddesidir. 8 mm'den uzun liflere sahip asbestten ateşe dayanıklı kumaş, 5-8 mm uzunluğa sahip lifleri olandan boru veya levha, 2-6 mm uzunluğunda lifleri olanlardan izolasyon levhaları yapmaktadır.

Asbest çeşitli sektörlerde binlerce farklı ürün yapımında kullanılır. Çimento sanayisi, kimya ürünleri, ilaç, lastik-plastik, boya, kâğıt, uzay sanayisi, yüksek basınca dayanıklı borular, iç ve dış cephe giydirmeleri ile tavan kaplamalarında, fren pabuç ve debriyaj vb. kavrama balatalarında, farklı contalar, özel amaçlı filtreler, yangına dayanıklı tekstil kumaşları, tavan/tabana döşemelerinde yapıştırıcılar, tuğla ve kiremit yapımında, çatı malzemeleri üretiminde, akustik tavan yapımı, macun yapımı, sahne perdeleri, yangın battaniyeleri, iç yangın kapıları ve itfaiyeci kıyafetlerinde asbestten yararlanır (Akboğa ve Baradan, 2011). Ancak insan sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkileri olduğundan 1950'lerden sonra alternatif malzemelere bir yönelme olmuştur. Günümüzde yapı elemanlarında çelik, cam, karbon, polietilen, bazalt gibi çeşitli elyaflar kullanılmaktadır.

Metaller sahip oldukları yüksek çekme dayanımlarından dolayı günümüzde inşaat sektöründe oldukça fazla tercih edilen bir yapı malzemesidir. Lifli Beton üretiminde en çok tercih edilen metalik lifler çelik liflerdir. Çelik lifler, karbon çeliği veya paslanmaz çelikten yapılmaktadırlar. Çelik lifler, beton içerisinde adezyon kuvveti oluşturmaktır. Beton matris içinde meydana gelen gerilme kuvvetleri, matriste oluşan mikro çatlaklar nedeniyle düzensizdir. Betonda lif kullanımı, mikro çatlakların oluştuğu bölgelerde meydana gelen gerilme kuvvetlerini bir köprü gibi davranarak komşu matrislere iletir. Amerikan standardı ASTM A 820-96 Beton üretiminde kullanılabilir çelik lifleri özelliklerine göre dört gruba ayırmıştır. Bunlar; soğuk çekilmiş lifler, plakadan kesilmiş lifler, eritilip çekilmiş lifler ve diğer liflerdir. Türk standardı TS 10513 Çelik liflerin sınıflandırılmasını; düz pürüzsüz yüzeyli lifler, bütün uzunluğunca deforme olmuş lifler (üzerinde girintiler açılmış, uzunluğu boyunca dalgalı ve ay biçimli dalgalı teller) ve sonu kancalı lifler (iki ucu kıvrılmış ve bir ucu kıvrılmış teller) olarak üç gruba ayırmıştır (Türkmenoğlu ve Varol, 2016).

## 1.1. Betonda Lif Kullanımı

Beton gevrek bir yapı malzemesidir. Çekme gerilmeleriyle karşılaşan donatısız betonda çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar kırılmaya neden olur. 1800'li yıllardan beri bu durumun üstesinden gelebilmek için betona çelik donatı ilave edilmektedir. Betonarme adını alan bu kompozit yapı elemanında, donatıların çekme gerilmelerinin tümünü karşıladığı varsayılır (Brown ve ark., 2002). Ancak çelik donatı; karbonatlaşma, betonda pH seviyesinin düşmesi veya serbest klor iyonlarının bulunması sebebiyle korozyona uğramaktadır (Aköz ve Çakır, 2014). Beton üretiminde kullanılan bazı lif çeşitleri Resim 1.1.'de görülmektedir (Anas ve ark., 2022)



**Resim 1.1.** Beton üretiminde kullanılan bazı lif çeşitleri; a) Çelik lifler b) Cam lifleri c) Polipropilen lifler d) Karbon lifler e) Plastik lifler f) Buğday samanı g) Şeker kamışı lifleri h) Sisal Lifleri i) Jüt lifleri j) Bambu lifleri.

Pas sebebiyle oluşan hacim artışı betonda gerilmelere sebep olmakta, beton yüzeyinin şişerek dökülmesine neden olmaktadır. Bu sebeple yaklaşık yarım yüzyıldır beton çeşitli lifler ile takviye edilmektedir (Brown ve ark., 2002).

Beton; darbe, eğilme, basınç, sürtünme, donma-çözünme gibi birçok dış etkiye maruz kalmaktadır. Bu dış etkilere karşı betonun dayanımını arttırmak amacıyla taze beton içine; değişik metotlarla ve miktarlarda eklenen, belirli boy/çap (narinlik oranı)'a sahip, metalik, polimerik, mineral veya doğal kökenli malzemelere lif (fiber) denir. Lifler; çelik, plastik, cam, karbon vb.farklı materyallerden değişik şekil ve boyutlarda üretilmektedir. ACI (Amerikan Beton Enstitüsü) komitesi bir lifin niteliklerini en iyi tanımlayan sayısal parametrenin; lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen "aspect ratio"(narinlik oranı) olduğunu belirtmektedir. Eşdeğer lif çapı ise; alanı lifin kesit alanına eşit bir dairenin çapı olarak ifade edilmektedir. Lifin karakterini tanımlayan diğer etkenler ise lifin geometrik yapısı ve çekme gerilmesi mukavemetidir (Ünal ve ark., 2007).

Takviye malzemesi olarak beton içinde sıklıkla kullanılan lifler; çelik, polipropilen, karbon ve alkali dirençli cam liflerdir. Lifle takviye edilen betonlarda, lif türü ne olursa olsun, karşılanması gereken en önemli ön şart, liflerin beton matrisinde homojen bir şekilde dağılması ve bu dağılımın, betonun karılmasından sonra da priz aldıktan sonra da bozulmamasıdır.

Üniform bir şekilde dağılan lifler, beton içerisinde oluşan çatlak oluşumunu önlemekte, oluşan mikro çatlakların büyümesini engellemekte ve oluşan çatlakların beton içerisinde ilerleyişini geciktirerek betonu daha dayanıklı hale getirmektedir. Liflerin betona olan bu katkısından ötürü, betonun çekme ve eğilme dayanımı ile birlikte darbe etkisine karşı dayanımı da aşınma dayanımı da arttırılır. Bu nedenle betonarme kazıklar, yol satırları, temiz ve atık su boruları, bazı endüstriyel ölçekli imalathanelerin döşeme betonu ve prefabrik yapı elemanları yapımında lif içeren beton kullanılması durumunda daha iyi sonuç alınmaktadır (Ünal, 1994). Lif çeşitlerinin tipik özellikleri Tablo 1.1.'de verilmektedir (Topçu, 2006).

**Tablo 1.1.** Lif çeşitlerinin tipik özellikleri

Lif Tipi	Çekme Dayanımı (ksi*)	Young Modülü ( $10^3$ ksi*)	En Yüksek Uzama (%)	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )
Akrilik	30-60	0,3	25-45	1,1
Asbest	80-140	12-20	~ 0,6	3,2
Pamuk	60-100	0,7	3-10	1,5
Cam	150-550	10	1,5-3,5	2,5
Naylon	110-120	0,6	16-20	1,1
Polyester	105-125	1,2	11-13	1,4
Polietilen	~100	0,02-0,06	~ 10	0,95
Polipropilen	80-110	0,5	~ 25	0,90
Rayon	60-90	1	10-25	1,5
Taş Yünü	70-110	10-17	~ 0,6	2,7
Çelik	40-400	29	0,5-35	7,8

\*1 ksi (inç kare başına kilo pound) = 6,9 MPa

Tablo 1.1. incelendiğinde; akrilik, pamuk, naylon, polyester, polietilen, polipropilen ve rayon (suni ipek)'un young modüllerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buna karşın; çelik, taş yünü ve asbestin young modülleri nispeten daha yüksektir. Tablodaki liflerden çeliğin, hem yüksek çekme dayanımı hem de young modülünün yüksek olduğu görülmektedir.

Tadepalli ve arkadaşları, (2013) 15x15x50 cm boyutlarındaki kiriş numunelerinde takviye olarak farklı boy, çap ve narinlik oranına sahip çelik lifler kullanmıştır. Çelik liflerin boyutunun, şeklinin ve miktarının betonun basınç dayanımı, ilk çatlak eğilme dayanımı ve nihai eğilme dayanımı, elastisite modülü, eğilme tokluğu ve betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için bir dizi deney yapmıştır. Deneysel sonuçlar, betona çelik lif eklenmesiyle basınç dayanımı ve elastisite modülünün bir miktar arttırıldığını, buna karşın eğilme dayanımı, eğilme tokluğu ve sünekliğin önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Yadav ve Parihar,  $d_{max}$  20 mm olan agrega ve 60 mm uzunluğunda ve narinlik oranı 80 olan kanca uçlu çelik lif kullandıkları çalışmalarında, % 0,45, % 0,95, % 1,45, % 1,95 olmak üzere dört farklı lif oranı kullanmışlardır. Deney sonunda, lif içermeyen numunelerde çatlakların yayıldığı, lifli numunelerde ise çatlak ilerlemesinin sınırlandırıldığı dolayısıyla lifli numunelerin daha sünek davrandığı görülmüştür. Ayrıca lif içeren tüm karışımların kontrol betonuna kıyasla daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Ancak karışımdaki lif miktarı arttıkça işlenebilirlik düşmüştür (Yadav

ve Parihar, 2018).

Halilov, silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcının lifli beton üzerindeki etkisini araştırdığı çalışmasında 30 mm uzunluğunda ve narinlik derecesi 60 olan lifler kullanmıştır. Lif içeren numunelerin eğilmede çekme dayanımlarının daha yüksek olduğu deney sonuçlarında görülmüştür. Ayrıca lifli beton basınç dayanım değerlerinin hem laboratuvar küründe hem de açık hava küründe daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Yine laboratuvarda kürlenmiş numunelerden donma çözülme etkisine karşı en yüksek dayanım lifli betonlara aittir (Halilov, 2003).

Behbahani ve arkadaşlarına göre, geleneksel betonarme yapılarda çatlama sebebiyle oluşan korozyonun, çelik lifli betonlarda çok daha az olduğu gözlemlenmiştir. Yine iyi sıkıştırılmış lifli betonun yüzeyine yakın bölgelerinde, yüksek klor iyonuna maruz kalınan ortamlarda bile sınırlı bir korozyon olduğunu söyler. Hacimce % 1 çelik lif içeren betonun kesme dayanımının geleneksel betona kıyasla 1,7 kata kadar arttığı görülmüştür (Behbahani ve ark., 2013).

Marco ve ark., (2018) çatlama yapmayan çelik lifli betonların geleneksel betonla kıyaslandığında, çelik liflerin matris içinde birbirinden ayrık durması, üretim sürecinde soğuk çekilen liflerin sıcak haddelenmiş geleneksel donatıya göre daha homojen ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olması ve fiber-matris ara yüzünün daha yoğun ve daha homojen olması gibi üç temel sebepten ötürü, klorür ve karbonatlaşmaya karşı daha dayanıklı olduğunu tespit etmiştir.

Neves ve Almeida, (2005) çelik lifli betonların basınç dayanımı üzerinde; matris mukavemeti, lif içeriği ve lif çapının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada CEM I 42,5 R çimento içeren 250 kg/m<sup>3</sup> ve 450 kg/m<sup>3</sup> dozajlı iki farklı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlara 30 mm uzunluğunda 0,55 ve 0,38 çaplarında iki farklı lif eklenmiştir. Deney sonuçlarında, basınç dayanımına hem lif karakterinin hem de matris mukavemetinin etki ettiği görülmüştür. Ayrıca yüksek dayanımlı matriste tokluğun fiber takviyesine daha duyarlı olduğu ortaya çıkmıştır.

Torres ve Lantsoght, (2019) lif miktarının kiriş kesme mukavemeti üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında lif kullanımının kiriş kesme mukavemetini ve tokluğu olumlu yönde etkilediğini göstermişlerdir. Hacimce % 1,2 lif kullanılması durumunda eğilmede çekme dayanımının % 24 arttığı gözlemlenmiştir.

Kwak ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, hacimce 0,5 ve 0,75 oranlarında, 50 mm

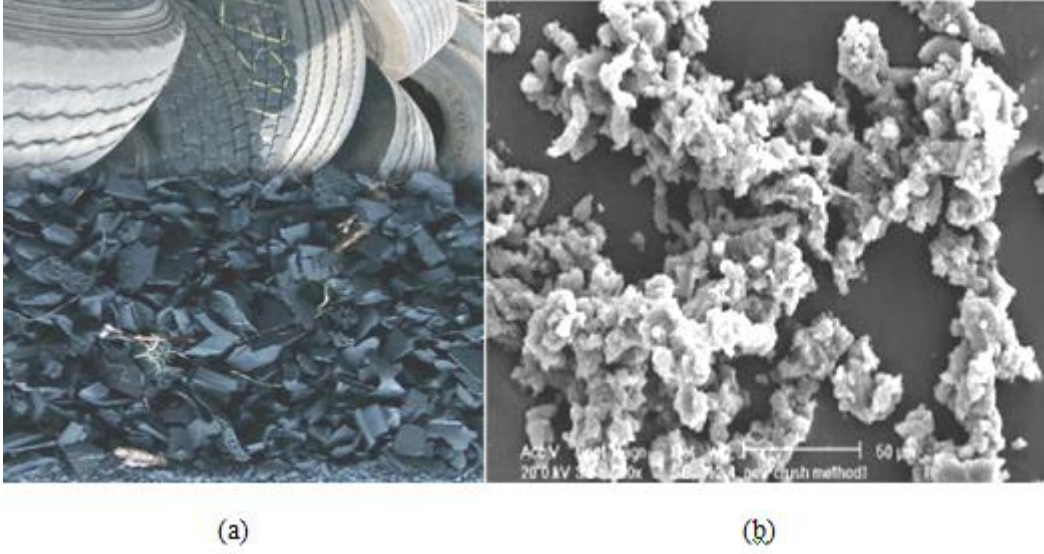
uzunluğa 0,8 mm çapa sahip kanca uçlu lifler kullanılmıştır. Lif kullanılan tüm kirişlerde çatlak aralıkları ve boyutlarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca lif kullanımı ile deformasyon kapasitesi artmış gevreklik azalmıştır (Kwak ve ark., 2002).

Alkayış ve Başyigit, (2021) betonda lif kullanılması durumunda lif türü, lif miktarı ve narinlik oranının darbe dayanımına etkilerini araştırmışlardır. Deney sonuçları lif kullanımı ile darbe direnci arasında doğru orantı olduğunu göstermiştir. Yine lif boyu uzadıkça darbe dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir.

Demiralp ve arkadaşları, (2021) agrega tipinin elik lifli betonda kırılma davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kırma taş agrega ve doğal agregalı olmak üzere iki farklı karışım hazırlanmıştır. Deney sonuçları her iki karışımın basınç dayanımlarının benzer olduğunu ortaya koymuştur. Kırma taş kullanılan karışımların eğilme dayanımları doğal agrega kullanılan karışımlardan yüksek çıkmıştır. Yine kırılma enerjileri karşılaştırıldığında kırma taş agrega ile üretilen elik lifli kiriş numunelerinin daha sünek davrandığı görülmüştür.

## **1.2. Atık Lastik Parçalarının Agrega Olarak Kullanılabilirliği**

Beton içerisinde kullanılan çimentonun temel görevi; beton hacminin yaklaşık % 60-75'ini oluşturan agregaları yapıştırarak bir arada tutmaktır. Çimentonun bu bağlayıcılık özelliğini en verimli şekilde yerine getirebilmesi için doğru sınıf ve dozajda imento seçilmesi ve kullanılan agreganın fiziksel özellikleri, imento ile zararlı (yumuşak taneler, kil, çözünebilir tuzlar ve organik maddeler vb.) kimyasal reaksiyona girmemesi gerekmektedir. Seçilen agrega; boyutu, tane dağılımı, yüzey yapısı, şekli, dayanımı ve rijitliği gibi birçok açıdan uygun olmalıdır (TS 802, 2016). Atık lastiklerinden üretilen agrega ve ALA'na ait SEM görüntüsü Resim 1.2.'de verilmiştir (Sofi, 2018).



**Resim 1.2.** (a) Atık lastik agregası, b) ALA'nın SEM görüntüsü

Atık lastikler, birim ağırlıklarının düşük olması, yüksek yalıtım özelliği ve tokluk gibi sebeplerden ötürü asfalt ve betonda agrega olarak, demiryolu ve dalgakıranlarda şok emici olarak, otoyollarda çarpma bariyeri yapımında, istinat duvarı yapımında, yürüyüş yollarında ve binalarda sismik izolasyonda vb. kullanılmaktadır (Koçak ve Alpaslan, 2011).

Taşıtlarda kullanılan lastiklerin servis ömrü üretim tarihinden itibaren 3 yıl veya 50.000 km civarındadır. Bu süre sonunda ömrünü tamamlamış lastiklerin bir kısmı yüzeyleri kaplanarak tekrar kullanıma sunulmakta geri kalanlar ise atık lastik olmaktadır. Türkiye'de yılda yaklaşık 250 bin ton lastik servis ömrünü tamamlamaktadır. 2017 yılının ilk sekiz ayında 101.100 ton ömrünü tamamlamış lastik toplanmıştır. Toplanan 101.100 ton lastiğin yaklaşık % 64'ü malzeme, % 36'si ise enerji olarak geri dönüştürülmüştür (URL-1, 2017). Malzeme olarak geri dönüştürülemeyen bu atıklar için en basit ve düşük maliyetli bertaraf yöntemi lastiklerin yakılmasıdır. Ancak gerekli tedbirler alınmadan yakılan lastikler yaydıkları zararlı maddeler ile çevreyi kirletmektedir. Yakılan lastik dumanında; % 25 - % 30 civarında karbon siyahı, uçucu organikler, yarı-uçucu organikler, çok halkalı hidrokarbonlar, yağ, kükürt oksit, azot oksit, karbon oksit, uçucu partiküller ve arsenik, kadmiyum, krom, kurşun, çinko, demir gibi metaller bulunmaktadır. Yanma sonrası atmosfere yayılan bu kirleticiler toprak ve suların kirlenmesine sebep olarak insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu açıdan bakıldığında atık lastiklerin ısı enerjisi olarak tekrar kullanımı doğa dostu ve sürdürülebilir bir geri dönüşüm yöntemi olmaktan çok uzaktır.

Atık araç lastiklerinin öğütülerek, değişken oranlarda beton içinde agrega ikamesi olarak kullanılabilirliği üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Ahmad ve arkadaşları (1997) yaptıkları çalışmada kauçuk içeren beton karışımlarının donma çözünme etkilerini incelemiş, mikroskobik analiz sonuçları çimento ağırlığına göre % 10 ve % 15 kauçuk içeren karışımların donma çözünme dayanımlarının yüksek olduğunu göstermiştir.

Emiroğlu (2006) yaptığı deneysel çalışmada; beton içerisine hacimce % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında iri ve ince agrega ikamesi olarak öğütülmüş atık lastik kullanmıştır. Sertleşmiş beton numunelerin üzerinde yapılan deneyler neticesinde betonun birim ağırlığının düştüğü, kullanılan lastik miktarı arttıkça basınç ve çekme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir.

Turgut ve arkadaşları (2007) atık lastiklerden kesilmiş lastik şeritler içeren betonun yalıtım özelliklerini irdelemiştir. Deney sonuçları atık lastik şeritleri içeren numunelerin kontrol betonuna kıyasla % 13,3'e kadar daha iyi yalıtım sağladığını göstermiştir.

Sofi (2018) yaptığı çalışmada ince agrega ikamesi olarak betona eklenen öğütülmüş lastikli numunelerden agrega ağırlığının % 12,5'e kadar kullanılması durumunda 90 günlük basınç dayanımlarının 60 MPa üzerinde olduğunu göstermiştir. Daha yüksek oranlarda lastik agregası kullanılan numunelerde lastik miktarı arttıkça basınç dayanımının düştüğü görülmüştür. % 12,5'e kadar kırılmış lastik içeren betonların kontrol numunesine oranla daha az veya aynı miktarda su emdiği görülmüştür. Çalışmada, kırılmış lastik içeren numunelerin aşınma dirençlerinin yüksek olduğundan, lastikli betonun kaldırım, beton yol, tünel ve hidrolik yapılarda veya aşınma etkisine maruz kalan yüzeylerde kullanılması önerilmektedir.

Thomas ve Gupta (2016) silis dumanı, uçucu kül ve ince öğütülmüş lastik agrega kullanıldığında, numunelerin su emme miktarlarının azaldığını gözlemlemiştir. Yine aynı çalışmada, atık lastik kullanılan numunelerin donma çözülme etkisine karşı yüksek direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca lastik içeren betonun asit etkisine ve klor geçirgenliğine karşı da dayanıklı olduğu anlaşılmıştır.

Cemalgil ve Etili (2020) farklı narinlik oranlarına (h/b) sahip olarak üretilen kauçuk modifiyeli kendiliğinden yerleşen beton numunelerinin fiziksel ve mekanik davranışlarını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Beton üretiminde kullanılan doğal kum ikamesi olarak %5, % 10, % 15 ve % 20 olmak üzere dört farklı oranda atık lastik kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda agrega (kum) ikamesi olarak % 20 oranına kadar atık lastik

kullanılması durumunda taze beton özelliklerinde kayda değer olumlu bir değişim gözlenmemiştir. Ancak atık araç lastiği agregası miktarı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür.

Güneyisi (2010) uçucu külün, ince agrega ikamesi olarak kırılmış lastik eklenmiş karışımların taze beton özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. İnce agrega hacmine oranla % 0, % 5, % 15 ve % 25 oranlarında kırılmış lastik ve % 0, % 20, % 40 ve % 60 oranlarında uçucu kül kullanılan numunelerden uçucu kül kullanılmayan taze beton özelliklerinin kötüleştiği gözlemlenmiştir.

Khatib ve Bayomy (1999) Portland çimentosu betonunda (PCC) geri dönüştürülmüş atık lastik kauçuğunun kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada; ince kırılmış ve kaba olmak üzere iki farklı ebatla ve farklı oranlarda karışıma lastik parçaları eklemiştir. Deney sonucunda toplam agrega hacminin % 57'sine kadar lastik ikameli beton üretilebileceği deneysel olarak kanıtlanmıştır. Ancak dayanımdan çok fazla ödün vermemek adına atık lastik oranının maksimum % 20 olarak sınırlandırılması tavsiye edilmiştir.

Zheng ve arkadaşları (2008) normal betondaki iri agrega yerine değişik oranlarda öğütülmüş ve kırılmış lastik kullanarak lastik tipi ve içeriğinin dayanım ve deformasyon üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonunda; lastik içeriği arttıkça, basınç dayanımı ile dinamik ve statik elastisite modülünün önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmiştir. Burada iri kırılmış lastik parçalarının ince öğütülmüş lastik parçacıklarına oranla daha fazla olumsuz etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Lastik içerikli betonun normal betona oranla daha düşük gevreklik indeksine sahip olduğu dolayısıyla daha sünek davrandığı görülmüştür.

Topçu ve Demir (2007) çalışmalarında, deniz suyu, donma çözülme ve yüksek sıcaklık gibi dış etkilere maruz kalan atık lastik içeren betonun dayanımını incelemişlerdir. 300 kg/m<sup>3</sup> CEM II/B 32,5 çimento ve 0,5 su/çimento oranına sahip çimento hamuruna % 40'a kadar ince agrega ikamesi olarak atık lastik agregası kullanmışlardır. Deney sonuçlarından, çevresel koşulların çok sert olmadığı bölgelerde % 10'a kadar atık lastik agrega kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Topçu ve arkadaşları (2014) üç farklı tane boyutunda ve kum ikamesi olarak % 10, % 20, % 30, % 40, % 50 oranında atık otomobil lastiği içeren numunelerin 7 ve 28 günlük dayanımlarını incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre atık lastik agrega miktarı arttıkça

birim ağırlık, ultra ses geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri azalmıştır. Araştırmacılar, atık lastik içeren harçların ses izolasyonu istenen boşluklu ve hafif bölme duvarlarında, birtakım dekorasyon işleri ve ısı yalıtımlı yapı elemanlarında kullanılmasını önermişlerdir.

Son ve arkadaşları (2011) 24 ve 28 MPa beton basınç dayanımlarına sahip, 0,6 - 1,0 mm aralığında boyutlara sahip öğütülmüş atık lastik içeren kolonların deformasyonu ve enerji yutma kapasitelerini araştırmak için kolon numuneleri hazırlamışlardır. Atık lastik içeren kolonlarda, basınç dayanımında % 12 ila % 32 arasında, elastisite modülünde ise % 10-15 arasında bir azalma gözlemlenmiştir. Buna karşın beton karışımlarında % 0,5 ile % 1 arasında atık lastik kullanılması durumunda numunelerin eğilme sünekliğinin % 45 ila % 90'a kadar arttığı gözlemlenmiştir. Bu da atık lastik kullanılan kolonların deprem etkileri altında daha büyük enerji yutma kapasiteleri olacağı anlamına gelmektedir.

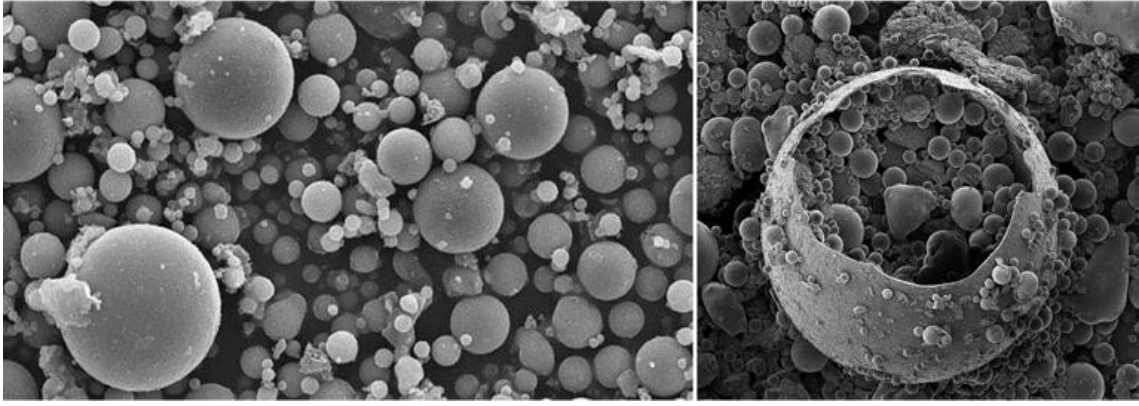
Malak (2021) kırma taş agrega ikamesi olarak, toplam agrega hacmine oranla % 0, % 8 ve % 16 oranlarında atık lastik kauçuğu içeren 3 farklı beton karışımı hazırlamıştır. Numunelerin test sonuçlarında, atık lastik miktarı ile beton dayanımı arasında negatif korelasyon tespit edilmiştir. Bu ters orantının muhtemel sebebi kauçuğun ince agrega yerine kullanılması olabilir. Ancak yine de % 8 atık lastik agregası kullanılan karışımın 28 günlük basınç dayanımının 40 MPa'ın üzerinde çıkması tatmin edicidir.

Eren (2019) doktora çalışmasında, atık mermer tozu ve lastik agrega kullanılarak üretilen betonların 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını incelemiştir. Yapılan deneylerde uçucu kül kullanımı miktarı arttıkça basınç dayanımının arttığı, agrega olarak atık lastik kullanımı arttıkça dayanımın düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak bu azalma miktarı 90 günlük basınç dayanımında da görülmüştür. Uçucu külün puzolanik etkisi ile ileri yaş dayanımının arttığı düşünülmektedir. Bu sonuçlar atık lastiğin agrega olarak kullanıldığı betonlarda uçucu kül ile birlikte kullanımının faydalı olacağını düşündürmektedir.

Öztürk (2016), 25, 50 ve 75 mm uzunlukta kesilen atık lastikleri iri agrega ikamesi olarak % 5, % 10 ve % 15 oranlarında yer değiştirerek kullanmıştır. Deney sonuçları, lastik agrega kullanımının taze betonun özgül ağırlığında düşüğe sebep olduğu gözlemlenmiştir. Sertleşmiş numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları da düşmüştür. Dayanım deney sonuçları incelendiğinde % 10 lif içeren numunelerde dayanımın arttığı görülmüştür.

### 1.3. Puzolan Kullanımının Betona Etkileri

Puzolanik malzemeler; tek başlarına kullanıldıklarında bağlayıcılık özeliği çok zayıf olan malzemelerdir. Ancak ince öğütülerek sulu ortamda kalsiyum hidroksitle tepkimeye girdiğinde hidrolik bağlayıcılık kazanan, silika ve alüminat içeren, çoğunlukla endüstriyel yan ürün olarak veya tabiattan elde edilen malzemelerdir. Volkan külü, tuf, diatomlu toprak ve kil gibi doğal puzolanlar ile uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi yapay puzolanlar bulunmaktadır. Puzolanlar hem betonun mekanik özelliklerine olumlu etkileri hem de çimento ikamesi olarak kullanılabilirler için beton sektöründe yoğun şekilde kullanılmaktadır. Resim 1.3.'te Uçucu külün mikroskop görüntüsü verilmiştir (Özcan ve Güngör, 2019).



**Resim 1.3.** Uçucu külün mikroskop görüntüsü

Puzolanlar;

- ✓ İşlenebilirliği artırır
- ✓ Terlemeyi azaltır
- ✓ Segregasyonu azaltır
- ✓ Hidratasyon ısı hızı ve miktarını azaltır
- ✓ Su geçirgenliğini azaltır
- ✓ Alkali-agrega reaksiyonunu azaltır
- ✓ Sülfat etkisine karşı dayanımı artırır

- ✓ Nihai basınç dayanımını olumlu etkiler
- ✓ Maliyeti azaltır

Ancak puzolan kullanımının bu olumlu etkilerinin yanında bir takım olumsuz etkileri de mevcuttur. Puzolanlar özellikle düşük sıcaklıklarda priz geciktirici etki gösteririler. Dolayısıyla puzolan kullanılan betonların erken dayanımları düşük olabilmektedir. Yine puzolanların daha dikkatli ve uzun süreli kür edilmeleri gerekir. Betonun kullanım amacına göre daha fazla miktarda hava sürükleyici madde kullanımı gerekebilmektedir (S.T. Erdoğan ve T.Y. Erdoğan, 2007).

Kayali (2004) çalışmasında, polipropilen ve çelik lifler ile yüksek miktarda uçucu kül kullanmıştır. Araştırma farklı tip liflerin uçucu kül kullanımı ile betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. İnce agreganın üçte biri oranında uçucu kül ile ikame edildiğinde mekanik özelliklerin önemli ölçüde geliştirildiği ortaya çıkmıştır. Yüksek miktarda uçucu kül içeren, özellikle % 1 oranında çelik lifli numunelerin yalın betona kıyasla iki kata kadar basınç ve çekme dayanımı değerlerine ulaştığı görülmüştür. Ayrıca yüksek miktarda uçucu kül ve çelik lif içeren numunelerin sünekliği olumlu etkilediği görülmüştür. Kayali, beton üretiminde elyaf takviyesinin verimini arttırmak için yüksek miktarda uçucu kül ilavesinin gerekli olduğunu savunmaktadır.

Chousidis ve arkadaşları (2015) ağırlıkça % 5 ve % 10 oranında çimento ikamesi olarak uçucu kül ekledikleri betonların kılcal su emmelerinin önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Kılcal su emme ve poroziteyi azaltmasının yanında, 13 ay boyunca sodyum klorüre maruz bırakılan donatılı numunelerin donatılarındaki teorik kütle kaybı şahit betonunki ile aynı olmuştur. Çalışma, uçucu kül kullanılan numunelerin basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde de dikkate değer olumlu etkileri olduğunu göstermiştir.

Atiş ve Karahan (2009) kütlece % 0, % 15 ve % 30 uçucu kül eklenen betonda, hacimce % 0, % 0,25, % 0,50, % 1 ve % 1,5 oranında çelik lif ekledikleri portland çimentolu karışımların taze ve sertleşmiş beton özelliklerini incelemişlerdir. Deney sonuçları lif eklenmesi durumunda çekme mukavemeti, kuruma büzülmesi ve donma çözülme direnci üzerinde iyileştirici etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çelik lif kullanımından kaynaklanan işlenebilirlikteki azalmanın, uçucu kül kullanımıyla beraber iyileştirildiği gösterilmiştir.

Chandramouli ve arkadaşları (2017) uçucu kül kullanımı ile korozyon başlama

arasındaki ilişkiyi inceledikleri araştırmada, farklı kalitede beton sınıfları için farklı oranda uçucu kül ilavesi yaparak numuneleri deneye tabi tutmuşlardır. Araştırma sonuçları kontrol betonunda 10 günde korozyonun başladığını göstermiştir. C25 sınıfı bir betonda % 30 uçucu kül ikamesi kullanılması durumunda korozyonun başlangıcının 52. Gün olduğu görülmüştür. Beton kalite sınıfı arttıkça korozyon başlama süresinin de uzadığı görülmektedir. Ayrıca uçucu kül eklenen betonun 28 günlük basınç dayanımı kontrol numunesinden daha düşük çıkmasına rağmen 90 günlük basınç dayanımları karşılaştırıldığında uçucu kül ilaveli betonun daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir.

#### **1.4. Rötire Çeşitleri**

Liflerin beton davranışına etkilerini inceleyebilmek için öncelikle rötire çatlaklarının oluşum sebeplerini incelemek gerekir. Hidratasyonu ve suyun priz sürecindeki betona etkilerini anlamadan da rötire oluşumunu açıklamak mümkün değildir.

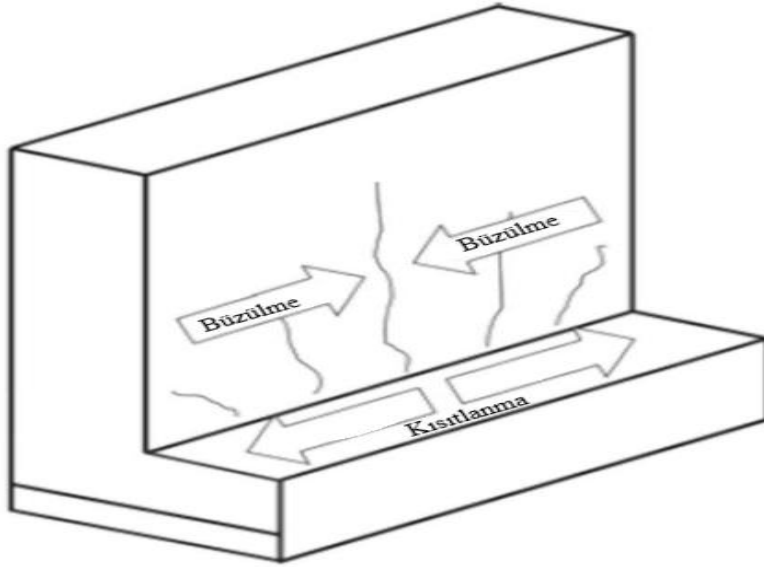
Çimentoyu oluşturan maddelerin su ile yaptıkları reaksiyona hidratasyon denmektedir. Çimentonun su ile reaksiyona girebilmesi için taneciklerinin 5 µm-90 µm inceliğinde öğütülmüş olması gerekir (Bennett ve Loat, 1970). Hidratasyon geri dönüşü olmayan bir reaksiyondur ve suyun çimentoyla temasa geçtiği andan itibaren hidratasyon zamanla artar.

Hidratasyon hızını etkileyen en önemli faktör çimento tanelerinin hangi incelikte öğütüldüğüdür. İnce öğütülen tanelerin yüzey alanı artar. Su ile reaksiyona giren yüzey alanı arttığından ince öğütülmüş çimentoların hidratasyon hızları yüksektir. Hidratasyon miktarı ile dayanım arasında pozitif korelasyon vardır. Hidratasyon hızı çeşitli sebeplerle azalırsa dayanımda da bir miktar azalma görülür. Hidratasyon süreci ile beton dayanımı arasında yakın bir ilişki vardır (Bennett ve Loat, 1970).

##### **1.4.1. Termik rötire**

Priz süreci sonunda sertleşen betondaki hidratasyon ısısı tüm kütleyle ısıtmaya yetmediği durumda kütlelerin ısı kaybetmesiyle oluşan büzülme termik rötire denir. Erken yaşlarda ortaya çıkan termik rötire özellikle kütle betonlarında büyük sorunlara sebep olur.

Termik rötre sebebiyle oluşan çatlaklar geniş ve derin olur. Hidratasyon ısı yüksek çimento kullanılması, hızlı beton dökülmesi, kütle betonunun kalınlığının fazla olması termik rötre oluşumunu arttırmaktadır (Alkan, 2004). Şekil 1.1.'de termal sebeplerle büzülen betonda oluşan rötre çatlakları gösterilmektedir (URL-2, 2021).



Şekil 1.1. Termik rötre

#### 1.4.2. Bünyesel rötre

Hidratasyon reaksiyonunda; reaksiyona giren maddelerin ve suyun toplam hacmi, reaksiyonda ortaya çıkan ürünün hacminden daha büyüktür. Hidratasyon sonunda toplam hacimde mutlak bir büzülme olur. Bu nedenle bünyesel rötrenin engellenmesi mümkün değildir. Buna karşın hidrate jelin görünen hacmi tersine genişler. Oluşan jel çok boşlukludur ve görünen hacmi büyüktür. Serbest rötre oluşması engellenirse çatlaklar oluşur. Bunlar ince ve fazla sayıda çatlaklardır.

c : çimento mutlak hacmi ( $m^3$ )

e : suyun hacmi ( $m^3$ )

vh : çimento hamurunun mutlak hacmi ( $m^3$ ), olmak üzere

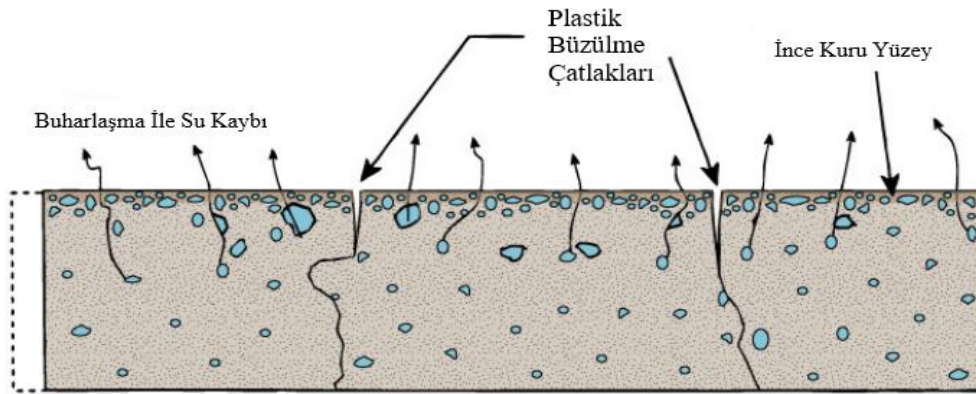
$vh < (c+e)$  : Bu nedenle kaçınılmaz bir rötre türüdür. Priz süresince meydana gelir. Nispeten ince, çok sayıda çatlak oluşumuna neden olur (URL-3, 2021).

### 1.4.3. Plastik rötre

Plastik rötre, taze betonda ve priz süresi boyunca gerçekleşir. Düşük işlenebilirlikli ve zayıf kohezyona sahip betonlarda iri agrega taneleri dibe çöker. Çimento topaklaşarak bir miktar suyu kusar. Kusulan su ise yüzeye çıkmaya başlar. Yüzeyde biriken suyun buharlaşma hızı yüksek olursa betonda da yüksek şiddetli bir büzülme gerçekleşir. Buharlaşma, hamur fazı henüz plastikken olursa su kanallara çöker ve kanallar kapanır. Bu büzülme betona çok fazla zarar vermez çünkü ortam henüz plastiktir.

Buharlaşan suyun miktarı terleme ile atılan su miktarını aşarsa plastik rötre daha da belirgin hale gelir. Plastik rötre, donatıların ve iri agregaların alt yüzlerinde hava boşlukları oluşmasına ve aderansın düşmesine neden olur. Plastik rötre çatlakları dökümden sonraki gün üst donatıların üstünde meydana gelen çatlaklar ile kendini gösterir. Rüzgarlı hava veya havadaki nemin çok düşük oluşu veya buharlaşma hızının yüksek olduğu yerlerde sıklıkla meydana gelir. Hava alanları, beton yollar gibi buharlaşma yüzeyi fazla olan yerlerde rastlanır. Priz hızlandırıcı kullanımı, terlemenin kontrol altında tutulması ve yüzey perdahlama işleminin geciktirilmesi alınabilecek arasındadır (Alkan, 2004).

Ayrıca ortamı nemli tutmak, rüzgârı önleyecek tedbirler almak da gerekmektedir. Terlemenin kontrol altında tutulması ve suyun beton kütlesi içinde tutulması için kohezyonu yüksek beton ile mümkündür. Çimento dozajının bir miktar artırılması çoğu zaman yeterli olmaktadır. Ayrıca hava sürükleyici katkı maddeleri kullanımı da taze betondaki kapiler borucukları tıkadığından suyun kütle içinde hapsolmesini sağlar (Alkan, 2004). Şekil 1.2.'de bir kütle betonunda plastik rötre oluşumu tasvir edilmektedir (URL-4, 2021).



Şekil 1.2. Plastik rötre

#### 1.4.4. Hidrolik rötre

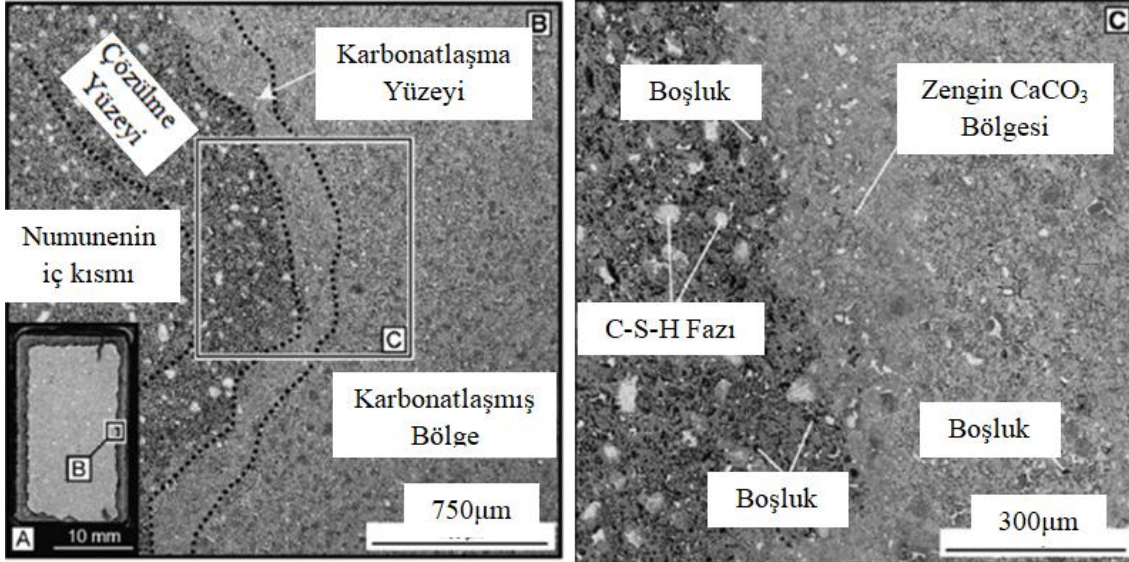
Sertleşmiş beton rötresi veya kuruma rötresi de denilen hidrolik rötre, üretimi izleyen günden itibaren başlar ve yaklaşık 5 - 6 ay kadar devam eder. Hidrolik rtreinin büyük bölümü üretimi izleyen ilk ay gerçekleşir. Sertleşmekte olan çimento hamuru jel yapıdadır. Katı taneciklerin arasında bulunan su molekülleri bu tanecikleri bir arada tutan, bağlayan elektrostatik kuvvetler oluştururlar (Kovler, 1994). Birkaç angström kalınlığındaki absorbe su tabakası incelince katı taneleri birbirine doğru çeken kuvvetler artarken, su tabakası kalınlaşınca çekim kuvveti azalmaktadır. Çimento hamurunun kurumasıyla birlikte kılcal boşluklarda bulunan su buharlaşır, bu boşluklara jel suyu akımı başlar ve daha sonra kılcal boşluklara akan bu jel suyu da kısmen buharlaşır. Sonuçta absorbe su tabakasının kalınlığı azalır ve taneler arasındaki uzaklığın azalması ile birlikte hacim büzülmesi oluşur. Eğer beton bir dış yük etkisinde ise jel suyunun hareketi ayrıca artar ve zamana bağlı olarak numune boyutları daha da küçülür. Kurumanın tersi olan durum, çimento hamuru, harç veya betonun su içinde kalmasıdır. Bu durumda absorbe su tabakasının kalınlığı artarak taneleri birbirinden uzaklaştıracak, toplam hacimde bir artış gerçekleşecektir. Buna şişme denir. Mutlak değerce şişme rtreden azdır. Beton tekrarlı kuruma ıslanma etkisinde kalırsa rötre ve şişme olayı ard arda meydana gelebilir.

Rötreye sebep olan jellerin ilki C<sub>2</sub>S hidrate ögeleri jelleridir. Bu sebeple C<sub>2</sub>S oranı yüksek olan çimentoların son rötre değerlerinin fazla olması beklenir. Rötre olayı görüldüğü gibi tamamen çimento varlığına bağlıdır. Harç ve özellikle betonlarda agreganın bulunması hacim büzülmesine karşı koyar. Agregatanelerinin elastiklik modülleri ne kadar yüksekse çimentonun büzülme doğrultusundaki basınç nedeniyle oluşacak büzülmeye o kadar çok engel olur. Betonda agrega miktarındaki artış ile çimento miktarında azalma olması durumunda bu rötre türü de daha az gerçekleşecektir (Kovler, 1994).

#### 1.4.5. Karbonatlaşma rötresi

Karbonlaşma sebebiyle gerçekleşen büzülmenin yapısı daha farklıdır. Atmosferde bulunan CO<sub>2</sub>, ortamdaki nemin de etkisiyle hidrate çimento taneleri ile reaksiyona girer. Ca(OH)<sub>2</sub> karbonatlaşarak CaCO<sub>3</sub> oluşur. Karbonatlaşma, betonun nem içeriğine ve bağlı neme de bağlıdır. Çünkü CO<sub>2</sub>'nin Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girmesiyle oluşan nem dışarı

atılmalıdır. Beton numune içinde karbonatlaşmanın gerçekleşme biçimi Resim 1.4.'te gösterilmiştir (Savija ve Lukovic, 2016).



**Resim 1.4.** Karbonatlaşmanın gerçekleşme biçimi

Atmosferde bulunan nem miktarı ile numune içindeki nem dengeye ulaştığında reaksiyon durur ve karbonatlaşma gerçekleşmez. Karbonatlaşma aynı zamanda beton ağırlığının da artmasına neden olur. Bu olayın bir büzülme ile meydana geldiği gözlenmiştir. Rutubetin çok yüksek olduğu ortamlarda (%100), CO<sub>2</sub> difüzyonu olamaz ve karbonatlaşma rötresi yoktur. Rutubetin çok düşük olduğu ortamlarda ise salt CO<sub>2</sub> difüzyonu anlam taşımaz. Rötreye için CO<sub>2</sub>'nin asit karbonik şeklinde süzülmesi gerekir (Alkan, 2004).

Karbonatlaşmanın mukavemeti bir miktar arttırdığı ve geçirimsizliği de bir miktar azalttığı gözlemlenmiştir. Karbonatlaşma rötresi daha çok prefabrike eleman üretiminde dikkate alınan bir özelliktir. Prefabrik yapı elemanları, priz süresinin suni olarak hızlandırılıp ortamın CO<sub>2</sub>'ye doymuş hale getirilmesi ile karbonatlaşma rötresinin önceden oluşturularak nihai değerine ulaşması sağlanır (Alkan, 2004).

Choi ve arkadaşları, (2011), beton yollarda lif kullanımının hidrolik rötreye (kuruma rötresi) ve bünyesel rötreye üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, düşük narinlik değerine sahip 30 mm uzunlukta 3 farklı lif ile 12 mm uzunluğunda, 1000 narinlik oranına sahip naylon lifler ayrı ayrı ve birlikte karışıma eklenerek teste tabi tutulmuştur. Yol kaplaması hacminin % 0,2 - % 0,3 oranlarında lif kullanılmıştır. Fiber kullanılan

numunelerde büzülmenin 1/4 oranına kadar dtg grlmtr. % 0,2 oranında tek tip naylon lif kullanılan numunelerin kuruma rötresi üzerinde en büyük katkıyı sağladığı grlmtr. Yine bünyesel rötre üzerinde 0,1 oranlarında naylon ve elik liflerin birlikte kullanıldığı lifli karışımlar ile % 0,2 oranında tek başına PVA (Poli vinil alkol) lif içeren karışımın en büyük katkıyı sağladığı grlmtr.

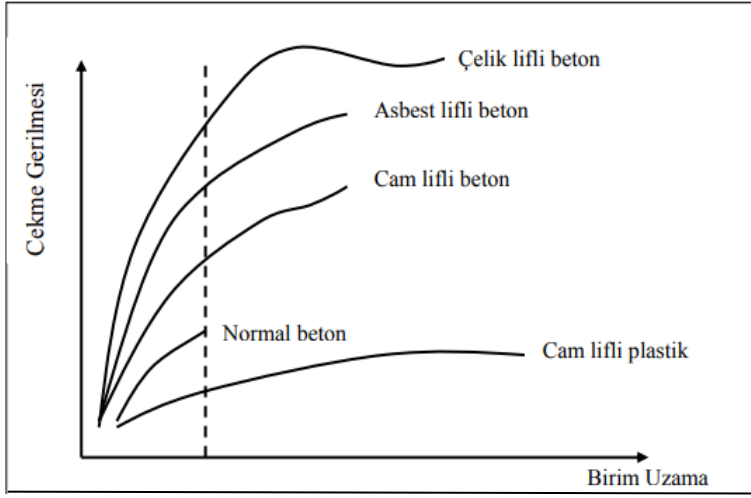
## **1.5. Liflerin Beton İçerisindeki Davranışını Etkileyen Faktörler**

### **1.5.1. Liflerin beton özelliklerine etkisi**

Lifler yapı malzemelerinde M 2500'lerden beri kullanılmaktadır. Liflerin ilk örnekleri, kerpiç, tuğla ve harçlarda kullanılan; saman çöpleri, keçi kılı, at yelesi gibi doğal liflerdir. 1900'l yıllarda asbestin betonda kullanılmasından itibaren her gün yeni lif tipleri için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde birçok lif türü bulunmakla birlikte betonda en yaygın kullanılanlar; elik, polimer ve cam liflerdir.

Betonun ekme dayanımı ile çekme birim deformasyon kapasitesi çok düşük olduğundan betonun bu eksikliklerini gidermek amacıyla çeşitli lifler kullanılmaktadır. Lif kullanılarak imal edilen betonlara lifli beton adı verilmektedir. Betonda lif ilavesi; plastik büzülme (rötre) atlağı oluşumunu engellemekte, betonun enerji yutma kapasitesi, dayanımı ve süneklik gibi özellikleri arttırmaktadır (Kozak, 2013). Lifler betonun çekme dayanımını arttırır.

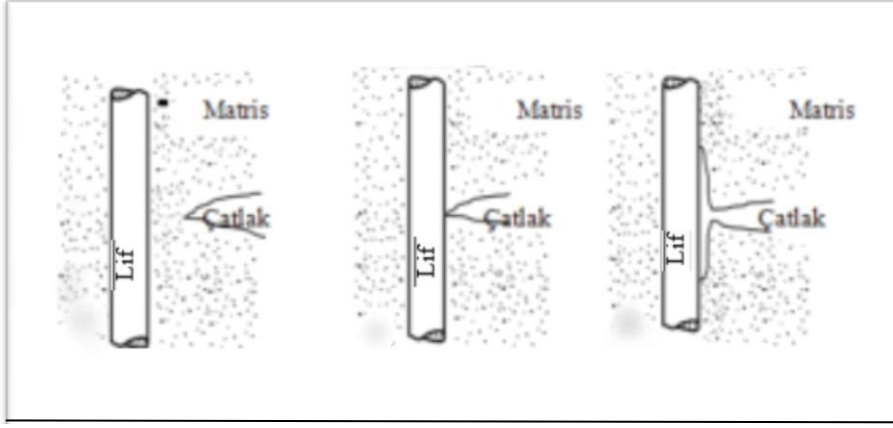
Betonun darbe dayanımı, eğilme dayanımı, yorulma dayanımı gibi faktörler lif kullanımıyla beraber % 100'e kadar arttırılabilmektedir. Grafit ve cam elyafı içeren betonların sürtünmeye karşı dirençleri yüksektir. Lifli betonlarda performansı etkileyen en önemli faktörler; lif miktarı, liflerin doğrultusu, narinlik oranı (boy/çap) ve liflerin beton matrisi içerisinde homojen dağılımıdır. Homojen dağılan lifler hem çatlak oluşumuna direnç gösterir hem de mevcut çatlakların derinlemesine engel olarak beton dayanıklılığını arttırır (Kozak, 2013). Şekil 1.3.'de gerilme - birim uzama grafiğinde, farklı lif içeren betonlar normal beton ile karılatırılmıtır.



**Şekil 1.3.** Gerilme-birim uzama grafiği

Lifli beton esas olarak çimento matrisi içinde düzenli veya rastgele dağılmış lifler içeren kompozit bir malzemedir. Beton içerisinde oluşan gerilmeler, betondaki mikro çatlaklar sebebiyle düzensiz davranış gösterirler.

Betonda matrise katılan lifler, küçük köprüler gibi davranarak üzerlerine gelen gerilmelerin bir kısmını kendi bünyelerine alır bir kısmını ise komşu matrise iletirler. Böylece matristeki çatlağın karşılayamadığı gerilme dağıtılarak çatlağın ilerlemesi engellenmiş olur. Bu sebeple lifli betonun özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden birincisi matris ve liflerin mekanik özellikleri, ikincisi ise matris ve lifler arasında etkili bir gerilme aktarımı olup olmadığıdır. Şekil 1.4.'te liflerin matristeki gerilmenin bir kısmını kendi üzerlerine almak, bir kısmını komşu matris bölümlerine aktarmak suretiyle, ilerleyen çatlakları nasıl durdurduğu gösterilmiştir (URL-5, 2021).



**Şekil 1.4.** Çelik lifli betonlarda gerilme aktarımı

Lifsiz betonlarda, ilk çatlak oluşması için ihtiyaç duyulan enerjinin yarısı büyüklüğündeki bir enerjiyle çatlak yayılımı gerçekleşirken, lifli betonlarda çatlağın yayılması için ihtiyaç duyulan enerji ilk çatlak enerjisinden daha fazladır. Beton nihai yük taşıma kapasitesini aşmış kırıldıktan sonra bile lifler kırılan parçaları bir arada tutmaya devam eder. Hatta lifli beton nihai yükten bir miktar fazlasını taşıyabilmektedir.

### **1.5.2. Bağlı fiber-matris sertliği**

Lif ve matris arasında etkili bir gerilim aktarımı sağlanabilmesi için matrisin elastisite modülü lifinkinden çok daha düşük olmalıdır. Polyester, polietilen, Naylonlar ve polipropilen gibi düşük elastisite modüllü liflerin mukavemet artışı sağlama olasılığı düşüktür, ancak büyük enerji yutulmasına yardımcı olur. Çelik, cam ve karbon gibi yüksek modüllü lifler kompozite dayanıklılık ve sertlik verir. Matris ve lif arasındaki ara yüzey bağları, matristen elyafa gerilim aktarımının etkinliğini de belirler. Kompozitin gerilme mukavemetini arttırmak için iyi bir bağ şarttır (URL-6, 2021).

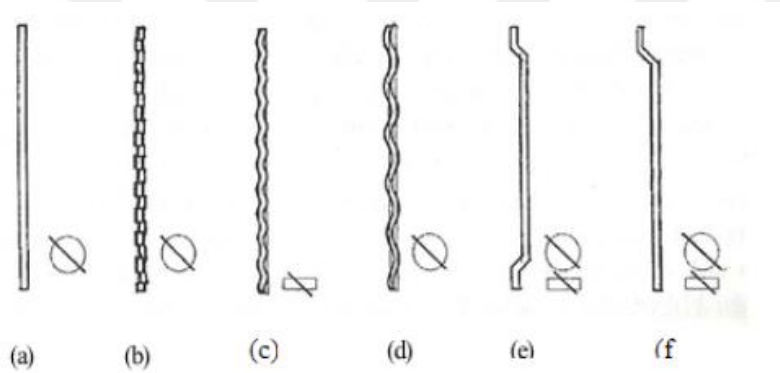
### **1.5.3. Lif tipi**

Lifli betonlarda genellikle; çelik, polimer (daha ziyade polipropilen lifler) ve cam lifler kullanılmaktadır. Kullanılacak lif tipi betonun kullanılacağı yere göre değişiklik gösterebilmektedir. Çelik lifler genelde; endüstriyel tesis zeminleri, otoyol döşemeleri, köprü ayakları, kazıklı zeminler, havaalanı pistleri, patlama tehlikesi olan binalarda,

kavitasyon yükü olan hidrolik inşaatlarda, tünel ve galeri yapımında kullanılmaktadır.

Polipropilen lifler birçok alanda kullanılmaktadır. Bu lifler daha çok, beton yol üst yapılarında, endüstriyel döşemelerde, püskürtme betonlarda, havaalanlarında, yangına dayanıklı beton yapılarında, beton borular üretiminde ve askeri güvenlik yapılarında kullanılmaktadır. Cam lif katkılı betonlar ise hafif olmaları ve kolay işlenebilmelerinden dolayı binalarda dış cephelerde, çatı kaplamalarında, tribün elemanları, boru ve ses izolasyonlu duvar yapımında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Türkmenoğlu ve Varol, 2016).

Lifle ilgili önemli bir diğer parametre Şekil 1.5.'te verilen lifin şeklidir (URL-5, 2021). Dalgalı veya kıvrık uçlu liflerin yük altında iken matristen sıyrılmaları, düz geometrili liflere göre daha zordur.



**Şekil 1.5.** Çelik lif çeşitleri, a) Düz lif, b) Çentikli lif, c) Dalgalı lif, d) Ay biçimli dalgalı lif, e) İki ucu kancalı lif, f) Bir ucu kancalı lif

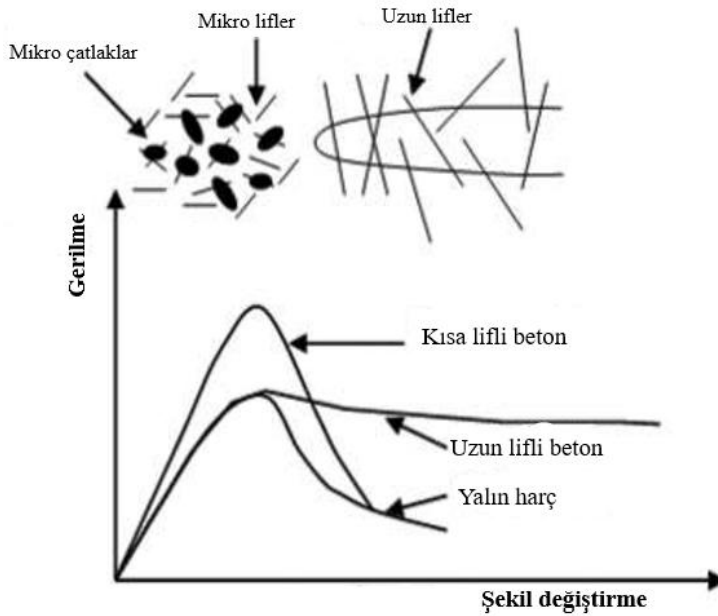
#### 1.5.4.Lif miktarı

Kompozitlerin mukavemetini büyük ölçüde içinde kullanılan elyaf miktarı belirler. Kırılgan matris-sünek lifli sistemlerde, yük altında, ilk göçme deformasyonuna matris bileşeni ulaşır. Matris göçme noktasından sonra kompozitin taşıyacağı yükü lif miktarı belirler. Eğer lif miktarı kritik oranın altındaysa matris kırıldıktan sonra kompozit düşük seviyede yük taşır. Lif miktarı kritik oranda ise matris kırıldıktan sonra lifler de koparak matristen sıyrılır. Lif miktarı kritik oranın üzerinde ise matrisin göçmesi ile birlikte kompozit bünyesindeki gerilme bir miktar azalmakta, daha sonra lif miktarına bağlı olarak kompozit daha yüksek gerilmeleri taşıyabilmektedir. Daha yüksek lif yüzdesinin

kullanılması, betonda homojen lif dağılımına engel olmakta, liflerin beton içinde topaklanmasına neden olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar ideal lif miktarının hacimce % 0,5-% 2,0 aralığında olduğunu göstermektedir (Aral, 2006).

### 1.5.5. Lif görünüm oranı (narinliği) ve lif boyu

Lif görünüm oranı (narinlik); lif boyunun (l) lifin çapına (d) bölünmesiyle bulunur. Lif miktarı ve narinliğindeki artışla birlikte; eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve toklukta belirgin bir artış gözlemlenir. Çelik lifler için ideal görünüm oranı 60 - 100, lif boyu ise 30-60 mm aralığındadır. Narinliğin 100'den daha büyük değerlerde olması genellikle işlenebilmeyi zorlaştırır. Lif seçimi yapılırken, lif boyunun maksimum agrega çapından en az 1,5 veya 2 kat daha büyük olmasına dikkat edilmelidir. Şekil 1.6.'da görüldüğü gibi; kısa lif boyuna sahip karışımlar daha yüksek dayanım gerilmelerine ulaşırken, şekil değiştirme açısından yetersiz kalmaktadırlar (Taşdemir ve ark., 2003). Buna karşın uzun lif boyuna sahip karışımlar yüksek gerilme değerlerine ulaşamazken şekil değiştirebilme kapasiteleri oldukça yüksektir.



Şekil 1.6. Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi

### 1.5.6. Lif yönelimi

Malzemenin mekanik özellikler açısından yöne bağımlılık göstermesine “anizotropi” adı verilir. Lifli betonlarda liflerin yük ile aynı doğrultuda yerleştirilmesi, dağılık veya yüke dik konumlandırılan liflere kıyasla, kompozitin daha fazla gerilme mukavemeti ve tokluk sağlamasına imkân verir. Takviyenin uzun elyaf veya dokuma olması durumunda anizotropi daha belirgin olarak görülür. Takviyenin partikül, kırık veya keçe olması durumunda anizotropi azalmaktadır (Cemalgil, 2020).

### 1.5.7. Homojen lif dağılımı

Liflerin matris içinde homojen dağılması, yük altındaki kompozitin uniform davranış göstermesini sağlar. Liflerin homojen dağılmaması betonun gerilme mukavemetini olumsuz yönde etkiler. Aşırı miktarda lif kullanımı genellikle topaklanmaya neden olur.

### 1.5.8. Çimento ve agregası

Lifli beton üretiminde genellikle karakteristik dayanımı 20 MPa üzerindeki portland çimentosu kullanılmaktadır. Ancak çimento hamuru alkali olduğundan çelik liflerde korozyona yol açabilir. Korozyona engel olmak için galvanize lifler ya da çimento içerisine uçucu kül, silis dumanı gibi puzolanlar ilave edilmelidir.

Lifler ile matrisin aderansını arttırmak için çakıl yerine kırma taş tercih edilmelidir. Ayrıca işlenebilirliği arttırmak ve homojen lif dağılımını sağlamak amacıyla iri agregası miktarı sınırlandırılmalıdır. Doğal agregası için 28 mm, kırma taş için 32 mm’den büyük çaplı agregası kullanılmamalı; 16 mm’den büyük agregası miktarı % 20’yi aşmamalıdır. Kum miktarı toplam agregası miktarının en az % 40-55’i (750-850 kg/m<sup>3</sup>) olmalıdır. 0,55’ten daha yüksek su/çimento oranı olamamalıdır. Çimento dozajı en az 320 kg/m<sup>3</sup> olmalıdır (Kozak, 2013).

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

#### 2.1.1. Çimento

Çalışmada Çimentaş firmasının Elazığ fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R portland çimentosu kullanılmıştır. 450 kg/m<sup>3</sup> dozajda kullanılan çimentoya ait teknik veriler Tablo 2.1. ve Tablo 2.2.'de (TS EN 197-1) belirtilmiştir.

**Tablo 2.1.** CEM I 42,5 R PÇ Teknik özellikleri

2 Günlük basınç dayanımı	Minimum 20 MPa
28 Günlük basınç dayanımı	42,5-62,5 MPa
Kükürt trioksit (SO <sub>3</sub> )	Maksimum %4
Klorür	Maksimum %0,1
Kızdırma kaybı	Maksimum %5
Çözünmeyen kalıntı	Maksimum %5
Priz başlangıcı	Minimum 60 dakika
Genleşme	Maksimum 10 mm

**Tablo 2.2.** CEM I 42,5 R PÇ ve UK Kimyasal Kompozisyonu

<i>Kimyasal Analiz (%)</i>	<i>PÇ CEM I 42.5 R</i>	<i>UK F Sınıfı</i>
CaO	63.37	2.32
SiO <sub>2</sub>	19.34	60.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.75	20.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.15	7.95
MgO	3.1	-
SO <sub>3</sub>	3.15	0.11
K <sub>2</sub> O	0.81	-
Na <sub>2</sub> O	0.41	1.56
Cl <sup>-</sup>	-	0.100
Kızdırma kaybı	1.92	1.92
<b>Fiziksel Özellikler</b>		
Tanecik yoğunluğu(kg/m <sup>3</sup> )	-	2300
Özgül ağırlık(g/cm <sup>3</sup> )	3.16	
Blaine İnceliği (m <sup>2</sup> /kg)	366	

### 2.1.2. Agrega

Beton karışımı hazırlanırken 0-5 mm 5-12 mm ve 12-22 mm çaplarında üç farklı boyutta agrega kullanılmıştır. Çalışmada Tunceli yöresi Pülümür nehrinden çıkartılan dere agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregalara ait özellikler Tablo 2.3’de verilmiştir.

**Tablo 2.3.** Agrega özellikleri

Agrega Çapı (mm)	Özgül Ağırlık (kg/dm <sup>3</sup> )	Su Emme (%)	Karışım İçindeki Oranı (%)
0-5	2,0	1,7	45
5-12	2,7	1,2	30
12-22	2,7	1,2	25

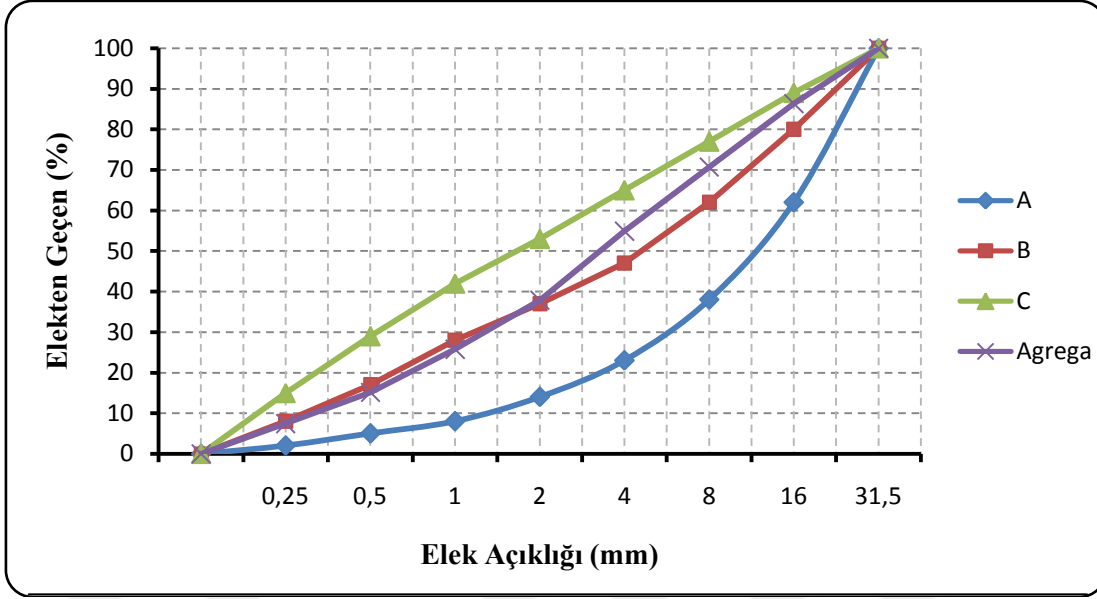


**Resim 2.1.** Karışımında kullanılan agrega sınıfları

Karışımında kullanılan agregalar üzerinde TS EN 933-1’e uygun şekilde elek analizi yapılarak sonuçlar Tablo 2.4.’te, agrega dane dağılımına ait grafik ise Şekil 2.1.’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.4.** Agrega elek analizi

Elek No	Elek Üstünde Kalan (g)	Elek Üstünde Kalan yığışımli (g)	Elek Üstünde Kalan yığışımli (%)	Elekten Geçen yığışımli (%)
31,5	0	0	0	100
16	347	347	13,7	86,3
8	396	743	29,3	70,7
4	402	1.145	45,1	54,9
2	432	1.577	62,1	37,9
1	307	1.884	74,2	25,8
0,5	270	2.154	84,9	15,1
0,25	195	2.349	92,6	7,4
Elek Altı	189	2.538	100	0



Şekil 2.1. Deneylerde Kullanılan Agreganın Granülometri eğrisi

### 2.1.3. Su

Karışımında içilebilir nitelikte olan Tunceli ili şehir şebekesi suyu kullanılmıştır. Su/çimento oranı lifsiz numunelerde 0,48 ÇL'li numunelerde 0,40 olacak şekilde ayarlanmıştır. Şebeke suyuna ait analiz raporundan alınan veriler Tablo 2.5.'e işlenmiştir (URL-9, 2022).

Tablo 2.5. Su analiz değerleri

Analiz adı	İletkenlik (25 °C'de)	Ph (25 °C'de)	Bulanıklık	Koku	Tat	Renk	Amonyum
<b>Analiz Sonuçları</b>	582 (µ/cm)	7,62	0,18 (NTU)	uygun	uygun	uygun	0,05 mg/L

### 2.1.4. Uçucu kül

Karışımlarda kontrol numunesinde uçucu kül (UK) kullanılmamıştır. Çelik Lif (ÇL) içeren karışımlarda çimento ikamesi olarak % 15 (67,5 kg/m<sup>3</sup>) oranında uçucu kül kullanılmıştır. F sınıfı olan UK, İskender Termik santralinden temin edilmiş olup TS EN 450-1 standardına uygun üretilmiştir. Tanecik yoğunluğu 2300 kg/m<sup>3</sup>'tür. UK' nin kimyasal

özellikleri yukarıda Tablo 2.2.'de verilmiştir.

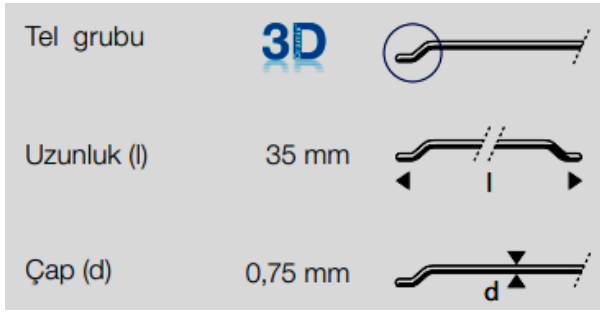
Karışımında kullanılan uçucu kül, akışkanlaştırıcı, çimento, öğütülmüş atık lastik ve çelik lif Resim 2.2.'de gösterilmiştir.



**Resim 2.2.** Karışımında kullanılan malzemeler

### 2.1.5. Çelik lif

Karışımında Bekaert firmasının ürettiği Dramix 3D tipi kıvrık uçlu 35 mm uzunluğa, 0,75 mm çapa sahip, parlak renkli, galvanizlenmiş ve tutkallı ÇL kullanılmıştır (Resim 2.2). narinlik (boy/çap) oranı 45 olan Lifin nominal çekme dayanımı  $1.225 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  ve elastisite modülü  $200.000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ 'dir. K1 ve K2 karışımlarında  $50 \text{ kg/m}^3$ , K3 ve K4 karışımlarında ise  $30 \text{ kg/m}^3$  oranında ÇL kullanılmıştır. Lif 3D grubunda kıvrık uçlu yapıdadır (Resim 2.3).



**Resim 2.3.** Çalışmada kullanılan çelik lifin geometrisi

### 2.1.6. Atık lastik

Sırasıyla  $50 \text{ kg/m}^3$  ve  $30 \text{ kg/m}^3$  oranda ÇL içeren K1 ve K3 karışımlarında, kontrol numunesinde bulunan ince agrega ağırlığının % 10 ( $58,70 \text{ kg/m}^3$ )'u kadar atık lastik (AL), K2 ve K4 karışımlarında ise % 15 ( $88,05 \text{ kg/m}^3$ ) oranında AL kullanılmıştır. AL; 0-5 mm çaplı agrega ile ikameli olarak kullanılmıştır. Özgül ağırlığı  $1,05 \text{ g/cm}^3$  olup hazır olarak temin edilmiştir.

### 2.1.7. Akışkanlaştırıcı

Lif içeren karışımlarda % 1,5 ( $6,75 \text{ kg/m}^3$ ) oranında Sika firmasının üretmiş olduğu Viscocrete Hi-Tech 4368 süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. Polikarboksilat kimyasal yapıda olan SA,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $1,05 - 1,09 \text{ kg/l}$  yoğunluğunda olup pH değeri 2 - 6 aralığındadır.

## 2.2. Metot

### 2.2.1. Karışımın hazırlanması

Beton karışımı hazırlanırken önce 12-22 mm agrega sonra 5-12 mm ardından 0-5 mm agrega Resim 2.4.'te görülen mikserde eklendi. Ardından sırasıyla çimento, UK, ÇL ve AL eklenerek Resim 2.5.'te görülen malzemeler mikserde 3 dakika boyunca kuru karışım yapıldıktan sonra su eklenerek mikser tekrar çalıştırıldı.

Homojen lif dağılımı sağlandıktan sonra mikser durduruldu. Karışım işlemi

tamamlandıktan sonra taze beton üzerinde slump, hava miktarı ve birim ağırlık deneyleri yapıldı. Yapılan deneylerden sonra taze beton, serleşmiş beton testlerinin yapılması için kalıplara yerleştirildi. Eğilmede çekme testleri için 100x100x500 mm prizma, basınç, yarma, diyagonal yarma, aşınma, donma çözülme ve su emme testleri için ise 100x100x100 mm boyutlarında küp kalıplar kullanıldı. Kalıplarda bekletilen numuneler 24 saat sonra alınarak  $22\pm 2$  °C sıcaklıktaki su dolu tanka yerleştirildi. Laboratuvar koşullarında kür edilen numuneler tanklarından çıkartılarak 28 ve 90 günlük sertleşmiş beton testleri için hazır hale getirildi.



**Resim 2.4.** Laboratuvar tipi mikser



**Resim 2.5.** Kuru Karışımda eklenen malzemeler

Resim 2.6.'da görüldüğü gibi homojen lif dağılımı sağlandıktan sonra mikser durduruldu.



**Resim 2.6.** Taze betonda homojen dağılmış lifler

Karışımda kullanılan malzeme miktarları Tablo 2.6.'da gösterilmiştir.

**Tablo 2.6.** Karışımda kullanılan malzeme miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

<b>Karışım Kodu</b>	<b>Agrega 1</b>	<b>Agrega 2</b>	<b>Agrega 3</b>	<b>CEM I</b>	<b>Su</b>	<b>UK</b>	<b>ÇL</b>	<b>AL</b>	<b>SA</b>
<b>K0</b>	587,0	529,0	440,32	450	216,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>K1</b>	528,3	529,0	440,32	383	153,7	67,5	50,0	58,7	6,75
<b>K2</b>	499,0	529,0	440,32	383	153,7	67,5	50,0	88,0	6,75
<b>K3</b>	528,3	529,0	440,32	383	153,7	67,5	30,0	58,7	6,75
<b>K4</b>	499,0	529,0	440,32	383	153,7	67,5	30,0	88,0	6,75

### 3. DENEY SONUÇLARI

#### 3.1. Taze Beton DeneYleri

Hazırlanan kontrol ve lifli karışımlar üzerinde çökme, hava içeriği ve birim ağırlık gibi taze beton deneYleri yapılmıştır.

Çökme TS EN 12350-2 standardına uygun olarak yapılmıştır. Resim 3.1.'de görülen Slump hunisi tepsi üzerine yerleştirilerek sabitlenmiş daha sonra toplamda 3 aşamada doldurulmuş, her aşamada 25 şişleme yapılarak beton sıkıştırılmıştır. Doldurma işlemini bittikten sonra doldurma başlığı çıkartılarak üst yüzey perdahlanmıştır. Huni çekildikten sonra Resim 3.2.'deki gibi üç farklı noktadan ölçüm yapılarak çökme değerleri belirlenmiştir.



**Resim 3.1.** Slump seti



**Resim 3.2.** Slump ölçümü

Taze beton karışımlarının hava içeriği TS EN 12350-7 standardına uygun biçimde Resim 3.3.' te görülen hava ölçer yardımı ile ölçülmüştür.



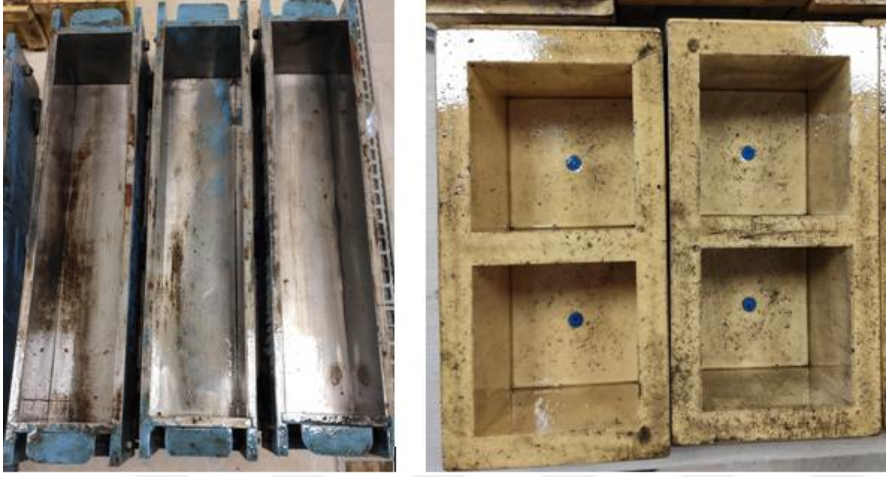
**Resim 3.3.** Hava içeriği ölçümü

Kontrol numunesi ve lifli karışımlara ait taze beton deney sonuçları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

**Tablo 3.1.**Taze beton deney sonuçları

Deney	K0	K1	K2	K3	K4
Çökme (cm)	21	23	16	21	20
Hava içeriği (%)	2,0	1,4	2,2	1,9	2,4
Birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2.360	2.355	2.340	2.353	2.296

Mikserden alınan taze beton karışımı 10x10x10 cm'lik küp ve 10x10x50 cm'lik prizmatik kalıplara yerleştirildi (Resim 3.4.).



**Resim 3.4.** Deneylerde kullanılan çelik ve plastik kalıplar

Kalıpların önce yarısı doldurulup şişlenmiş ardından kalan yarısı doldurulup Resim 3.5.'te görülen vibrasyon masasına alınmıştır. Vibrasyon masasında 3 dakika titreşim uygulanarak beton sıkıştırılmıştır. Vibrasyon masasından alınan numuneler kuruması için 24 saat bekletilmiştir.



**Resim 3.5.** Vibrasyon masası

Kalıptaki numuneler kalıptan alma öncesi Resim 3.6.'da görüldüğü gibi 24 saat bekletilmiş ardından kalıptan alınarak (Resim 3.7.a) kür havuzuna alınmıştır (Resim 3.7.b).



**Resim 3.6.** Priz alması için kalıpta bekletilen numuneler



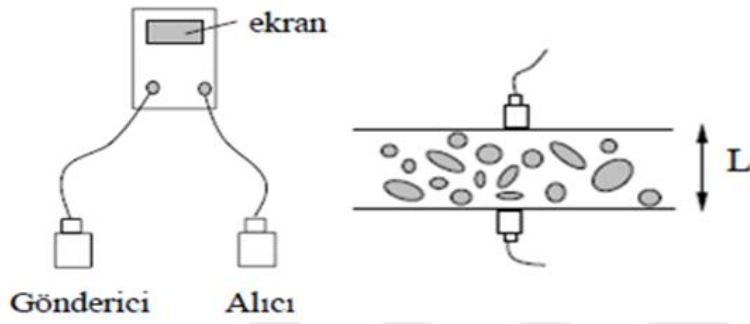
**Resim 3.7.** Kalıptan çıkartılarak kür havuzuna alınan numuneler

### 3.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Laboratuar koşullarında kür edilen beton numuneler üzerinde 28 ve 90 yaş günlerinde basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme, diyagonal yarma, yüzeysel aşınma, donma çözülme, ultra ses geçiş hızı ve su emme testleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton deney sonuçlarında 3 numunenin ortalama değeri alınmıştır.

### 3.2.1. Ultra ses geçiş hızı

Bu testler 28 ve 90 günlük beton numuneler üzerinde yapılmıştır. Küp ve prizmatik numunelerin yüzeyleri kurutularak ultra ses geçiş hızlarına bakılmıştır. ASTM C-597 standartlarına uygun yapılan test düzeneği Şekil 3.1’de, ultra ses geçiş hızını ölçen cihaz ise Resim 3.8.’de gösterilmiştir. Gösterilen cihazla, probalar yardımıyla numunelerin içine ses dalgaları yollanmış, ses dalgalarının alıcı proba ulaşma hızı ve süresi lmştr.



Şekil 3.1. Ultra ses geçiş hızı ölçüm metodu

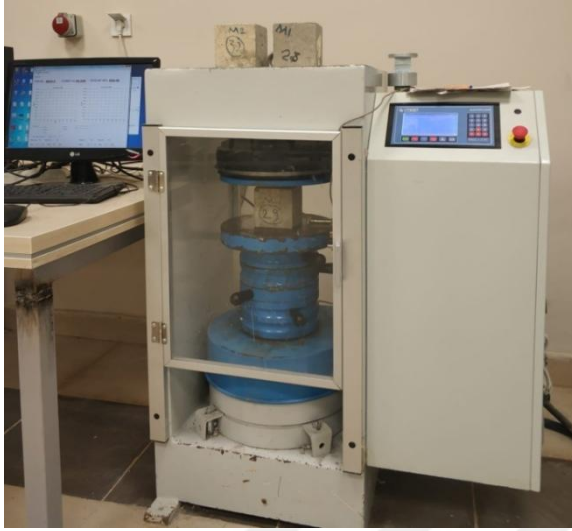


Resim 3.8. Ultra ses geçiş hızı ölçüm cihazı

### 3.2.2. Basınç dayanımı deneyi

L ile beraber kullanılan AL ve UK’n betonun basınç dayanımına etkisini kontrol etmek için numuneler TS EN 12390-3’e uygun Şekilde deneye tabi tutulmuştur. Basınç

dayanımı testleri 100x100x100 mm'lik küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu amaçla üretilmiş olan beton numunelerden 3'er adet alınarak 28 ve 90 günlük yaşlarda 2,0 kN/s yükleme hızı ile Resim 3.9.'da görüldüğü şekilde aksenal basınca tabi tutulmuşlardır. Numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları Tablo 3.2.'de işlenmiştir.



**Resim 3.9.** Basınç deneyi düzeneği

**Tablo 3.2.** 28 ve 90 günlük beton basınç dayanımı sonuçları

Numune Kodu	28 Günlük			90 Günlük		
	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)	Dayanım (MPa)	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)	Dayanım (MPa)
<b>K0</b>	26	3853	53,97	19,7	5068	55,63
<b>K1</b>	26,3	3786	57,65	19,4	5146	60,76
<b>K2</b>	26,7	3746	52,55	21,1	4756	59,24
<b>K3</b>	26,4	3786	57,25	19,3	5191	61,77
<b>K4</b>	26,7	3741	52,5	19,9	5028	59,99

### 3.2.3. Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Eğilmede çekme dayanım testleri 100x100x500 mm boyutlarındaki prizma numuneler üzerinde TS EN 12390-5 standartlarına göre yapılmıştır. Testler, numuneler kür edildikten sonra 28, 90 yaş günlerinde 1.0 kN/s yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Yükleme Resim 3.10.'daki gibi üç noktadan yapılmıştır.



**Resim 3.10.** Üç noktadan yüklenen kiriş eğilme testi

Kirişler üzerinde yapılan 28 ve 90 günlük eğilme deneyi sonuçları Tablo 3.3'te ve ses geçiş hızı Tablo 3.4.'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.3.** 28 ve 90 günlük eğilmede çekme deneyi sonuçları

Numune Kodu	28 Günlük			90 Günlük	
	Eğilme dayanım (kN)	Sehim (mm)	K0'a kıyasla değişim (%)	Eğilme dayanım (kN)	K0'a kıyasla değişim (%)
<b>K0</b>	7,31	0,00	0,00	8,89	0,00
<b>K1</b>	10,85	0,333	48,43	11,33	27,45
<b>K2</b>	10,14	0,900	38,71	9,94	11,81
<b>K3</b>	10,41	0,300	42,41	10,60	19,24
<b>K4</b>	9,29	0,500	27,09	10,52	18,24

Tablo 3.3.'te sehim değerleri incelendiğinde lif kullanımı arttıkça sehimin de arttığı tespit edilmiştir. 28 günlük deney sonuçlarına bakıldığında K0'a kıyasla eğilme dayanımları; K1 betonunda % 48, K2 betonunda % 38, K3 betonunda % 42 ve K4 betonunda % 27 oranında daha yüksek değerlere ulaşmıştır. 28 ve 90 günlük sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde ÇL betonlarının tümünün K0 olan kontrol betonundan daha yüksek dayanım sağladığı görülmektedir. Eğilme testinde kullanılan numuneler deneye tabi tutulmadan önce Resim 3.10.'da görüldüğü gibi bir uçları A, diğer uçları B olarak

adlandırılıp işaretlendikten sonra ultra ses geçiş hızlarına bakılmıştır.



**Resim 3.11.** Uçları kodlanıp ses geçiş hızlarına bakılan kirişler

**Tablo 3.4.** 28 günlük kiriş ses geçiş hızı deneyi sonuçları

Numune Kodu	Ses geçiş süresi A ucu ( $\mu$ s)	Ses geçiş süresi B ucu ( $\mu$ s)	Ses geçiş hızı A ucu (m/s)	Ses geçiş hızı B ucu (m/s)
K0	25,8	26,1	3.878	3.829
K1	26,2	26,4	3.821	3.750
K2	26,7	26,7	3.747	3.745
K3	26,3	26,6	3.808	3.764
K4	26,7	26,7	3.740	3.741

### 3.2.4. Yarmada çekme dayanımı deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi 28 ve 90 günlük 100x100x100 mm boyutlarında küp beton numuneler üzerinde TS EN 12390-6 standardına uygun yapılmıştır (Resim 3.12). Beton numuneler özel yarma aparatına yerleştirilerek 1.0 kN/s yükleme hızıyla gerilmeye maruz bırakılmıştır.



**Resim 3.12.** Yarmada çekme deneyi düzeneği

Deney sonunda Resim 3.13.'de görölen lif içermeyen (K0) numunelerinde derin çatlaklar oluşmuş, küçük bir etki ile tamamen kırılma gerçekleşerek numune iki parçaya ayrılmıştır. Ancak lifli numunelerde, Resim 3.14.'de görüldüğü gibi parçalar lifler tarafından bir arada tutulmuş, parçalanıp dağılma engellenmiştir.



**Resim 3.13.** Yarmada çekme gerilmesine maruz kalan lifsiz beton numuneler



**Resim 3.14.** Yarmada çekme gerilmesine maruz kalan lifli beton numuneler

28 ve 90 günlük numunelerin Yarmada çekme deney sonuçları ve ses geçiş hızları aşağıda Tablo 3.5.'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.5.** 28 ve 90 günlük numunelerde yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Numune Kodu	28 Günlük Deney Sonuçları					90 Günlük Deney Sonuçları			
	Ağırlık (g)	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)	Dayanım (kN)	Kısalma (mm)	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)	Dayanım (kN)	Kısalma (mm)
<b>K0</b>	2.417,0	26,5	3773	55,03	0,780	20,8	4801	62,07	0,810
<b>K1</b>	2.457,5	25,7	3890	57,26	1,787	18,9	5293	64,60	2,207
<b>K2</b>	2.379,0	26,3	3807	56,13	0,838	19,6	5112	62,80	1,447
<b>K3</b>	2.397,3	26,1	3827	59,41	0,765	19,5	5119	59,23	1,773
<b>K4</b>	2.371,7	26,4	3783	49,66	0,803	20,1	4977	56,20	1,020

Tablo incelendiğinde ÇL içeren betonların neredeyse tamamının kontrol betonuna kıyasla daha iyi dayanıma sahip olduğu görülmektedir. ÇL'li betonların ortalama kısalma değerleri kontrol betonuna yakın ya da daha büyük değerlere sahiptir. Numunelere 90 gün sonunda uygulanan yarmada çekme dayanımı sonuçlarına bakıldığında, 50 kg/m<sup>3</sup> ÇL ve % 10 AL içeren K1 numunesinin en yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca ortalama kısalma değerlerine bakıldığında lifli betonların şekil değiştirme kapasitelerinin kontrol betona nazaran daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

### 3.2.5. Diyagonal yarma dayanımı deneyi

Diyagonal yarma dayanım testleri 28 ve 90 günlük numuneler üzerinde 1.0 kN/s yükleme hızı ile yapılmıştır. Amaç lifli ve lifsiz beton numunelerin dolaylı çekme dayanımlarının araştırılmasıdır. Diyagonal yarma testi uygulanırken, beton numunelerin alt ve üst kısımlarında bulunan çelik başlıkların numune ile temas eden yüzeylerine 3 mm kalınlığında 15 mm genişliğinde kontrplak yükleme şeridi yerleştirilmiştir. Kontrplak yükleme şeridi ile kontrolsüz çatlaklar oluşmaması ve düzgün bir gerilme dağılımı elde edilmesi düşünülmüştür (Resim 3.15).



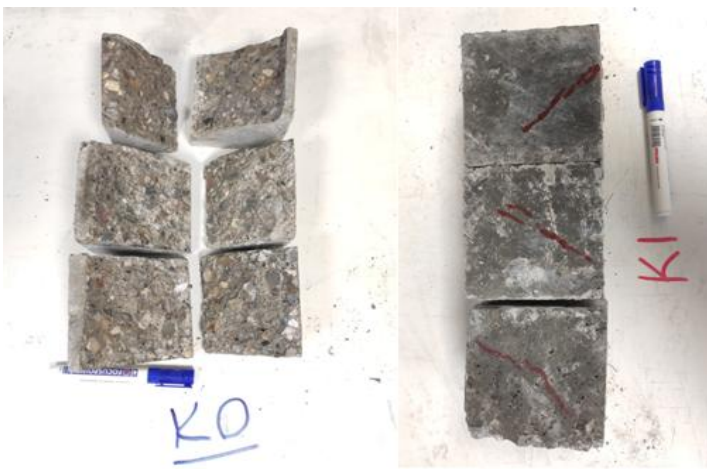
**Resim 3.15.** Diyagonal yarma deneyi düzeneği

Tüm numune grupları üzerinde yapılan 28 ve 90 günlük diyagonal yarma deney sonuçları Tablo 3.6.'da verilmiştir.

**Tablo 3.6.** 28 ve 90 günlük diyagonal yarma deney sonuçları

Numune Kodu	28 Günlük Deney Sonuçları					90 Günlük Deney Sonuçları			
	Ağırlık (g)	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)	Dayanım (kN)	Kısalma (mm)	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)	Dayanım (kN)	Kısalma (mm)
<b>K0</b>	2.426,67	26,7	3745	122,36	4,501	20,3	4939	137,47	3,070
<b>K1</b>	2.482,67	26,4	3793	165,69	4,898	19,4	5146	184,80	3,447
<b>K2</b>	2.311,67	26,5	3768	136,98	3,839	20,5	4879	163,33	5,583
<b>K3</b>	2.313,33	26,2	3817	145,85	4,795	19,6	5102	179,70	3,877
<b>K4</b>	2.314,50	26,5	3773	135,25	4,341	19,9	5023	153,30	4,387

Tablo 3.6. İncelendiğinde, ÇL'li betonların tamamının 28 günlük dayanımlarının kontrol betonundan daha yüksek dayanma sahip olduğu görülmektedir. K0 betonuna kıyasla yaklaşık olarak, K1'de % 35, K2'de % 12, K3'te % 19 ve K4 betonunda ise % 11,6 oranında mukavemette artış sağlanmıştır. Bu artışta liflerin gerilmeleri komşu matrislere ileterek mikro çatlak oluşumunu geciktirmesi etkili olmuştur. Ayrıca oluşan mikro çatlakların büyümesi de engellenmiştir. Resim 3.16.'da diyagonal yarma deneyi sonrası lifli ve lifsiz küp numunelerin kırılma biçimleri verilmiştir. Kontrol betonu, kırılma sonrası ikiye ayrılıp tamamen göçmüş olmasına rağmen lifli betonlarda göçme olmamış, kırılmadan sonraki ince çatlaklar çıplak gözle görülmüştür.



**Resim 3.16.** Diyagonal yarma deneyi sonrası numunelerin kırılma biçimleri

Yarmada çekme ve diyagonal yarmada kullanılan numuneler üzerinde ses geçiş hızı deneyi ASTM C-597 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Yukarıda Tablo 3.4, 3.5 ve 3.6'da ses geçiş hızı deney sonuçları verilmiştir. Ses geçiş hızlarına bakıldığında lifli betonun boşluk oranının daha düşük olduğu söylenebilir. Burada şüphesiz kullanılan UK'ün büyük etkisinin olduğu düşünülebilir.

28 gün sonunda K1 numunesinin kontrol numunesine göre % 35 civarında daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Bu iki numunenin 90 günlük dayanımlarının farkının da % 34 civarında olduğu dolayısıyla numunelerin 28 ve 90 günlük dayanımlarının benzer oranlarda arttığı söylenebilir.

### 3.2.6. Donma çözülme deneyi

Küp numuneler ASTM C 672-84'e uygun olacak şekilde donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Bu test için her karışımdan 3'er adet olmak üzere toplam 15 adet 100x100x100 mm boyutlarındaki 90 günlük beton numuneler kullanılmıştır. Numunelerin doygun kuru yüzey halinde ağırlıkları ölçülüp ses geçiş hızları tespit edildikten sonra +18 °C ısıtma ve – 20 °C'ye kadar soğutma kapasiteli tam otomatik donma çözülme cihazına yerleştirilmesi sağlandı (Resim 3.17).



**Resim 3.17.** Donma çözülme cihazı

Cihaz havada donma suda çözülme programında bir döngüyü 12 saatte tamamlayacak şekilde çalıştırıldı. Numuneler 150 devir ve 300 devir donma çözülme döngülerinden sonra cihazdan çıkartılarak kütle kaybı, ses geçiş hızları ve ses geçiş süreleri

ölçülmüştür. Donma çözülme deneyi yapılırken cihaz ilk 150 devirde ortalama -10 °C’de donma; +18 °C’de çözülme sıcaklığında çalıştırılmıştır. 150 devirden sonra 300 devire kadar olan döngülerde ise -18 °C’de donma +18 °C’de çözülme sıcaklığında çalıştırılarak deney tamamlanmıştır. Yapılan deney sonuçları Tablo 3.7’de verilmiştir.

**Tablo 3.7.** Donma Çözülme deney sonuçları

Numune Kodu	Deney Öncesi			150 Devir Sonra (-10°C)			300 Devir Sonra (-18°C)		
	Ağırlık (g)	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)	Ağırlık (g)	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)	Ağırlık (g)	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)
K0	2.415,50	19,00	5.269	2.425,17	20,20	4.957	2.422,17	28,20	3.559
K1	2.468,00	19,13	5.226	2.471,83	19,27	5.190	2.471,50	25,53	3.916
K2	2.338,33	19,30	5.182	2.341,17	19,60	5.102	2.340,50	26,10	3.816
K3	2.332,50	19,37	5.164	2.335,67	19,43	5.146	2.335,67	26,07	3.838
K4	2.377,33	19,73	5.120	2.379,67	19,63	5.095	2.378,83	26,23	3.812

Tablo 3.7’ye bakıldığında kontrol betonunun AL’li ve ÇL’li betonlara göre daha fazla donma çözülmeden etkilendiği anlaşılmaktadır. Lifli betonlar kendi aralarında kıyaslandığında K1 ve K4 numunelerinin donma çözülme etkisine en dayanıklı betonlar olduğu söylenebilir. Karışımların deney öncesi ses geçiş hızları ve süreleri incelendiğinde K0 numunelerinin ÇL ve AL içeren betonlardan daha boşluksuz olmasına rağmen, 300 devir donma çözülme etkisi sonrasında ses geçiş hızındaki düşüş, K0 numunesinde daha fazla çatlak oluştuğunu göstermektedir.

### 3.2.7. Aşınma kaybı deneyi

Aşınma dayanımı için laboratuvar koşullarında kür edilen 90 günlük 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler kullanılmıştır. Numuneler, deneye başlamadan önce 24 saat 110 °C sıcaklıktaki etüvde bekletildikten sonra ASTM C-944 standardına uygun olarak Rotating cutter yöntemiyle aşınma testine tabi tutulmuştur (Resim 3.18). Aşınma kaybı testi küp numunenin kalıp görmüş 3 farklı yüzeyine 2 şer dakika süre ile 200 dev/dak hızla uygulanmıştır. Deney sonrasında numunelerdeki toplam kütle kayıpları Tablo 3.8’de verilmiştir.



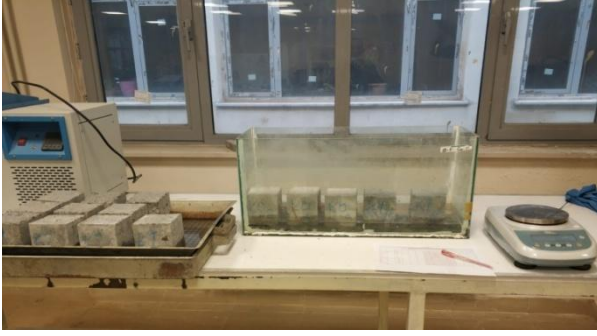
**Resim 3.18.** Rotating cutter yöntemiyle aşınma testi cihazı

**Tablo 3.8.** Aşınma kaybı deney sonuçları

Numune Kodu	Aşınma Deneyi Öncesi			Aşınma Deneyi			Sonuçlar	
	İlk Ağırlık (g)	Ses geçiş süresi (µs)	Ses geçiş hızı (m/s)	2 dk. Sonraki ağırlık (g)	4 dk. Sonraki ağırlık (g)	6 dk. Sonraki ağırlık (g)	Toplam Ağırlık kaybı (g)	Ortalama Ağırlık kaybı (g)
K0	2.317,00	21,10	4.739	2.316,00	2.315,50	2.315,00	2,00	1,50
	2.332,00	21,40	4.672	2.331,00	2.331,00	2.330,50	1,50	
	2.305,00	21,00	4.761	2.305,00	2.304,50	2.304,00	1,00	
K1	2.377,50	20,60	4.854	2.377,50	2.377,00	2.377,00	0,50	0,83
	2.371,00	21,90	4.566	2.371,00	2.370,50	2.370,00	1,00	
	2.462,50	21,10	4.739	2.462,50	2.462,00	2.461,50	1,00	
K2	2.264,00	20,60	4.854	2.264,00	2.263,50	2.263,50	0,50	0,83
	2.309,50	20,00	5.000	2.309,00	2.309,00	2.308,50	1,00	
	2.289,50	19,70	5.076	2.289,00	2.288,50	2.288,50	1,00	
K3	2.383,50	21,00	4.761	2.383,00	2.382,50	2.382,50	1,00	1,00
	2.302,00	21,10	4.739	2.301,50	2.301,00	2.301,00	1,00	
	2.339,50	20,20	4.950	2.339,00	2.339,00	2.338,50	1,00	
K4	2.285,00	20,60	4.854	2.284,50	2.284,00	2.283,50	1,50	1,17
	2.277,50	20,50	4.878	2.277,50	2.277,00	2.276,50	1,00	
	2.313,00	21,50	4.651	2.313,00	2.312,00	2.312,00	1,00	

### 3.2.8. Kılcal su emme deneyi

Kılcal su emme deneyi her karışımdan 3'er adet olmak üzere toplam 15 adet 100x100x100 mm boyutlarındaki 28 günlük küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce 105±5 °C sıcaklıktaki hava sirkülasyonlu etüvde 24 saat bekletilmiştir. Etüv kurusu ağırlıkları alınan numunelerin dört tarafı silikon macunu ile kaplanmıştır. Suya temas eden alt ve diğer karşı yüzey açık bırakılmıştır. Silikon kaplama işlemleri yapıp kurutulduktan sonra numunelerin ağırlıkları alınarak su içerisine yerleştirmek için hazırlanmıştır. Bu deneyde numuneler ASTM C1585-11'e uygun olarak belirli zaman aralıklarında tabandan su emdirme yöntemi kullanılarak 5-6 mm su içerisinde kalacak şekilde küçük bir havuz içerisine yerleştirilmiştir (Resim 3.19).



**Resim 3.19.** Kılcal su emme havuzu

Numunelerin 5, 10, 30, 60, 240, 1440 dk'larda havuzdan çıkartılıp yüzeylerindeki serbest su kuru bezle silinerek 0.01 g hassasiyetli terazi ile kütle artışları belirlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 3.9'da verilmiştir.

**Tablo 3.9.** Numunelerin kılcal su emme deneyi sonuçları

Süre	Numune Kodu				
	K0	K1	K2	K3	K4
İlk Ağırlık (g)	2298,31	2397,57	2278,99	2337,20	2286,53
5 dk sonra (g)	2302,52	2399,60	2282,66	2339,42	2289,59
10 dk sonra (g)	2304,14	2400,05	2283,41	2340,04	2290,20
30 dk sonra (g)	2307,49	2401,48	2285,22	2341,62	2291,68
60 dk sonra (g)	2310,66	2402,58	2286,92	2343,06	2293,26
240 dk sonra (g)	2320,64	2406,16	2291,84	2347,43	2297,98
1440 dk sonra (g)	2333,79	2412,67	2300,61	2356,25	2307,65
<b>24 saatlik kılcal su emme (g)</b>	<b>35,48</b>	<b>15,1</b>	<b>21,62</b>	<b>19,05</b>	<b>21,12</b>

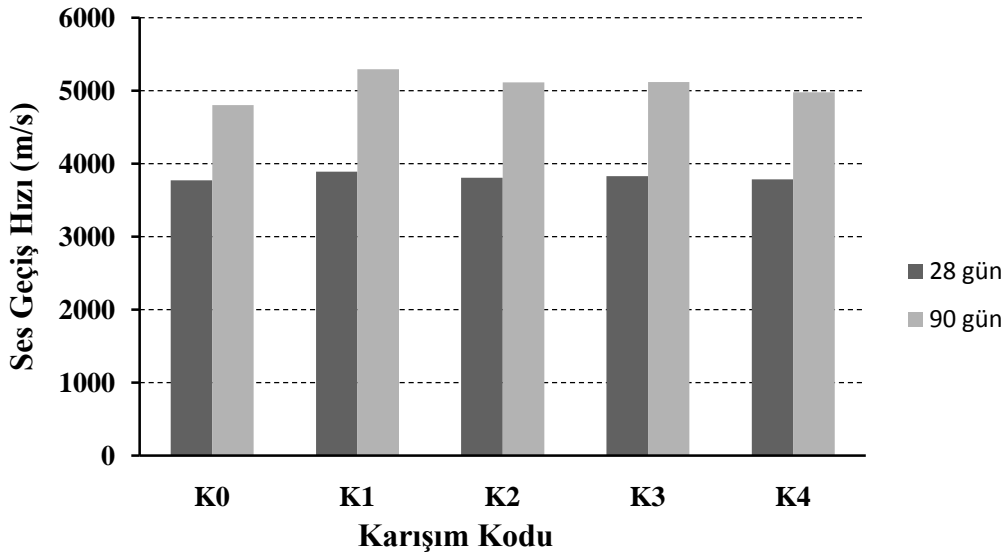
Tablo 3.9 incelendiğinde kontrol betonunun 24 saatte emdiği kılcal su miktarı lifli betonların yaklaşık iki katıdır. Tabloya bakıldığında bütün lifli betonların kılcal su emme miktarının kontrol betonuna göre daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebeplerinden biri, lifli betonlarda kullanılan UK'ün su emme ve kapiler geçirgenliği azaltmasıdır. İkinci sebep, ince agrega ikamesi olarak kullanılan ALA'nın su emme kapasitelerinin çok düşük olmasıdır.



## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Ses Geçiş Hızı

Yarmada çekme dayanımı deneyinde kullanılan numunelerin 28 ve 90 günlük ses geçiş hızları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1.Ses geçiş hızları grafiği

Ses geçiş hızı; betonun homojenliği, dayanımı, boşluk veya çatlak miktarı vb. hakkında bilgi vermektedir. Numunelerin ses geçiş hızları karşılaştırıldığında ÇL içeren betonların KB’ye kıyasla daha boşluksuz olduğu görülmektedir. Şekil 4.1’de KB ve ÇL’li betonların 28 günlük ses geçiş hızları arasında çok büyük bir fark olmasa da 90 günlük ses geçiş hızlarındaki fark ÇL’li betonlar lehine belirginleşmiştir. Tablo 4.1’de ses geçiş hızı ile beton basınç dayanımları arasındaki bağıntı verilmiştir (IAEA, 2002). Ultra ses geçiş hızı testine göre araştırma aşamasında üretilen bütün numunelerin beton kalitesinin 28 gün sonunda “iyi”, 90 gün sonunda “mükemmel” sınıfta olduğu görülmektedir.

Nagrockiene ve Rutkauskas, (2019) çimento ikamesi olarak % 0, % 15, % 25, % 35, % 45, % 55 ve % 65 oranında UK kullandıkları 7 farklı numune üzerinde yaptıkları UPV testlerinde yüksek UK kullanımının ses geçiş hızını arttırdığını tespit etmiştir.

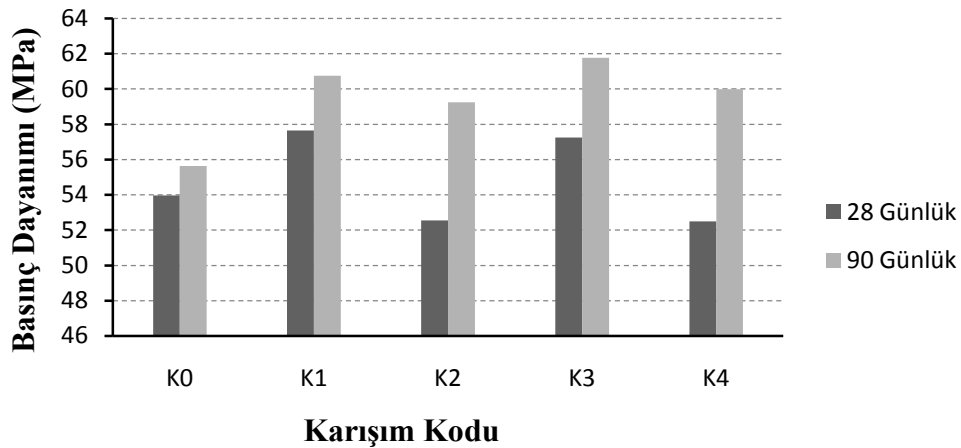
**Tablo 4.1.** Ses geçiş hızı ile beton kalitesi arasındaki ilişki

Ses Geçiş Hızı (m/s)	Beton Kalitesi
2000<	ok Kötü
2000-3000	Kötü
3000-3500	Orta
3500-4000	İyi
4000-4500	ok İyi
<4500	Mükemmel

#### 4.2. Basınç Dayanımı

28 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarına bakıldığında (şekil 4.5) en düşük dayanımı % 15 ALA'nın kullanıldığı karışımlardan üretilmiş olan K2 ve K4 numuneleri olmuştur. Bu numunelerin basınç dayanımı 53,97 MPa olan kontrol betonun dayanımından daha düşük olan 52,55 MPa ve 52,50 MPa mertebesinde ölçülmüştür. 28 günlük betonlarda en yüksek basınç dayanımı sırası ile 57,65 ve 57,25 MPa ile K1 ve K3 numuneleri olmuştur. şekil 4.2.'te basınç dayanımları karşılaştırılan betonlarda 28 günlük testlerde, K2 ve K4'te basınç dayanımının kontrol numunesine göre bir miktar düşük olmasına rağmen 90 günlük basınç dayanımları açısından L ve ALA içeren tüm beton numuneler kontrol numunesinden daha iyi sonuçlar vermiştir.

Tulga ve Kılınç (2018), yaptıkları çalışmada benzer sonuçlar elde etmiş, UK kullanımının erken basınç dayanımlarını arttırmadığını, ileri yaştaki dayanımları arttırdığını tespit etmişlerdir.

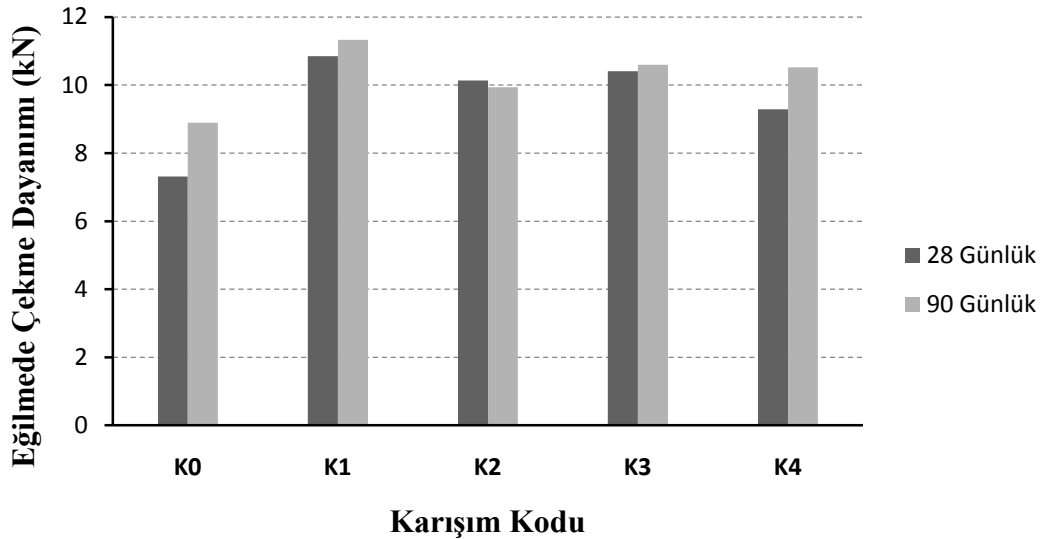


**şekil 4.2.** Beton basınç dayanımları sonuçları

Buradan hareketle, ALA kullanımının artmasının 28 günlük basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu söylenebilir. % 10 ALA içeren K1 ve K3 karışımları sırasıyla 50 kg/m<sup>3</sup> ve 30 kg/m<sup>3</sup> ÇL içermektedirler. Bu iki karışımın 28 günlük basınç dayanımları K0 karışımından yüksektir. K1 ve K3 karışımından üretilmiş beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımları kendi aralarında karşılaştırıldığında K1 numunelerinin az da olsa daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Kullanılan ÇL miktarının artırılmasının basınç dayanımı üzerinde küçük de olsa olumlu etkileri olduğu söylenebilir. Ayrıca 90 günlük basınç dayanım sonuçları açısından ÇL'li betonların kontrol numunesinden daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu duruma UK kullanımının sebep olduğu düşünülmektedir.

### 4.3. Eğilmede Çekme Dayanımı

Üç noktadan eğilmede çekme dayanımı testleri yapılan kiriş numunelerin dayanım sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir.



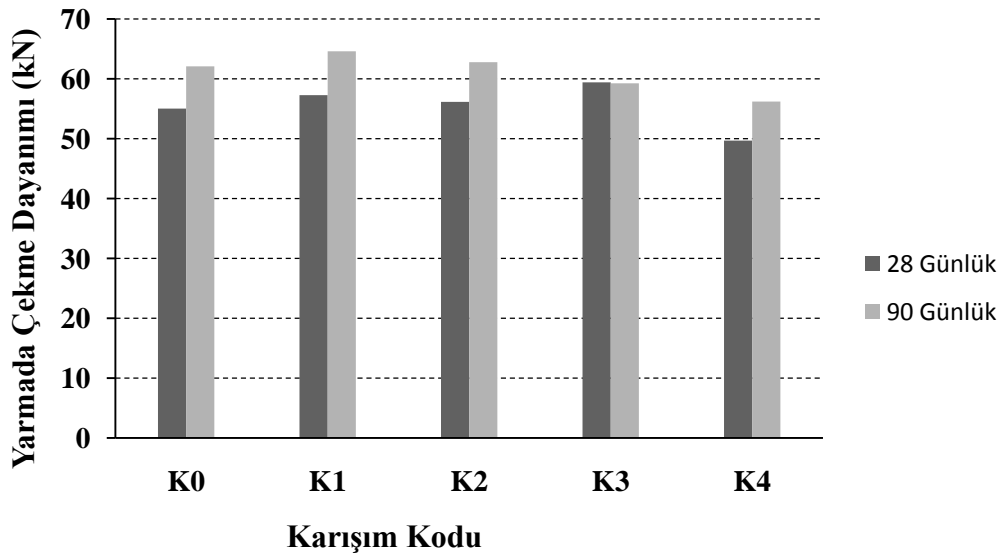
Şekil 4.3. Eğilmede çekme deney sonuçları

Yukarıdaki grafikte ÇL ve ALA içeren betonların kontrol betonuna göre daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Hatta K1 karışımından üretilmiş olan numunelerde, kontrol numunesine kıyasla neredeyse %

50'ye varan mukavemet artışı gerçekleşmiştir. Grafikte K1, K2, K3 ve K4 karışımlarının tümünün hem 28 günlük hem de 90 günlük kontrol betonundan daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Karışım içerikleri dikkate alındığında 50 kg/m<sup>3</sup> ÇL, ağırlıkça ince agreganın % 10'u (58,7 kg/m<sup>3</sup>) oranında AL agregası ve çimento dozajının % 15'i kadar (67,5 kg/m<sup>3</sup>) UK içeren K1 karışımının en iyi dayanım değerine ulaştığı anlaşılmıştır. Burada en dikkat çeken bulgu, % 15 oranında ALA kullanılması durumunda bile ALA ve UK içeren ÇL'li betonun eğilme dayanımında iyileşme gerçekleşmesidir.

#### 4.4. Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları şekil 4.4'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde K4 karışımı hariç tüm karışımların KB'dan daha iyi dayanıma sahip olduğu görülmektedir. K4 karışımının ÇL-AL kombinasyonu açısından, diğer lifli karışımlara kıyasla daha az (30 kg/m<sup>3</sup>) ÇL ve fazla AL'in bir arada kullanıldığı karışım olması dikkat çekicidir. Ancak şunu da belirtmek gerekir ki kullanılan üç K4 numunesinin ikisi 28 gün sonunda; 54 MPa ve 54,23 MPa dayanıma sahip olup bu değerler kontrol betonu numunelerinin ortalama yarmada çekme dayanım sonuçlarına oldukça yakındır. 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilen yarmada çekme deneyi sonunda K1 numunesinin KB ve diğer lifli betonlardan daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir.

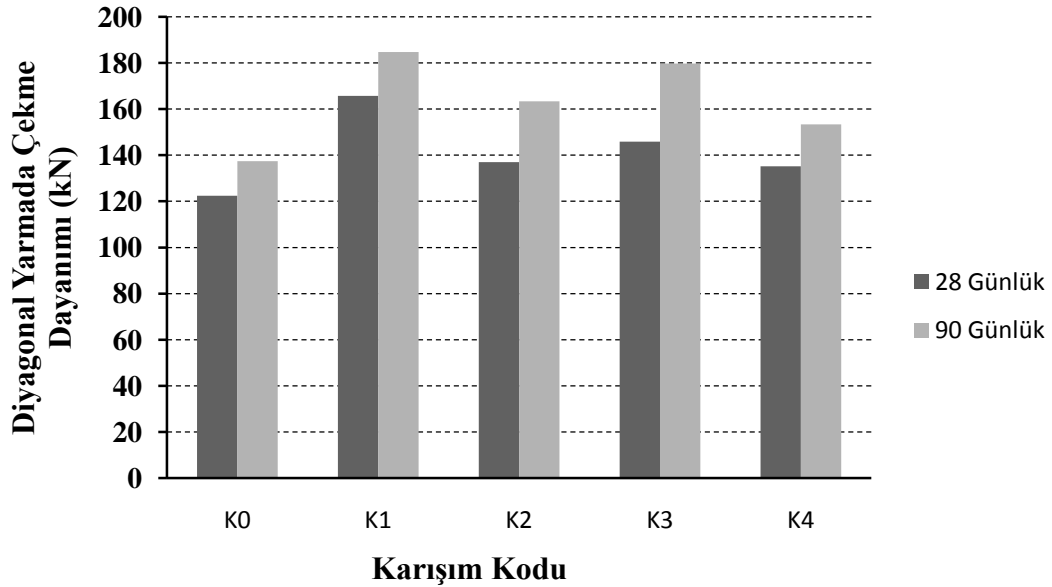


Şekil 4.4. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Khaloo ve ark. (2014), çalışmalarında lif kullanımının artmasıyla eğilmede çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımının ve tokluğun betona katılan lif yüzdesi ile doğru orantılı olarak arttığını göstermiştir.

#### 4.5. Diyagonal Yarmada Çekme Dayanımı

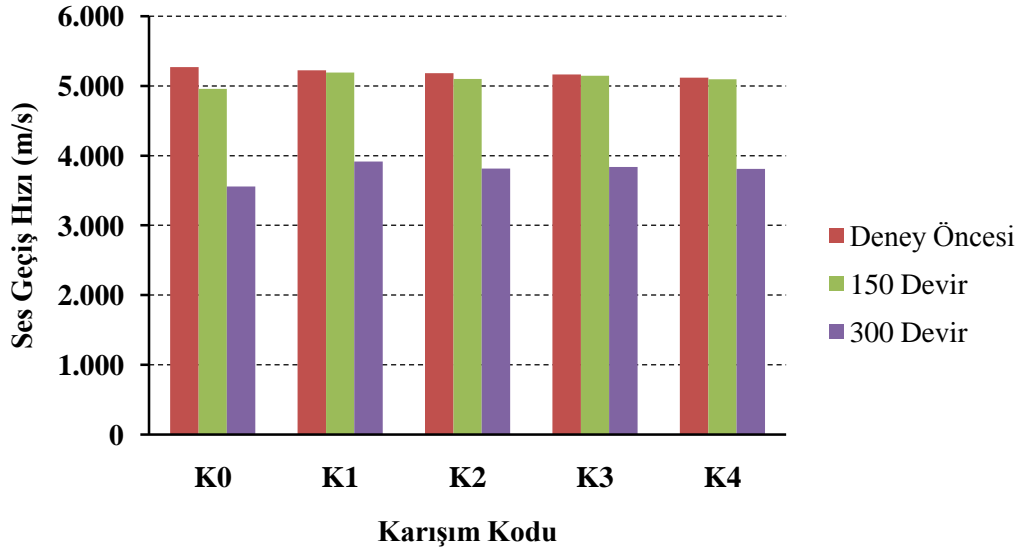
Çalışma kapsamında üretilen numunelerin 28 ve 90 günlük diyagonal yarma dayanımı deneylerinin ortalama sonuçları şekil 4.5'te gösterilmiştir. Deneye tabi tutulan ÇL ve ALA'in bir arada kullanıldığı karışımlardan üretilmiş numunelerin dayanımlarının kontrol numunesinden daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca % 10 oranında ALA kullanılan K1 ve K3 beton numunelerin 28 günlük diyagonal yarma dayanımları kontrol betonunun 90 günlük dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. Diyagonal yarma deney sonuçları

#### 4.6. Donma Çözülme Deneyi

Deneyde kullanılan ÇL'li betonlar donma çözülme etkisine karşı yalın betona nazaran daha yüksek dayanıma sahiptir. Deney öncesinde numunelerin ses geçiş hızları K0 5.269, K1 5.226, K2 5.182, K3 5.164, K4 5.120 m/s olarak ölçülmüştür. Deney öncesi en yüksek ses geçiş hızı ölçülen numune ise kontrol numunesidir. Ancak -10 °C'de 150 devir donma - çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde, ses geçiş hızında bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Daha sonra -18 °C'de 300 devir donma çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerin ses geçiş hızlarında daha büyük düşüşler olduğu Şekil 4.6'da görülmektedir.

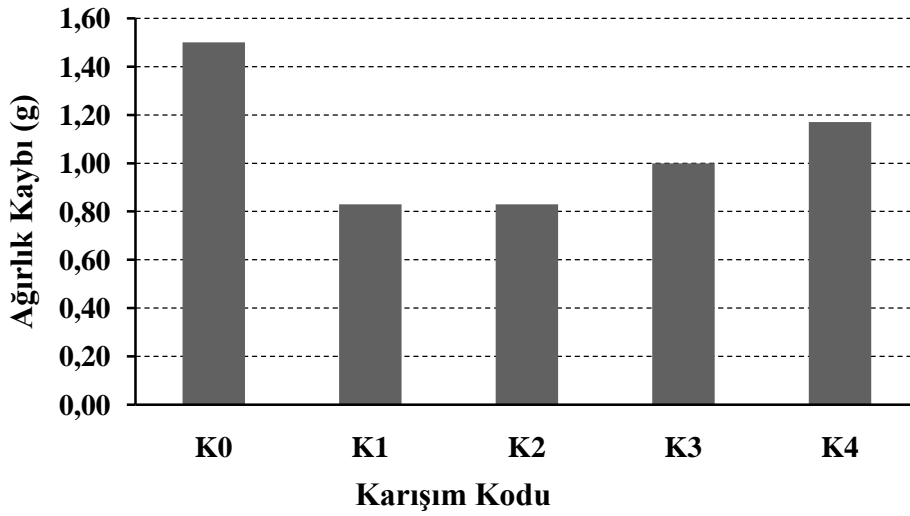


Şekil 4.6. Ses geçiş hızları grafiği

Şekil 4.6'da ses geçiş hızları karşılaştırılan deney numunelerinden; K0'nun ses geçiş hızında 150 devir sonunda yaklaşık % 6, 300 devir sonunda yaklaşık % 33 oranında bir düşüş gözlemlenmiştir. Lifli betonların tümü 150 devir donma çözülme etkisine maruz bırakıldıklarında deney öncesi ses geçiş hızlarına çok yakın hızlarla sesi ilettikleri görülmüştür. Ancak 300 devir donma çözülme etkisi lifli betonlarda ses geçiş hızının % 25 - % 26 civarında azalmasına sebep olmuştur. ÇL kullanımının donma çözülme döngüleri arttıkça mikro çatlak oluşumunu engelleyerek oluşan hasarı azaltmış olması muhtemeldir.

#### 4.7. Aşınma Direnci Deneyi

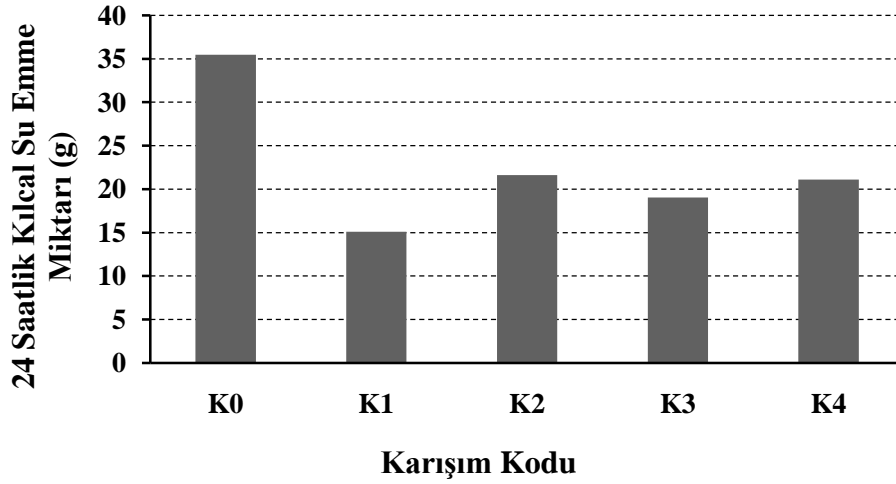
Çalışma kapsamında üretilmiş olan 100x100x100 mm küp numunelerin 90 gün sonrasındaki aşınma kaybı sonuçlarına göre K1, K2, K3 ve K4 numunelerin aşınma kaybı, kontrol betonuna kıyasla daha düşük değerlerde görülmektedir. En az aşınma kaybı ise K1 ve K2 numunelerinde görülmüştür (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Aşınma kaybı deney sonuçları

#### 4.8. Kılcal Su Emme

Teste tabi tutulan 28 günlük beton numunelerin 24 saat sonundaki su emme miktarları Şekil 4.8’de verilmiştir.



**Şekil 4.8.** Numunelerin su emme miktarları

24 saat sonunda K1 betonunun su emme miktarının K0'a kıyasla çok çok düşük olduğu görülmektedir. Grafiğe bakıldığında kontrol numunesinin su emme miktarının tüm ÇL'li betonlardan neredeyse 2 kat fazla olduğu görülmektedir. K1, K2, K3 ve K4 beton numunelerinin su emme miktarlarının düşük olmasının sebebi karışımda ALA'sı ve UK'ün bir arada kullanılmış olmasıdır. UK tanecik yapısı sayesinde matristeki boşluklara yerleşerek daha boşluksuz bir beton üretilmesini sağlamış; ALA ise çok düşük su emme kapasitesi sayesinde normal agregadan daha az miktarda su emmiştir. Bu sebeple, ALA ve UK içeren ÇL'li betonların donma çözülme etkisine karşı daha dayanıklı olacağı öngörülmektedir. Nagrockiene ve Rutkauskas, (2019) UK kullanımının su emmeyi azalttığını göstermişlerdir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada öğütülmüş atık lastik agregası ve uçucu kül içeren Çelik Lifli betonların mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1- ÇL ve UK kullanımı boşluk miktarını azaltmış, numuneler ultra ses geçiş hızı testinde sesi yüksek hızlarda iletmişlerdir. 28 günlük numuneler sesi 3700 m/s ve üzerinde, 90 günlük numuneler 4700 m/s ve üzerinde hızlarla iletmişlerdir.

2- ALA kullanımı ses geçiş hızını bir miktar azaltmıştır. K1 ve K3 beton numuneleri 28 günlük testlerde K0 numunesine kıyasla daha yüksek basınç mukavemeti göstermelerine rağmen sesi K0'dan daha yavaş iletmişlerdir. Kullanılan ALA sesi bir miktar absorbe etmiştir.

3- 58,70 kg/m<sup>3</sup> ALA kullanılan K1 ve K3 numuneleri eksenel basınç testinde hem 28 günde hem de 90 günlük numunelerde K0'a kıyasla daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. 28 günde K0'a kıyasla; K1 numuneleri % 6,8, K3 numuneleri % 6 civarında daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. 88 kg/m<sup>3</sup> ALA kullanılan K2 numuneleri % 2,6, K4 numuneleri ise % 2,7 oranında K0'dan daha düşük basınç dayanımı değerleri vermiştir. 90 günde; K1 % 9,2, K2 % 6,4 K3 % 11 ve K4 % 7,8 olmak üzere ÇL içeren tüm numuneler K0'a kıyasla daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir.

4- Üç noktadan eğilmede çekme deneyinde 28 günde ÇL içeren numuneler K0'a göre, K1 % 48,4, K2 % 38,7, K3 % 42,4, K4 % 27,1 daha yüksek dayanım göstermişlerdir. 90 günde ise K1 % 27,5, K2 % 11,8, K3 % 19,2 ve K4 % 18,3 oranında daha yüksek dayanım göstermiştir.

5- Yarmada çekme deneyinde 28 günlük numunelerde K0'a göre K1 % 4, K2 % 2, K3 % 8 civarında daha yüksek dayanım gösterirken K4 numunesi kontrol betonuna kıyasla % 10 civarında daha düşük mukavemet göstermiştir. 90 günlük numunelerde K1 yine % 4 civarında daha yüksek dayanıma ulaşmıştır. K0'a göre K2 % 1 civarında daha yüksek mukavemet gösterirken K3 % 4,6 K4 ise % 9,5 daha düşük dayanım göstermiştir.

6- Diyagonal yarma deneyinde ÇL içeren tüm numuneler hem 28 günde hem 90 günde K0'dan daha yüksek dayanım göstermiştir. Kullanılan lif miktarı arttıkça dayanımın da arttığı tespit edilmiştir.

7- Numunelerin deney öncesi ultra ses iletim hızları ile 150 devir donma çözülme etkisi sonrasına yakın değerlerde ölçülmüştür. 300 devirlik donma çözülme etkisinden sonra tüm numunelerin ses iletim hızları düşmüş, ÇL içeren betonlar % 25 civarında; K0 ise % 33 civarında bir kayıpla sesi iletmiştir.

8- Rotating cutter yöntemiyle aşınmaya maruz bırakılan numunelerden  $50 \text{ kg/m}^3$  ÇL içeren K1 ve K2 numuneleri K0'ın kaybettiği ağırlığın yarısı kadar bir kütle kaybı yaşamıştır. Yine K0'la kıyaslandığında K3 ve K4 % 30 civarında daha düşük miktarda kütle kaybı yaşamıştır. Aşınma direnci lif miktarı ile doğru orantılıdır.

9- ÇL, UK ve ALA içeren tüm numunelerin kılcal su emme miktarlarının K0'dan daha düşük olduğu görülmüştür.

## 5.2. Öneriler

1- Deneyleerde kullanılan agrega granülometrisi 0-2 mm dane çaplı agrega için ideal bölgededir. Ancak 2 mm'den daha büyük çaplı agreganın dane dağılımında oransal olarak azaltılmasının dayanım üzerinde olumlu sonuçları olacaktır.

2- Karışımlarda karakteristik dayanımı 25 MPa ve üzerinde olan çimentonun minimum  $400 \text{ kg/m}^3$  dozajda kullanılması tavsiye edilmektedir. Su/çimento oranı 0,5 ve altında tutulmalıdır. Su/çimento oranı düştüğünden ÇL ve ALA içeren betonlarda puzolan ve SAK kullanılması işlenebilirliği arttıracaktır.  $30 \text{ kg/m}^3$ 'ten daha fazla ÇL kullanımı tavsiye edilmektedir. ALA miktarı için en ideal oranın ince agreganın % 10'u kadar olduğu tespit edilmiştir. Farklı çap ve uzunlukta ÇL'lerin farklı oranlarda birlikte kullanımının faydalı olacağı düşünülmektedir.

3- Deney numuneleri için kullanılacak kalıpların küçük olması durumunda düzgün bir yerleşme gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Özellikle küp numuneler için kullanmış olduğumuz kalıplar mümkünse daha büyük boyutlu seçilmelidir. Ayrıca yüzey alanının döşeme kalınlığına oranının çok büyük olacağı döşeme tipi numuneler üzerinde çalışma yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Anas M., Khan M., Bilal H., Jadoon S., Khan M.N.** 2022. Fiber Reinforced Concrete: A Review. *Engineering Proceedings*, 22(1):3.
- Akboğa, Ö., Baradan, S.**, 2011. Asbestin inşaat sektöründeki yeri ve maruziyetin önlenmesi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 469(5), 69-76.
- Ahmad, S., Fedroff, D., Savas, B. Z.**, 1997. Freezethaw durability of concrete with ground waste tire rubber. *Transportation Research Board*, 1574:80-88.
- Aköz, F., Çakır, Ö.**, 2014. Betonarme Korozyonu, *Hazır beton dergisi*, 124:70-85.
- Alkan, G.**, 2004. Polipropilen lifli betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 85s.
- Alkayış, M.H., Başyigit, C.**, 2021. Lif katkısının beton darbe dayanımına etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24:455-462.
- Aral, M.**, 2006. Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 135s.
- Atiş C. D., Karahan O.**, 2009. Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete, *Construction and Building Materials*, 23(1):392-399.
- Behbahani Hp., Nematollahi, B., Farasatpour, M.**, 2013. Steel fiber reinforced concrete: a review. <http://dl.lib.uom.lk/handle/123/9505>, 25 Temmuz 2022.
- Bennett, E.W., Loat, D.R.**, 1970. Shrinkage and Creep of Concrete as Affected by the Fineness of Portland Cement, *Magazine of Concrete Research*, 71(22):69-78.
- Bodur, M., S.**, 2016. Doğal lif takviyeli kompozitlerde lif / matris ara yüzey iyileştirme çalışmaları ve çevresel koşullara göre karakterizasyonu, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 182s.
- Brown R., Shukla A., Natarajan K.R.**, 2002. Fiber reinforcement of concrete structures, University of Rhode Island report, Rhode Island, USA.
- Cemalgil, S.**, 2020. Kompozit Malzemeler Ders Notları, Munzur Üniversitesi.
- Cemalgil, S., Etlı, S.**, 2020. Effects of specimen size on the compressive strength of rubber modified self-compacting concrete. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2):118-129.
- Chandramouli Ch., Ramlal S., Govinda Rajulu B.**, 2017. Anti corrosive activity of fly ash blended cement concretes, *International Journal Of Civil Engineering And Technology (IJCIET)*, 8(8):637-648.
- Choi, S. Y., Park, J. S., Jung, W. T.**, 2011. A Study on the Shrinkage Control of Fiber

Reinforced Concrete Pavement, *Procedia Engineering*,14(2011):2815–2822

**Chousidis N., Rakanta E., Ioannou I., Batis G.**, 2015. Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, 101(1):810-817.

**Demiralp, M., Beycioğlu, A., Köksal, F., Anadut, H. O., Ürünveren, H.**, 2021. Çelik lifli betonlarda agrega tipinin kırılma enerjisine etkisi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(1):207-218.

**Emiroğlu, M.**, 2006. Atık taşıt lastiğın beton içerisinde kullanımı ve betonun karakteristiklerine etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 87s.

**Erdoğan, S. T., Erdoğan, T. Y.**, 2007. Puzolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri, 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, Nisan 12-13.

**Eren, M.E.**, 2019. Atık mermer tozu ve lastik agrega kullanılarak üretilmiş çevre dostu betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 108s.

**Güneyisi, E.**, 2010. Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 43(8):1037-1048.

**Halilov, S.**, 2003. Silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkıları lifli betonların özellikleri. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 129s.

**International Atomic Energy Agency**, 2002. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Printed by IAEA, Vienna, 242s.

**Kayali, O.**, 2004. Effect of high volume fly ash on mechanical properties of fiber reinforced concrete, *Materials and Structures*, 37:318-327.

**Khaloo, A., Raisi, E.M., Hosseini, P., Tahsiri, H.**, 2014. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 51(1):179-186

**Khatib, Z. K., Bayomy, F. M.**, 1999. Rubberized portland cement concrete. Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği (ASCE), *Journal of Material in Civil Engineering*, 11(3):206-213.

**Koçak, Y., Alpaslan, L.**, 2011. Atık lastiklerin çimento ve beton sektöründe kullanım potansiyelleri. 6. *International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey, May 16-18.

**Kovler, K.**,1994. Testing system for determining the mechanical behavior of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage, *Materials and Structures*, 17(27):324-330.

- Kozak, M.**, 2013. Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması, *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, 3(5):26-35.
- Kwak, Y.K., Eberhard, M.O., Kim, W.S., Kim, J.**, ,2002. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups. *American Concrete Institute Structural Journal*, 99(4):530-538.
- Malak, A., G.**, 2021. Kauçuklu beton imalatında kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin normal betona göre incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul, 60s.
- Marcos Meson, V., Michel, A., Solgaard, A., Fischer, G., Edvardsen, C., Skovhus, T. L.**, 2018, Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review. *Cement and Concrete Research*, 103:1-20.
- Nagrockiene, D., Rutkauskas, A.**, 2019. The effect of fly ash additive on the resistance of concrete to alkali silica reaction. *Construction and Building Materials*, 201(1):599-619.
- Neves, R.D., Almeida, J.C.O.F.**, 2005. Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete, *Structural Concrete*, 6(1):1-8.
- Özcan, U., Güngör, S.** 2019. Sürdürülebilir Bir Yöntem/Betonda Puzolan Kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 15: 176-182
- Öztürk, H.**, 2016. Atık lastik katkısının kendiliğinden yerleşen betonların mühendislik özelliklerine etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Düzce Üniversitesi, 67s.
- Savija, B., Lukovic, M.**, 2016. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. *Construction and Building Materials*, 117(1):285-301.
- Sofi, A.**, 2018. Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4):2691-2700.
- Son, K.S., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K.**, 2011. Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*, 25(1):218-228.
- Tadepalli, P.,R., Mo, Y.L., Hsu, T.T.C.**, 2013. Mechanical properties of steel fibre concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65(8):462-474.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Yerlikaya, M.**, 2003. Geleneksel ve yüksek performanslı çelik donatılı betonlar, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426:76-84.
- Thomas, B.S., Gupta, R.C.**, 2016. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54:1323-1333.

- Topçu, İ. B.**, 2006. Beton teknolojisi. Uğur Ofset A.Ş., Eskişehir, 570s.
- Topçu, İ.B., Demir, A.**, 2007. Durability of rubberized mortar and concrete. *Journal of Material in Civil Engineerin*, 19(2):173-178.
- Topçu, İ.B., Karakurt, C., Işıkdag, B.**, 2014. Atık lastik agregalı harçların mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 17(1):3-7.
- Torres, J.A., Lantsoght, E.O.L.**, 2019. Influence of fiber content on shear capacity of steel fiber-reinforced concrete beams. *Fibers*, 7(102):1-23.
- Tulga, İ., Kılınç, K.**, 2018. Uçucu kül kullanımının farklı dayanım sınıflarındaki betonların mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2):212-236.
- Turgut P., Yeşilata B., Işıker Y.**, Kompozit yapı malzemelerinde ısıl özellik ölçümü -1; hurda lastik katkıli betonlar için ölçüm sonuçları. *Mühendis ve Makine*, 48(565):33-39.
- Türkmenoğlu, Z.,F., Varol, O.,O.**, 2016. Lifli beton türleri ve kullanım alanları, *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016)*, Çukurova University, Congress Center, October 26-28, 2016, Adana / TURKEY, s.3792-3795
- URL-1**, <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/8-ayda-101-bin-ton-hurda-lastik-ekonomiye-kazandırıldı/919681>
- URL-2**, 2021. <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=20>, 10.05.2021
- URL-3**, 2021. <https://avesis.yildiz.edu.tr/resume/downloadfile/bkkanat?key=433e6aa1-95cf-47db-8e00-c40e03ae2714#:~:text=B%C3%BCnyesel%20R%C3%B6tre%3A,olu%C5%9Func a%20%C3%A7imento%20hamuru%20hacmi%20azal%C4%B1r>, 11.05.2021
- URL-4**, 2021. [https://intrans.iastate.edu/app/uploads/sites/7/2019/08/36\\_Early-Age-Cracking-Troubleshooting.pdf](https://intrans.iastate.edu/app/uploads/sites/7/2019/08/36_Early-Age-Cracking-Troubleshooting.pdf), 10.05.2021
- URL-5**, 2021. <https://www.insaport.com/haberler/lif-etkisi-altinda-betonlarin-darbe-direncinin-arastirilmasi-aci-544-3r-93-darbe-deneyi/>, 12.05.2021
- URL-6**, 2021. <https://theconstructor.org/concrete/fiber-reinforced-concrete/150/>, 01.05.2021
- URL-7**, 2021. <https://docplayer.biz.tr/39344207-Ozel-betonlar-doc-dr-halit-yazici-ins2024-yapi-malzemesi-ii.html>, 02.05.2021
- URL-8**, 2022. <http://tunceli.bel.tr/kategori/105/1/raporlartablolar.aspx>, 01.10.2022

- Ünal, O.**, 1994. Isıl işlem uygulamasının lifli beton özelliklerine etkisi. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik üniversitesi, İstanbul, 147s.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T., Gençel, O.**, 2007. Çelik liflerin beton basınç ve eğilme özelliklerine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1):23-30.
- Yadav, A., Parihar, S.**, 2018. An experimental study on steel fiber reinforced concrete. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 4(11):101-104.
- Zheng, L., Huo, S., Yuan, Y.**, 2008. Strength modulus of elasticity and brittleness index of rubberized concrete. *Journal of Material in Civil Engineering*, 20(11):692-699.



## ÖZGEÇMİŞ

