T.C.

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK TAŞIT LASTİĞİN BETON İÇERİSİNDE KULLANIMI VE BETONUN KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ

Mehmet EMİROĞLU

Tez Yöneticisi

Yrd. Doç. Dr. Servet YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2006

T.C.

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK TAŞIT LASTİĞİN BETON İÇERİSİNDE KULLANIMI VE BETONUN KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ

Mehmet EMİROĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, ... tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman:

Üye:

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen Danışman Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Servet YILDIZ'a, Tez konusunun belirlenmesinde ve daha sonraki aşamalarda yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Halidun KELEŞTEMUR'a, makalelerin temininde ve çalışma takviminin belirlenmesinde yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. M. Emin EMİROĞLU'na, deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Sayın Oğuzhan KELEŞTEMUR'a, hiçbir zaman benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Sayın Sait AYDIN'a, Sayın Ahmet DENİZ'e, Sayın Hakan ÖZTÜRK'e, Sayın Onur ATALAR'a, Sayın M. Fatih KIYMAK'a, Sayın M. Bahadır YİĞİT'e, maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim değerli Aileme, deney malzemelerinin temininde katkıda bulunan Dilek İnşaat AŞ'ye, Elazığ Altınova Çimento Fabrikası AŞ'ye, ayrıca bu çalışma için maddi destek sağlayan FÜBAP'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER I
ŞEKİLLER LİSTESİ IV
TABLOLAR LİSTESİ VII
ÖZET VIII
ABSTRACT IX
1. GİRİŞ 1
2. ATIK LASTİKLERİN STOKLANMASI ve ÇEVRESEL TEHDİT DURUMU 3
2.1. Lastik Üretimi 3
2.2. Atık Taşıt Lastiklerinin Depo Edilmesi 5
2.3. Atık Lastiklerin Çevresel Tehdit Durumu 7
3. ATIK LASTİKLERİN YÖNETİMİ ve MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI 10
3.1. Atık Lastiklerin Erozyon Kontrolünde Kullanılması 10
3.2. Atık Lastiklerin Enerji Elde Etmek Amacıyla Yakılması 11
3.3. Atık Lastiklerin Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması 13
3.4. Atık Lastiklerin Yeniden Kullanımı 15
4. ATIK LASTİKLERİN BETON AGREGASI OLARAK KULLANIMI 18
4.1. Beton İçerisinde Kullanılan Atık Lastiklerin Mühendislik Özellikleri 18
4.1.1. Atık Lastiklerin Sınıflandırılması 18
4.1.1.1. Atık Lastiklerin Kesim İşlemi 18
4.1.1.2. Hurda Lastikler 19
4.1.1.3. Yırtık lastikler 20
4.1.1.4. Parçacık/Çip Lastikler 20
4.1.1.5. Öğütülmüş Lastikler 20
4.1.1.6. Kırıntı Lastik 20
4.1.2. Elek Analizi 20
4.1.3. Atık Lastiklerin Birim Ağırlığı 21
4.1.4. Dayanıklılık 22
4.1.5. Su Emme 22
4.1.6. Isı Geçirgenliği 22
4.1.7. Ses Yalıtımı 22
4.1.8. Titreşim Yalıtımı 23
4.1.9. Yanabilirlik-Tutuşabilirlik 23

5. LİTERATÜR ÇALIŞMASI 24
6. DENEYSEL ÇALIŞMA 34
6.1. Numune Hazırlama 34
6.1.1. Üretilen Beton Serilerin Kodlanması 34
6.1.2. Karışım Hesabı 34
6.2. Malzemeler 35
6.2.1. Numune Kalıpları 35
6.2.2. Atık Taşıt Lastiği 36
6.2.3. Agrega 39
6.2.4. Çimento 40
6.2.5. Su 40
6.3. Deney Yöntemi 41
6.3.1. Taze Beton Deneyleri 41
6.3.1.1. Çökme Deneyi 41
6.3.1.2. Taze Betonda Birim Ağırlık Deneyi 42
6.3.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri 42
6.3.2.1. Sertleşmiş Betonun Yoğunluğu 42
6.3.2.2. Sertleşmiş Betonda Ultrases Hızı İle Ölçüm 44
6.3.2.3. Sertleşmiş Betonun Basınç Dayanımı 46
6.3.2.4. Sertleşmiş Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı 48
6.3.2.5. Sertleşmiş Betonun Dolaylı Çekme Dayanımı 50
6.3.3. SEM ve EDX Analizleri 51
7. BULGULAR ve TARTIŞMA 52
7.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 52
7.1.1. Taze Betonun Birim Ağırlığı 52
7.1.2. Taze Betonda İşlenebilirlik 53
7.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Belirlenmesi 54
7.2.1. Basınç Dayanımı 54
7.2.2. Eğilme Dayanımı 56
7.2.3. Dolaylı Çekme Dayanımı 57
7.2.4. Birim Ağırlık 58
7.3. Ultarsonic Ses Hızı Ölçümleri 59
7.4. Lastik Agrega İlaveli Betonların Özellikleri Arasındaki İlişkiler 60
7.4.1. Basınç Dayanımı-Birim Ağırlık 60
7.4.2. Basınç Dayanımı-Dolaylı Çekme Dayanımı 61

7.4.3. Basınç Dayanımı-Ultrases Hızı 62
7.5. SEM ve EDX Analizleri 62
7.5.1. SEM Analizi 62
7.5.2. EDX Analizi 68
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 72
KAYNAKLAR 74

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Araç lastiğinin yapısı 3
Şekil 2.2. Taşıt lastiğinin bileşimi..... 4
Şekil 2.3. Malezya'daki motorlu taşıt kayıtlarındaki artış 6
Şekil 2.4. Stok yığınlarından çeşitli görünüşler 7
Şekil 2.5. Atık taşıt lastiklerinin çevresel tehdit durumu 8
Şekil 3.1 Kıyı stabilizasyonu için önerilen plan 10
Şekil 3.2. Kıyı stabilizasyonu uygulamaları 11
Şekil 3.3. Amerika'daki atık lastiklerin kullanım alanları 12
Şekil 3.4. Yol alt dolgu malzemesi olarak kullanımı genel kesit planlı..... 13
Şekil 3.5. Lastiklerden toprak set oluşturulması 13
Şekil 3.6. Lastiklerin yerleştirilmesi 14
Şekil 3.7. İstinat duvarı kesiti 14
Şekil 3.8. Lastiklerin yerleştirilmesi 14
Şekil 3.9. Lastiklerin arazi doldurma işleminde kullanımı 15
Şekil 3.10. Lastiklerin feribot güvertelerinde kullanımı 16
Şekil 3.11. Lastiklerin oyun sahalarında kullanımı..... 16
Şekil 3.12. Lastiklerin yem kutusu olarak kullanımı 16
Şekil 3.13. Atık lastiklerden demiryolu travers yapımı 17
Şekil 4.1. Lastik öğütme işlem sırası 19
Şekil 4.2. Atık lastiklerin öğütme işlemi 19
Şekil 5.1. Lastik çip 24
Şekil 5.2. Yüzey işlemi 24
Şekil 5.3. Fiziksel demirleme..... 24
Şekil 5.4. Kauçuklu ve kauçuksuz betonun yük-deformasyon eğrisi 26
Şekil 5.5. Kırıntı lastiğin elek analizi..... 27
Şekil 5.6. Lastik kauçuk katkılı betonun deney sonuçları..... 29
Şekil 5.7. Çimento harcı ile lastik kauçuk lifler arasındaki aderans 30
Şekil 5.8. Birim hücre modeli 32
Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan kalıplar..... 36
Şekil 6.2. Atık lastiklerin elde edildiği kesme makinesi..... 36
Şekil 6.3. Atık lastiğin dane-boyut analizi..... 37
Şekil 6.4. Deneylerde kullanılan atık lastikler 37

Şekil 6.5. Lastik agregaya ait granülometri eğrisi 38
Şekil 6.6. Deneylerde kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi 39
Şekil 6.7. Çökme hunisinin şematik şekli ve ölçüleri 42
Şekil 6.8. Su ile yerdeğiştirme metodu 43
Şekil 6.9. Ultrasonik test cihazı 44
Şekil 6.10. Ultrasonik ses hızı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki 45
Şekil 6.11. Ultrasonik ses hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki 46
Şekil 6.12. Basit kirişteki kayma kuvveti ve eğilme momenti 48
Şekil 6.13. Basit bir kirişte A elemanı üzerinde çekme ve eğik çekme kuvvetleri 48
Şekil 6.14. Basınç yükü nedeniyle oluşan çekme kuvveti 49
Şekil 6.15. Dolaylı çekme dayanımı deney düzeneği 50
Şekil 7.1. Taze betonun birim ağırlığının lastik miktarı ile değişimi 53
Şekil 7.2. Taze betonun çökme değerinin lastik içeriği ile değişimi 54
Şekil 7.3. Lastik agrega ilaveli betonların basınç dayanımlarının değişimleri 55
Şekil. 7.4. Lastik ilaveli betonların eğilme dayanımlarının değişimleri 56
Şekil. 7.5. Lastik ilaveli betonların dolaylı çekme dayanımlarının değişimleri 57
Şekil. 7.6. Lastik ilaveli betonların yirmi sekiz günlük birim ağırlık değişimleri 58
Şekil 7.7. Lastik ilaveli betonların ultrases geçiş hızı değişimleri 59
Şekil 7.8. Lastik agrega ilaveli betonlarda basınç dayanımı - birim ağırlık arasındaki ilişki 60
Şekil 7.9. Lastik agrega ilaveli betonlarda basınç dayanımı - dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki 61
Şekil 7.10. Lastik agrega ilaveli betonlarda ultrases hızı-basınç dayanımı arasındaki ilişki 62
Şekil 7.11. Kontrol betonuna ait SEM görüntüsü 63
Şekil 7.12. %5 İnce lastik içeren betona ait SEM görüntüsü 64
Şekil 7.13. %5 İri lastik içeren betona ait SEM görüntüsü 64
Şekil 7.14. %10 İnce lastik içeren betona ait SEM görüntüsü 65
Şekil 7.15. %10 İri lastik içeren betona ait SEM görüntüsü 65
Şekil 7.16. %15 İnce lastik içeren betona ait SEM görüntüsü 66
Şekil 7.17. %15 İri lastik içeren betona ait SEM görüntüsü 66
Şekil 7.18. %20 İnce lastik içeren betona ait SEM görüntüsü 67
Şekil 7.19. %20 İri lastik içeren betona ait SEM görüntüsü 67
Şekil 7.20. Kontrol numunesine ait EDX analiz bölgesi 68
Şekil 7.21. Kontrol numunesine ait EDX analiz sonuçları 68
Şekil 7.22. %5 İnce Lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz bölgesi 69
Şekil 7.23. %5 İnce Lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz sonuçları 69

Şekil 7.24. %15 İri Lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz bölgesi 70
Şekil 7.25. %15 İri Lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz sonuçları 70

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Amerika'daki lastiklere ait bazı veriler 1
Tablo 2.1. Lastik üretiminde kullanılan tipik malzemeler 4
Tablo 2.2. Sektördeki kuruluşların lastik üretim miktarları 5
Tablo 3.1. Atık lastiklerin bulundukları şekle göre sık kullanım alanları 10
Tablo 4.1. Sıkıştırmadan önce elek analizi 21
Tablo 4.2. Sıkıştırdıktan sonra elek analizi 21
Tablo 4.3. Lastiklerin birim ağırlık değişimi 21
Tablo 5.1. Atık lastik ve polipropilenin mekanik özellikleri 25
Tablo 5.2. Deneyde kullanılan çip ve liflerin boyutları 25
Tablo 5.3. Deney sonuçları 26
Tablo 5.4. Karışım dizaynı 27
Tablo 5.5. Karışım dizaynı 29
Tablo 5.6. Kırıntı kamyon lastiğinin özellikleri 30
Tablo 6.1. Beton karışım oranları 35
Tablo 6.2. Deneylerde kullanılan kuma ait elek analizi sonuçları 39
Tablo 6.3. Deneylerde kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler 40
Tablo 6.4. Ses Hızı ile Betonun Kalitesinin Tahmin Edilmesi 45
Tablo 7.1. Taze betonda birim ağırlık değerleri 52
Tablo 7.2. Taze betonda çökme miktarı değerleri 53
Tablo 7.3. Lastik ilaveli beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri 55
Tablo 7.4. Lastik ilaveli beton numunelerinin eğilme dayanımı değerleri 56
Tablo 7.5. Lastik ilaveli beton numunelerinin dolaylı çekme dayanımı değerleri 57
Tablo 7.6. Lastik ilaveli beton numunelerinin yirmi sekiz günlük birim ağırlık değerleri 58
Tablo 7.7. Lastik agrega ilaveli beton numunelerinin ultrases hızı geçiş süreleri 59
Tablo 7.8. Kontrol numunesine ait EDX analiz sonuçları 69
Tablo 7.9. %5 İnce lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz sonuçları 70
Tablo 7.10. %15 İri lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz sonuçları 71

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK TAŞIT LASTİĞİN BETON İÇERİSİNDE KULLANIMI ve BETONUN KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ

Mehmet EMİROĞLU

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

2006, Sayfa : 75

Katı atıkların yönetimi, dünyada olduğu gibi ülkemizde de en önemli çevresel sorunlardan biridir. Atık taşıt lastikleri de bu katı atıklar arasında yer almaktadır. Her yıl giderek artan bir şekilde stoklanan atık lastikler, insan sağlığı, çevre kirliliği ve estetik gibi problemlere neden olmaktadırlar. Bu nedenle atık taşıt lastiklerinin yönetimi önem arz etmektedir. Atık lastiklerin yönetimi hakkında günümüze kadar çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmanın amacı, atık taşıt lastiklerini beton içerisinde agrega olarak kullanmak, böylece hem bu atıkların yönetimine katkıda bulunmak hem de betonun karakteristiklerine etkilerini araştırmaktır.

Bu çalışmada, beton içerisine hacimce %5, 10, 15 ve 20 oralarındaki lastikler agrega ile yer değiştirilmiş ve elde edilen betonların birim ağırlık, işlenebilirlik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, SEM analizi, EDX analizi ve sesüstü dalga hızı ölçümleri yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, beton içerisindeki lastik agrega miktarı arttıkça birim ağırlık, basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve ultra ses hızı ölçüm değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Eğilme dayanımı değerleri ise beton içerisindeki lastik agreganın içeriğine ve cinsine göre değişiklik göstermektedir. İri lastik agrega ilavesinin, ince lastik agrega ilavesine oranla betonun karakteristiklerine daha olumlu etkiler yaptığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton, atık lastik agrega, betonun karakteristik özellikleri.

ABSTRACT

MsC Thesis

USE of WASTE VEHICLE TIRE in CONCRETE and its EFFECTS ON CHARACTERISTICS of CONCRETE

Mehmet EMİROĞLU

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

2006, Page : 75

Management of solid wastes is one of the most important issue both World and our Country. Waste vehicle tires are one of these solid wastes. These waste tires that are gradually increasing, cause a huge environmental, human health and aesthetic problems. For this reason, the management of waste vehicle tires is very important. There are various studies about management of waste vehicle tires. Aim of this study is to use of waste vehicle tires in concrete as aggregate, hence, it contributes to management of waste vehicle tires and investigates the effects of waste tire on characteristics of concrete.

In this study, normal aggregate was replaced with waste vehicle tires 5%, 10, 15 and 20 of the total aggregate volume in the concrete and tested density, workability, compressive strength, flexural strength, split tensile strength, SEM analysis, EDX analysis and pulse velocity measuring of concrete.

After the experimental results, it is seen that density, compressive strength, tensile strength and pulse velocity values of concrete decrease while the waste tire content in concrete increases. However, the flexural strength of concrete with waste tire aggregate presented a difference according to content and types of waste tire. It is shown that the effect of coarse tire aggregate is better than fine tire aggregate.

Keywords: Concrete, waste tire aggregate, characteristic properties of concrete.

1. GİRİŞ

Katı atıklar, son yıllarda dünyada en önemli çevresel sorunlardan biri olarak gösterilmektedir. İnsanların günlük hayatlarında kullandıkları malzemelere bakıldığında, bunların birçoğunun plastik olduğu görülmektedir. Plastiğin çok geniş bir kullanım alanı olması nedeniyle, insanoğlu tarafından çok kullanılan bir malzemedir. Plastiğin çok kullanılmasının sebebi çok ucuz ve kolay elde edilebilir olmasıdır.

Günlük hayatta kullandığımız birçok malzeme (su şişeleri, poşetler, ambalaj malzemeleri, ev aletleri, taşıt lastikleri vb.) plastikten üretilmektedir. Bu plastik malzemeler işlevlerini tamamladıktan sonra atılmaktadırlar. Taşıt lastiği bu atıklar içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Diğer plastik malzemelerde olduğu gibi taşıt lastiği de çok uzun zaman içerisinde yok olması sebebiyle çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından önemli sorunlar meydana getirmektedir. Bunun önlenebilmesi amacıyla bu malzemenin tekrar ekonomiye kazandırılması ve yeni kullanım alanlarında katkı malzemesi olarak değerlendirilmesi yoluna gidilmelidir.

Atık taşıt lastikleri son yıllarda hızla artan bir biçimde stoklanmakta ve buna bağlı olarak doğayı olumsuz bir şekilde etkilemektedirler. Li ve arkadaşları [1], Amerika Birleşik Devletlerinde her yıl yaklaşık olarak 242 milyon atık taşıt lastiği meydana geldiğini, yasadışı stoklarda, kontrol edilmeyen çöplüklerde, ormanlarda ve boş alanlarda şimdiye kadar 2–3 milyar atık lastiğin biriktiğini ve bu stokların önemli çevresel sorunlara, sağlık ve estetik problemlerine neden olduklarını bildirmektedirler. Siddique ve Tarun [2], bu stokların sadece çevresel bir sorun olmadığını, aynı zamanda yangın tehlikesi potansiyeli ve fareler, kemirgenler için beslenme alanları oluşturduklarını bildirmişlerdir.

Dünyanın çeşitli bölgelerinde atık taşıt lastikleri artarak birikmektedir. Ghani ve arkadaşları [3], Malezya'da son 10 yılda atık lastik birikintilerinde %100'lük bir artış olduğunu bildirmektedirler.

Tablo 1.1. Amerika'daki lastiklere ait bazı veriler [2].

OLGULAR	RAKAMLAR
Yılda biriken atık lastik miktarı	270 Milyon
Atık lastiklerin yaklaşık ağırlığı	3.6 Milyon Ton
Stoklarda biriktirilen atık lastik miktarı	300 milyon
İnşaat mühendisliğinde kullanımı	30 Milyon
Dolgu işlemlerinde kullanımı	18 Milyon
Yasal düzenleme yapan ülke sayısı	48

Siddique ve Tarun [2], Fransa'da her yıl 10 milyonun üzerinde atık lastiğin meydana geldiğini bildirmektedirler. Segre ve Joekes [4], Brezilya'da her yıl yaklaşık 10–15 milyon atık lastiğin biriktiğinin tahmin edildiğini bildirmektedirler.

Tablo 1.1'den de anlaşılacağı gibi atık lastikler, her yıl artan bir şekilde yığılmaktadırlar. Bu lastiklerin kimyasal yapısı çevre sağlığı için çeşitli tehditler içermektedir. Bu nedenle, sorunun çözümü için yeni formüller geliştirilmelidir.

Atık lastiklerin yönetimi konusunda günümüze kadar çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunların arasında atık lastikleri bazı plastik ürünlerde kullanmak amacıyla yeniden değerlendirmek, çimento fabrikalarında vb. enerji elde edebilmek için yakıt olarak kullanmak, erozyondan korunmak amacıyla setler oluşturmak, asfalt kaplamada ve beton içerisinde agrega olarak kullanmak en yaygın çözümler arasında yer almaktadır.

Atık lastiklerin çimento fabrikalarında enerji elde etmek amacıyla yakılması sonucunda zehirli gazlar oluşmakta ve çevre kirliliğine sebebiyet vermektedir. Bunun yanında lastik kauçuk katkılı asfalt yapımında kullanılan ıslak yöntemin ekonomik olmaması sebebiyle son yıllarda bu çalışmalar yerini atık lastik katkılı beton uygulamalarına bırakmışlardır [1].

Beton dünyada kullanılan en yaygın yapı malzemelerinden biridir. Betonun bu kadar yaygın olarak kullanılma sebebi; şekil verebilme kolaylığı, fiziksel ve kimyasal dış etkilere karşı dayanıklılığı, ekonomik oluşu, kullanım ve üretimindeki pratikliktir [5]. Betonun arzu edilen özellikleri; düşük birim ağırlık, yüksek mukavemet, kırılma tokluğu ve çarpma dayanımı olarak sıralanabilir. Betonun bu sayılan özellikleri taşıyabilmesi için son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Beton içerisine agrega olarak atık taşıt lastiklerinin kısmen yer değiştirilerek kullanılması suretiyle elde edilen betonun mekanik özelliklerinin araştırılması bu yöntemlerden biridir. Bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır, fakat yapı uygulamalarında kullanılmasının tavsiye edilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Atık lastik ilaveli beton, geleneksel betona göre daha düşük birim ağırlık, daha yüksek tokluk ve enerji yutma kapasitesine sahiptir. Fakat lastik ilaveli betonun çekme ve basınç mukavemetleri geleneksel betona göre düşük çıkmaktadır. Bu konuda çeşitli yöntemler kullanılarak lastik katkılı betonun basınç ve çekme mukavemetleri artırılmaya çalışılmaktadır.

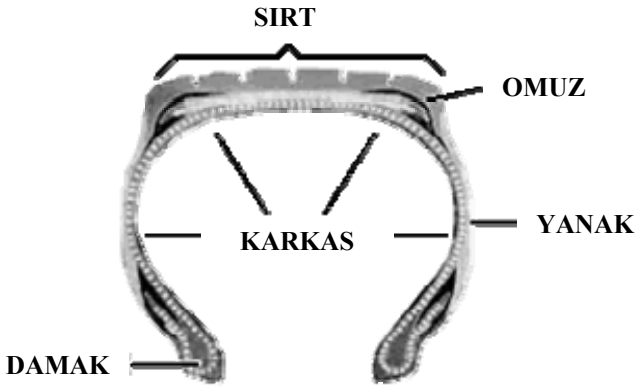
Ülkemizde atık lastiklerin yarattığı sorunlar, ne yazık ki ya bilinmemekte ya da önemsenmemektedir. Bu lastikler, Anadolu'nun birçok yöresinde yakıt olarak kullanılmakta veya vahşi depolama şeklinde gelişi güzel doğaya atılmaktadır. Bu atık taşıt lastiklerinin yönetimi ülkemiz açısından önem taşımaktadır. Konunun önemi nedeniyle, ülkemizdeki lastik üreticileri (Pirelli, Goodyear ve Brisa) bir çalışma grubu kurarak (Lastik Üreticileri Teknik Komitesi, LÜTEK) atık lastik yönetimini gündemlerine almışlardır [6].

Bu çalışmanın amacı atık taşıt lastiğinin beton içerisinde kullanılabilirliğini araştırarak hem betonun arzu edilen özelliklerini geliştirmek hem de çevresel bir tehdit olan atık taşıt lastiklerinin yönetimine katkıda bulunmaktır.

2. ATIK LASTİKLERİN STOKLANMASI ve ÇEVRESEL TEHDİT DURUMU

2.1. Lastik Üretimi

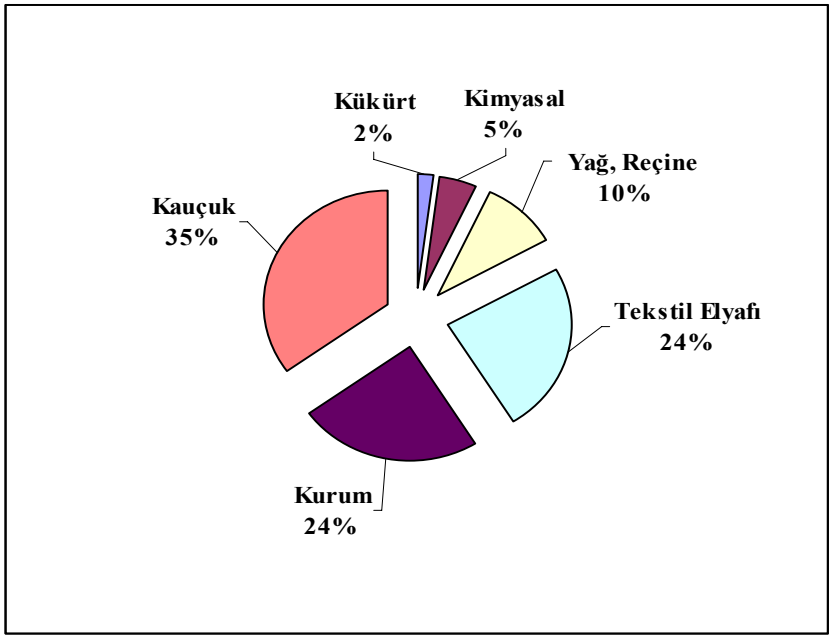
Tekerleğin Sümerler tarafından icadı üzerinden bugün beş bin yıldan fazla bir süre geçmiştir. Lastik üretimi, kauçuğun 18. yüzyılda bulunması ile hızlanmış ve günümüzde üst seviyeye gelmiştir. 1736-1774 yılları arasında Güney Amerika'da incelemeler yapmak için bulunan bir Fransız bilim adamı, yerlilerin *hevea* adını verdikleri ağaçtan bir sıvı elde ettiklerini kaydetmiştir. Amazon sakinleri bu ağaca Kao (=odun) O-Çu (sızan-ağlayan) diyorlardı, kauçuk buradan türemiştir. Kauçuk hammaddesine dayalı ilk uygulamalar iki Fransız'ın silgi imal ederek piyasaya sürdükleri 1770 yılında başlar [6].



Şekil 2.1. Araç lastiğinin yapısı [6].

Avrupa'da kauçuk ilk defa 18. yüzyılda ortaya çıkmış ve silgi, yapışkan ve hortum yapımında kullanılmıştır. Materyalin ekonomik olması geçtiğimiz yüzyıl ortalarında Charles Goodyear tarafından vulkanizasyon'un (yakma) keşfi ile olmuştur. Kükürtle ısıtılınca yapışkan ve gevşek malzeme sert ve elastik hale gelmiş böylece otomobil tekerleklerini kaplayan ve birçok avantajı beraberinde getiren lastik üretimi mümkün olmuştur. Otomobil lastikleri önceleri dolgu şeklinde yapılmaktaydı, daha sonra ise basınçlı hava içeren şekilde yapılmaya başlandı ve bu lastikler genelde kauçuk yanında çelik tel, tekstil elyafı ve az miktarda kurum, yağ, reçine ve çinko oksit içermektedirler [7].

Otomobil lastiğinin bileşimi Şekil 2.2'de, lastik üretiminde kullanılan malzemeler ise Tablo 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.2. Taşıt lastiğinin bileşimi [6].

Tablo 2.1. Lastik üretiminde kullanılan tipik malzemeler [2].

1. Sentetik Kauçuk
2. Doğal Kauçuk
3. Sülfür ve Sülfür Bileşikleri
4. Fenolik Reçine
5. Yağ
• Aromatik
• Naptenik
• Parafinik
6. Kumaş
• Polyester
• Naylon
7. Petrol Mumları
8. Pigmentler
• Çinko oksit
• Titanyum dioksit
9. Karbon Siyahı
10. Yağ Asitleri
11. Atık malzemeler
12. Çelik teller

Ülkemizde oto lastiği sanayisinin doğuşu, otomobil endüstrisindeki gelişmelere paralel olarak 1954 yılında Yabancı Sermayeyi Teşvik Kanunu'nun yürürlüğe girmesi ile olmuştur. Türkiye'de araç lastiği sektöründe faaliyet gösteren kuruluşlar otomotiv tekerlek lastiği üreticisi 4 büyük firma (Brısa Brıdgestone Sabancı Lastiksan ve Tic. A.Ş., Goodyear Lastikleri Tic. A.Ş., Türk Pirelli Lastikleri A.Ş., Petlas Lastik Sanayi ve Tic. A.Ş.), bisiklet ve motosiklet lastiği

üreticisi 2 firma (Anlaş Anadolu Lastik Sanayi ve Tic. A.Ş., Transko Lastik Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.)'dan ibarettir [8]. Sektördeki kuruluşların dış lastik üretim miktarları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Sektördeki kuruluşların lastik üretim miktarları [8].

Firma	Brisa	Goodyear	Pirelli	Petlas
Toplam Lastik Üretimi (Adet/Yıl)	5.512.786	5.451.618	5.216.900	1.225.500

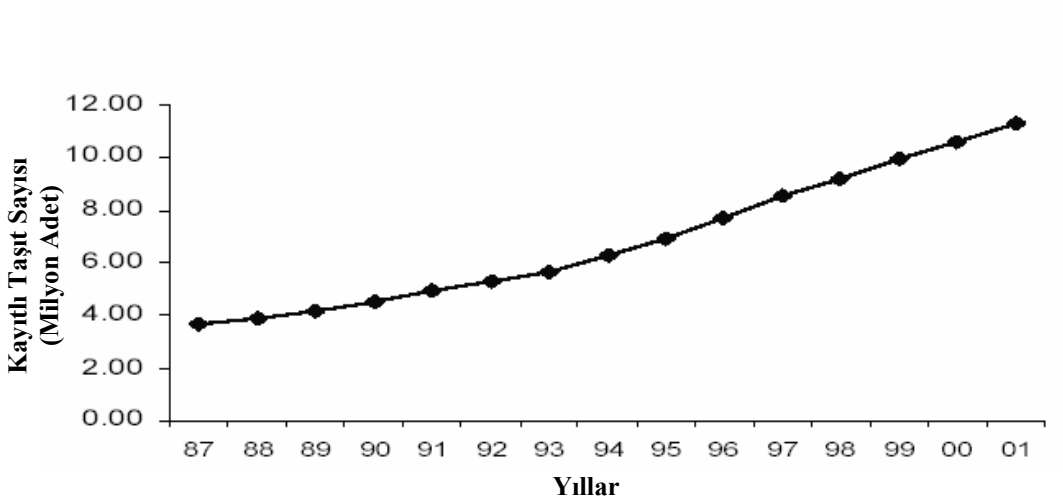
2.2. Atık Taşıt Lastiklerinin Depo Edilmesi

Ülkemizde 2000 yılında iç pazarda yaklaşık 126 000 ton araç lastiği satılmıştır. Bunun 40 000 tonu araç üreticilerine, 86 000 tonu da doğrudan yenileme pazarına gerçekleşmiştir. Bu veriler ışığında kullanım ömrünü doldurmuş atık lastiklerin yıllık miktarı 90 000 ton olarak tahmin edilmektedir. İthal edilen lastik miktarının da bu rakamın yaklaşık olarak %20-25'i olduğu dikkate alınırsa, 2000 yılında kullanım ömrünü dolduran atık lastik miktarının 120 000 ton civarında olduğu tahmin edilmektedir [6].

Atık lastiklerin yönetimi, son yıllarda büyüyen bir problem olmaktadır. Atık lastikler, yerel yönetimlerin elle kontrol etmekte zorlandıkları özel atıklar arasında yer almaktadırlar. Atık lastikler, stoklandığı bölgelerde insan sağlığı problemlerine ve çevresel-estetik problemlere neden olmaktadırlar [9].

Hird ve arkadaşları [10], 1998'de Britanya'da yaklaşık 435 000 ton kullanılmış lastiğin meydana geldiğini, bunların %11'inin ihraç edildiğini, %62'sinin tekrar kullanıldığını, geri dönüştürüldüğünü veya enerji elde etmek amacıyla yakıldığını ve %23'ünün dolgu malzemesi olarak kullanıldığını geri kalan %4'ünün de ya stoklandığını ya da yasadışı yollardan çevreye saçıldığını bildirmektedirler.

Son on yılda Malezya'da kayıtlı taşıtların sayısında %100'den fazla bir artış kaydedilmektedir. 11 milyonun üzerine ulaşan taşıt sayısı, aşırı miktarda atık lastiğin meydana gelmesine sebebiyet vermektedir. Bu artış Şekil 2.3'de verilmektedir [3].



Şekil 2.3. Malezya'daki motorlu taşıt kayıtlarındaki artış [3].

Li ve arkadaşları [1], Amerika'da yılda yaklaşık 242 milyon atık lastiğin meydana geldiğini ve bu atık lastiklerin şimdiye kadar yasadışı stoklarda, kontrol edilmeyen çöplüklerde biriktiğini ayrıca milyonlarca atık lastiğin derelere, ormanlara, çöllere ve boş alanlara yayıldığını belirtmektedirler.

Siddique ve Tarun [2], Fransa'da her yıl 10 milyonun üzerinde atık lastiğin meydana geldiğini bildirmektedirler. Segre ve Joekes [4], yalnızca Brezilya'da her yıl yaklaşık 32 milyon lastiğin üretildiğini ve bunların her yıl yaklaşık 10–15 milyonunun ıskartaya çıktığını belirtmektedirler.

Yukarıda belirtildiği üzere atık lastikler her yıl artan bir şekilde birikmekte ve çevresel sorunlara, insan sağlığı problemlerine ve estetik problemlere neden olmaktadırlar. Şekil 2.4'de bazı atık lastik stoklarından çekilmiş resimler görülmektedir.



a)





b) c)

Şekil 2.4. Stok yığınlarından çeşitli görünüşler

2.3. Atık Lastiklerin Çevresel Tehdit Durumu

Hızla büyüyen atık lastik stokları, Dünya'da olduğu gibi Ülkemizde de büyük bir çevresel sorun haline gelmektedir. Lastiklerin kompleks yapısı, geri kazanımını zorlaştırmaktadır. Lastiklerin ana yapısı olan kauçuk kimyasal olarak çapraz bağlı bir polimerdir, bu nedenle ne eriyebilir ne de çözülebilir. Sonuç olarak başka şekillere sokulması

oldukça zordur. Lastik üretiminde kullanılan materyaller olağanüstü kuvvetlidir ve binlerce mil asfalt yoldaki abrasif temasa dayanıklı olacak şekilde tasarlanırlar.

Depolama sahasında bulunan kullanılmış lastikler, çeşitli çevresel ve toplum sağlığı ile ilgili problemler oluştururlar. Lastiklerin depolama sahasında yer kaplamaması için yakma tercih edilmekte ve lastik diğer ürünlere dönüştürülmektedir. Atık lastikler depolama sahasında bertaraf edildiğinde, zehirli gazlar oluşturur ve bu gazlar belirli bir basınç altında patlarlar.

Lastik atıklar diğer atıklardan ayrı olarak depolandığı zaman, tehlikeler daha belirgin hale gelmektedir. Bütün halindeki parçalanmamış lastikler arasında, yangın başlamasına neden olabilecek yeterli oksijen bulunur. Yangın olduğunda, lastik yığınları aylarca sürebilecek yanmaya ve toksik yağların toprağa, oradan da yeraltı suyuna geçmesine neden olmaktadırlar. Bütün bu olumsuz özelliklere ek olarak, lastik yığınları sivrisinek ve kemirgenler için ideal bir yetişme ortamı sağlamaktadırlar. Şekil 2.5'de atık taşıt lastiklerin çevresel tehdit durumu açıkça görülmektedir.



a) **b)**

c) **d)**

Şekil 2.5. Atık taşıt lastiklerinin çevresel tehdit durumu

Atık lastikler kimyasal olarak kararlı olmaları nedeniyle toksik etki göstermemelerine rağmen açık havada kontrolsüz olarak yakılmaları sonucu hava, su ve toprak kirliliğine yol açarak çevre için önemli bir sorun teşkil ederler. Çünkü yanma sırasında siyah duman, uçucu organik bileşenler, dioksinler ve karbon monoksit, mono ve poliaromatik hidrokarbon açığa çıkar. Fenoller, poliaromatik hidrokarbonlar, çinko ve demir içeren metaller yeraltı sularına ve nehirlere sızabilirler. Yangını kontrol etmede kullanılan su ve yağmur suyu da bu kirleticilerin toprağa geçmesine ya da civardaki su kütlelerine akmasına neden olabilirler [11].

Ayrıca atık lastik yığınları ve depoları, lastik boşluklarında yağmur suyunu tutarak, belirli iklim koşullarında hastalıkları insanlara taşıma riski olan sivrisinekler ve benzer böcekler için uygun ortam oluştururlar.

3. ATIK LASTİKLERİN YÖNETİMİ ve MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

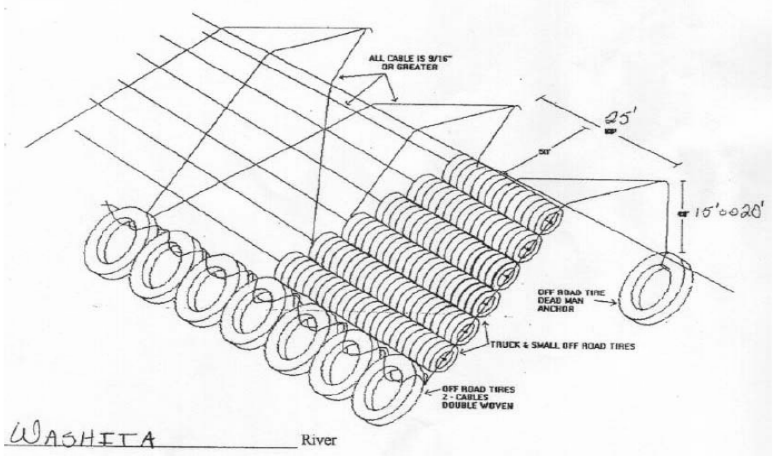
Atık lastiklerin yönetimi için günümüze kadar çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu yöntemlerden, atık lastikleri bazı plastik ürünlerde kullanmak amacıyla yeniden değerlendirmek, çimento fabrikalarında ve enerji santrallerinde enerji elde edebilmek için yakıt olarak kullanmak, erozyondan korunmak amacıyla setler oluşturmak, asfalt kaplamada ve beton içerisinde agrega olarak kullanmak en yaygın çözümler arasında yer almaktadır. Atık lastiklerin bulundukları şekle göre sık kullanım alanları Tablo 3.1'de verilmiştir [9].

Tablo 3.1. Atık lastiklerin bulundukları şekle göre sık kullanım alanları [9].

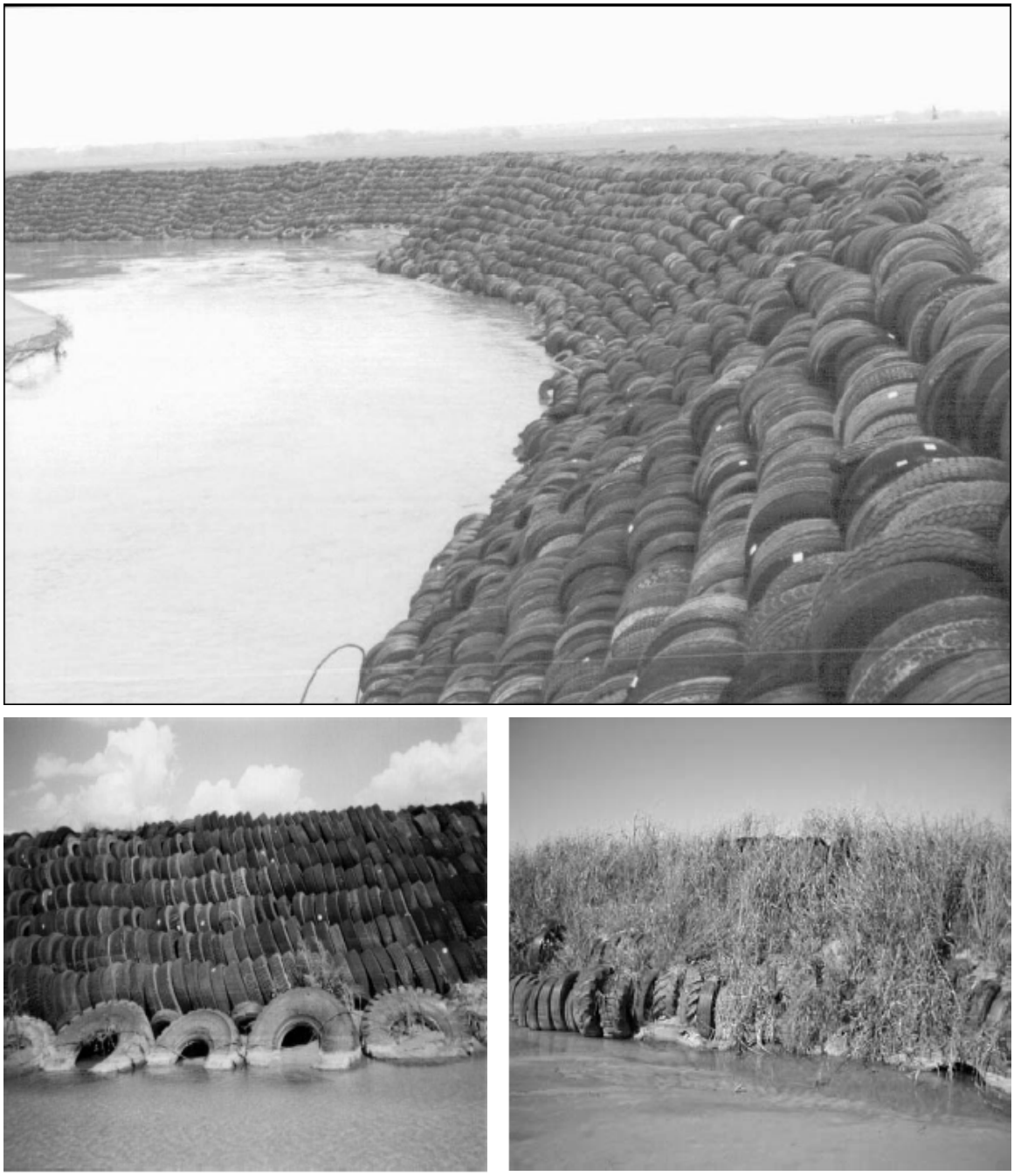
Bütün Lastikler	Yapay kayalıklar ve dalgakıranlarda, Oyun sahası donanımında, Erozyon kontrolünde, Anayollarda gürültü bariyeri olarak kullanılırlar.
Yırtılmış Lastikler	Zemin paspaslarında, Contalarda, Ayakkabı tabanlarında, Tersane tamponlarında, Dolgu olarak, Yalıtkan olarak kullanılırlar.
Parçalanmış Lastikler	Hafif yol yapım malzemesi olarak, Oyun sahası çakıl malzemesi olarak, Bataklık ıslahında.
Öğütülmüş Lastikler	Kauçuk ve plastik ürünlerde, Demiryolu geçitlerinde, Asfalt kaplamalarda katkı malzemesi olarak kullanılırlar.

3.1. Atık Lastiklerin Erozyon Kontrolünde Kullanılması

Nairn ve arkadaşları [12], erozyon kontrolü ve dere kıyılarının stabilizasyonu amacıyla atık lastikleri kullanmışlardır. Bu yöntem ile ilgili uygulama şekilleri Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Kıyı stabilizasyonu için önerilen plan [12].



Şekil 3.2. Kıyı stabilizasyonu uygulamaları [12].

3.2. Atık Lastiklerin Enerji Elde Etmek Amacıyla Yakılması

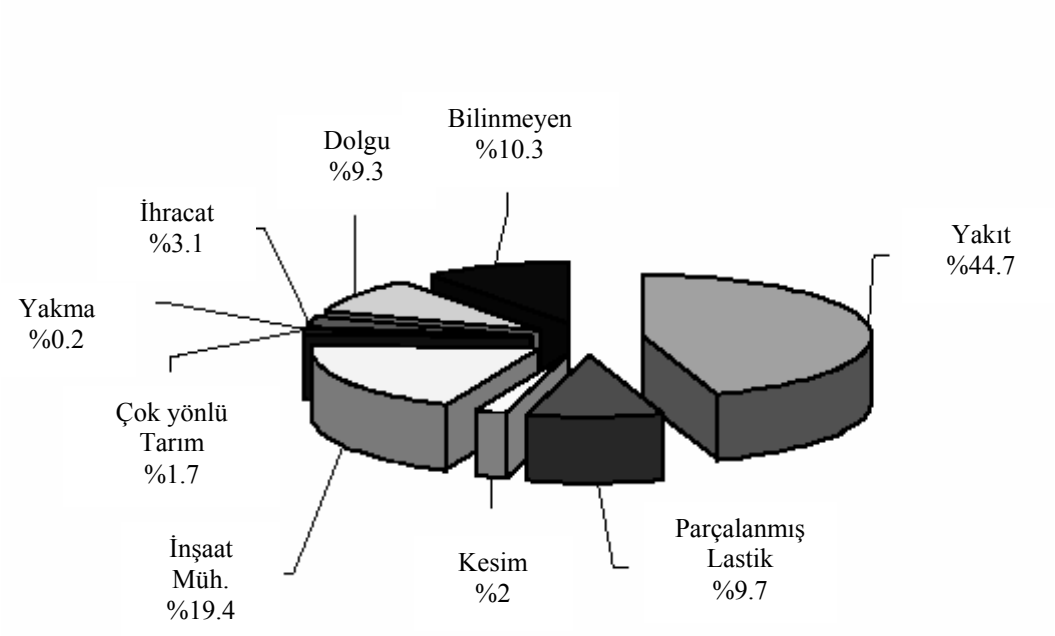
Atık lastiklerin 454 gramında yaklaşık 1266–1688 kilojul enerji bulunmaktadır. Bu değer kömürden biraz daha yüksek bir değerdir [9].

Atık lastikler enerji ihtiyacı olan santrallerde ve bazı fabrikalarda yakılmak suretiyle enerji elde edilmesinde kullanılabilmektedirler.

Atık lastikler;

- Enerji santrallerinde,
- Lastik üretim fabrikalarında,
- Çimento fırınlarında,
- Selüloz ve kâğıt fabrikalarında ve
- Küçük üniteli buhar jeneratörlerinde enerji ihtiyacı için yaygın olarak kullanılmaktadırlar [9].

Yakma ocağının tipine bağlı olarak bütün lastikler ve parçalanmış lastikler yakıt olarak kullanılmaktadırlar. Amerika'da 1996'da atık lastiklerin yaklaşık %57'sinin yakıldığını belirtmektedirler [13].



Şekil 3.3. Amerika'daki atık lastiklerin kullanım alanları [9].

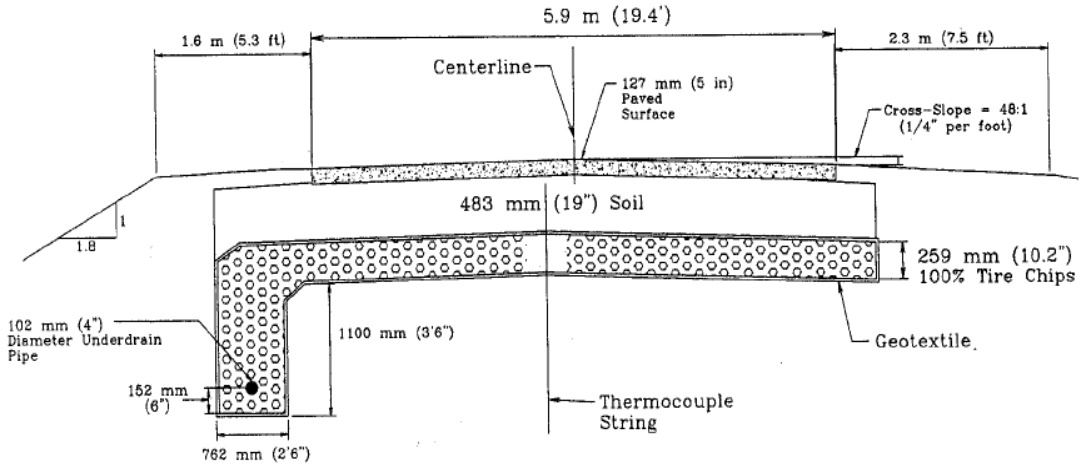
Lastiklerin içerisinde;

- Doğal ve sentetik lastikler bünyelerinde stren ve bütadien,
- On yedinin üzerinde ağır metal (kurşun, krom, arsenik, çinko vb.),
- Benzol temelli yapıştırıcı yağlar ve diğer petrokimyasallar,
- Karbon karası ve
- Klor gibi zararlı maddeler bulunmaktadır.

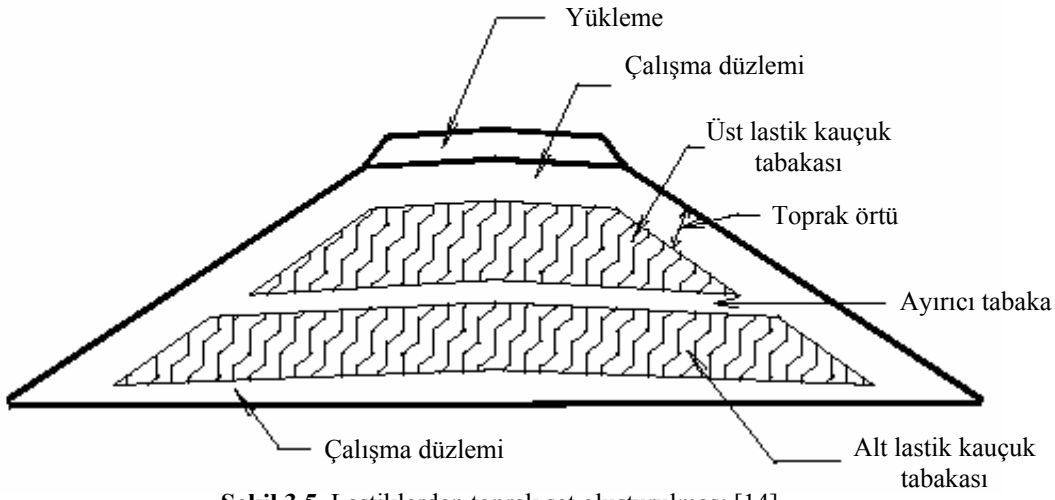
Lastiklerin kimyasal yapısı göz önüne alındığında, yakma yönteminin mantıklı bir çözüm olmadığı açıktır.

3.3. Atık Lastiklerin Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması

Atık lastikler düşük birim ağırlıkları sebebiyle mühendislik uygulamalarında hafif agrega gibi değerlendirilmekte ve dolgu malzemesi olarak toprak setlerde, istinat duvarlarında ve zemin dolgularında kullanılmaktadırlar. Atık lastikler düşük birim ağırlıkları (zeminlerin 1/3'ü kadar), iyi ısı yalıtımı (zeminden 8 kat daha iyi), iyi drenaj kabiliyeti (10 kez daha iyi) ve sıkıştırılabilirlik gibi özelliklerinden dolayı mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadırlar [14]. Bu uygulamalara ait çeşitli planlar Şekil 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8'de verilmiştir.



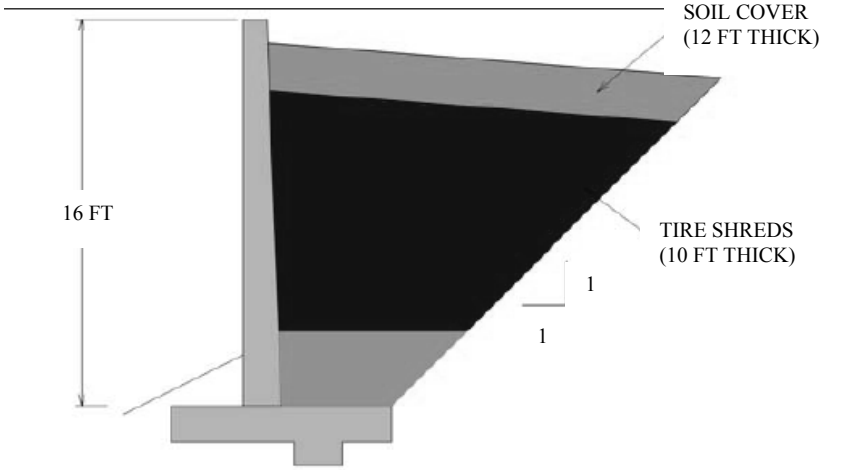
Şekil 3.4. Yol alt dolgu malzemesi olarak kullanımı genel kesit planı [14].



Şekil 3.5. Lastiklerden toprak set oluşturulması [14].



Şekil 3.6. Lastiklerin yerleştirilmesi [14].



Şekil 3.7. İstinat duvarı kesiti [14].



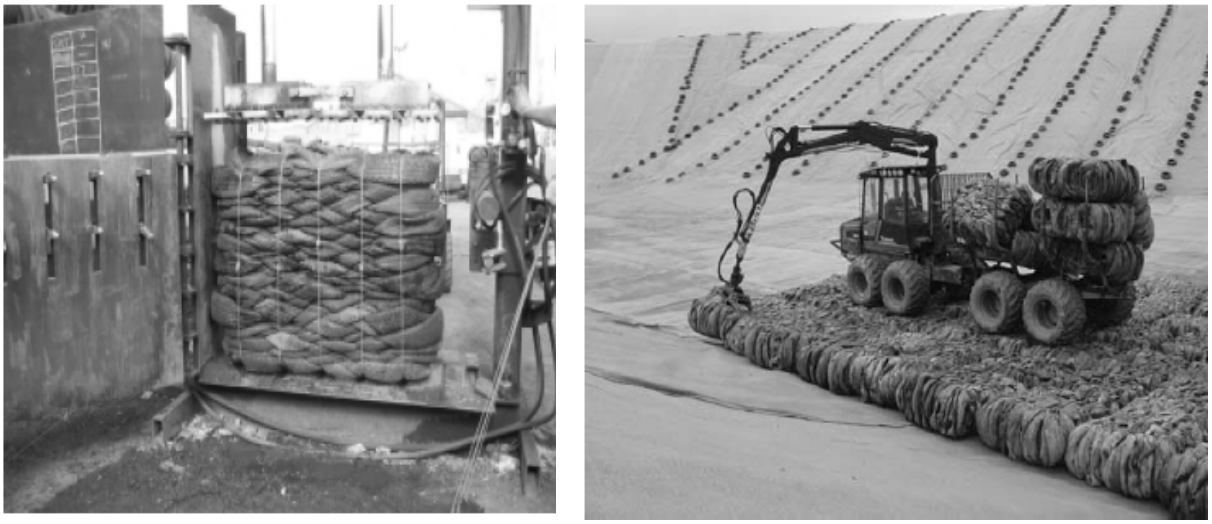
Şekil 3.8. Lastiklerin yerleştirilmesi [14].

Atık lastik agregalar düşük birim ağırlık, yüksek geçirimlilik ve yüksek yalıtım özellikleri nedeniyle, zayıf zeminlerde toprak setler oluşturmada dolgu malzemesi olarak, heyelan stabilizasyonunda, istinat duvarları ve köprü ayaklarında dolgu malzemesi olarak kullanmak için oldukça uygundurlar.

3.4. Atık Lastiklerin Yeniden Kullanımı

Birçok lastik üzerindeki tırtıkları aşınmadan atılmaktadır. Bunlar bir lastik deposunda toplanıp tekrar satışa sunulabilir. Bu şekilde bir düzenleme ile bile atık lastiklerin oranında %5-10'luk bir azaltmaya gidilebilir [6].

Bütün lastikler ile yapay kayalıklar, deniz duvarları ve dalgakıranlar oluşturulabilir. Hem deniz hem de tatlı su limanlarında, lastikler bot siperleri olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca atık lastikler, eğimli arazilerde teras yapımında, spor alanlarında, tartan pist ve tenis kortu yapımında, oyun bahçeleri düzenlemesinde, termoplastik ve plastik karışımlarda yaygın bir biçimde kullanılmaktadırlar. Bahsedilen bu yöntemlerle ilgili bazı fotoğraflar Şekil 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 ve3.14'de verilmektedir.



Şekil 3.9. Lastiklerin arazi doldurma işleminde kullanımı [15].



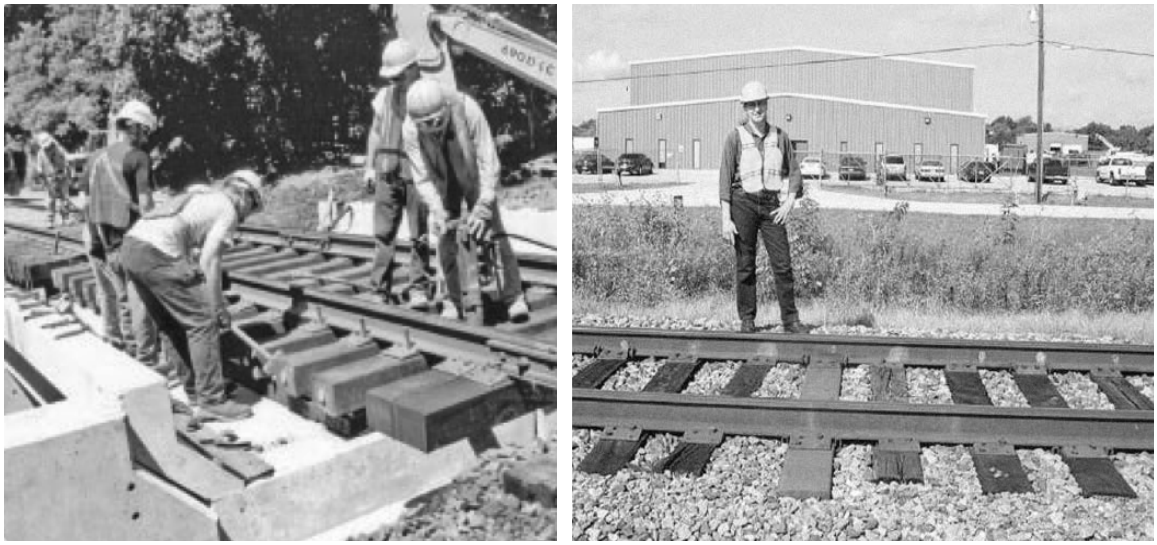
Şekil 3.10. Lastiklerin feribot güvertelerinde kullanımı [15].



Şekil 3.11. Lastiklerin oyun sahalarında kullanımı [16].



Şekil 3.12. Lastiklerin yem kutusu olarak kullanımı [17].



Şekil 3.13. Atık lastiklerden demiryolu travers yapımı [18].

Yukarıda bahsedilen kullanım alanlarının dışında atık lastikler asfalt ve beton agregası olarak da kullanılmaktadır. Atık lastiklerin asfalt yapımında kullanımı hakkında oldukça fazla çalışma yapılmış fakat bu yöntemin ekonomik olmayışı nedeniyle yerini atık lastiklerle beton üretimine bırakmıştır. Atık lastiklerin beton agregası olarak kullanımı Bölüm 4'de detaylı olarak anlatılacaktır.

4. ATIK LASTİKLERİN BETON AGREGASI OLARAK KULLANIMI

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte betonun bazı alanlarda kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Bu nedenle beton teknolojisinde gelişmeler meydana gelmiştir. Betonun basınç dayanımının yanında çekme ve eğilme dayanımlarının da yüksek olması ve aynı zamanda ekonomik olması günümüz teknolojisinde önem kazanmaktadır. Bunu sağlamak amacıyla araştırmacılar yoğun çalışma yapmaktadırlar.

Geleneksel beton, yorulma, aşınma, çarpma, kavitasyon, çatlama sonrası yük taşıma ve tokluk açısından zayıf bir performans sergiler [5]. Betonun bu özellikleri sergilemesini sağlamak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunlar arasında lifli beton, ferro beton, vakumlu beton sayılabilir. Bunların dışında atık lastik katkılı beton, doksanlı yıllardan beri araştırılmaktadır.

Atık taşıt lastiklerinin betonarme betonunun içerisinde agrega olarak kullanımı henüz asfalt kaplamasında kullanımı kadar araştırılmamıştır. Literatürde atık lastik kauçukların beton agregası olarak kullanımı hakkında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Fakat yapı uygulamalarında tavsiye edilmeden önce daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda, genel olarak atık lastik kauçuk kullanımının betonun mukavemetini azalttığı ancak betona esneklik ve tokluk kazandırdığı belirtilmektedir.

4.1. Beton İçerisinde Kullanılan Atık Lastiklerin Mühendislik Özellikleri

4.1.1. Atık Lastiklerin Sınıflandırılması

Ömrünü tamamlamış atık lastikler çeşitli kesim ve öğütme yöntemleri uygulanarak beton içerisinde agrega olarak kullanılmaya hazır hale getirilebilmektedir.

4.1.1.1. Atık Lastiklerin Kesim İşlemi

Atık lastikler çeşitli firmaların ürettiği makineler sayesinde kolayca istenilen boyutta kesilebilmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de bu makinelere ait birkaç resim verilmiştir.



Şekil 4.1. Lastik öğütme işlem sırası



Şekil 4.2. Atık lastiklerin öğütme işlemi

4.1.1.2. Hurda Lastikler

Hurda lastikler, bütün halinde parçalanmamış lastik olarak, yırtık lastik olarak, öğütülmüş lastik olarak veya kırıntı lastiklerden elde edilebilirler. Tipik bir otomobil lastiği yaklaşık 9.1 kilogram ve kamyon lastikleri yaklaşık 45.4 kilogram gelmektedir [2].

4.1.1.3. Yırtık lastikler

Bu lastikler, bütün lastikleri ortadan ikiye ayırabilen kesme makineleri sayesinde elde edilmektedir [2].

4.1.1.4. Parçacık/Çip Lastikler

Yukarıdaki her iki lastik sınıflandırmasını kapsayan bir sınıflandırmadır. İlk kesim sonrasında parça lastiklerin boyutları kesim şartlarına ve kesim makinelerine bağlı olmakla birlikte uzunlukları 300–460 mm gibi büyük, genişlikleri ise 100–150 mm gibi düşük olmaktadır. Lastik çiplerin elde edilmesi sırasında yeterli küçüklükte sonuç elde etmek için birinci ve ikinci kesim yöntemleri birlikte uygulanmaktadır [2].

4.1.1.5. Öğütülmüş Lastikler

Öğütülmüş lastikler ticari uygulamalarda 19 mm kadar büyük, 0.15 mm kadar küçük oranlarda üretilmektedir. Bu planlanan uygulamaya ve parçalama donanımına bağlıdır [2].

4.1.1.6. Kırıntı Lastik

Kırıntı lastik boyutları 0.075 mm den 4.75 mm ye kadar olan parçacıkları içerir. Lastikleri kırıntı lastiğe dönüştürmek için genellikle şu yöntemler uygulanmaktadır;

- Kırıcı (Parçalayıcı) Değirmen Yöntemi,
- Tanecikli Yöntem ve
- Mikro (öğütücü) Değirmen Yöntemi.

4.1.2. Elek Analizi

Parçalanmış lastiklerin elek analizi deneyleri sıkıştırmadan önce elek analizi ve sıkıştırdıktan sonra elek analizi olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Elek analizi sonuçlarında, parçalanmış lastiklerin üniform yani parçaların hemen hemen aynı olduğu belirtilmiştir [19].

Tablo 4.1. Sıkıştırmadan önce elek analizi [19].

Sıkıştırmadan Önce Elek Analizi					
Elek No	**Elek Açıklığı (mm)**	**Elek Üzerinde kalan (gr)**	**% Kalan**	**Kümülâtif Kalan %.**	**İncelik (%)**
½	**12.5**	2	0.4	0.4	99.6
3/8	**9.5**	131	26.2	26.6	73.4
4	**4.75**	287	57.4	84.0	16
6	**3.35**	33	6.6	90.6	9.4
10	**2**	16	3.2	93.8	6.2
20	**0.85**	15	3.0	96.8	3.2
Kap	**–**	16	3.2	100.0	0

Tablo 4.2. Sıkıştırdıktan sonra elek analizi [19].

Sıkıştırma Sonrası Elek Analizi					
Elek No	**Elek Açıklığı (mm)**	**Elek Üzerinde kalan (gr)**	**% Kalan**	**Kümülâtif Kalan (%)**	**İncelik (%)**
½	12.5	1	0.2	0.2	99.8
3/8	9.5	123	24.6	24.8	75.2
4	4.75	306	61.2	86.0	14
6	3.35	28	5.6	91.6	8.4
10	2	12	2.4	94.0	6
20	0.85	14	2.8	96.8	3.2
Kap	–	17	3.4	100.2	0

4.1.3. Atık Lastiklerin Birim Ağırlığı

Atık lastiklerin birim ağırlıkları lastiği üreten firmaya göre değişiklik göstermektedir. Lastikler sudan biraz daha hafiftirler ve su üzerinde yüzdükleri için birim ağırlıklarını tayin etmek oldukça zordur. Bu durum sadece bütün lastiklerde ve ince kırıntı halindeki lastiklerde meydana gelmektedir. Lastik ve lastik ürünlerinin zemin ve taşlardan daha hafif oldukları açıktır. Bütün ve parçalanmış lastiklerin yoğunlukları boyut, derinlik ve sıkıştırmaya göre Tablo 4.3'de verilmektedir [20].

Tablo 4.3. Lastiklerin birim ağırlık değişimi [20].

Bütün Lastikler	0.12 gr/cm^3
Parçalanmış Lastikler	0.16 gr/cm^3
İstiflenmiş Kamyon Lastikleri	0.22 gr/cm^3
Balyalanmış Lastikler	0.48 gr/cm^3
Hurda (Gevşek)	0.35-0.80 gr/cm^3
Hurda (Sıkışık)	0.59-0.96 gr/cm^3

Diğer katı malzemelerde olduğu gibi parça boyutunun azalması ve dış basınç artışı genellikle lastik parçacıklarının yoğunluğunu artırır. Fakat lastik parçacıklarının esnekliği ve şekil değiştirebilmesi bu yoğunluk değişimini etkiler.

4.1.4. Dayanıklılık

Lastik kauçuklar, sırasıyla güneş ışığı ve kimyasal bozunma direncini geliştirmek için karbon siyahı, antioksidan ve ültraviyole dengeleyici içerirler. Bu özellikler parça boyutundan bağımsızdır. Bütün lastiklerin mukavemeti, çelik sargılarla ve kumaşlarla (naylon ve polyester) takviye edilmiştir. Fakat çelik sargı ve kumaşın küçük parçalara ayrılan lastiklerden sıyrılması nedeniyle bu ek dayanım azalmaktadır. Yollar ile temastaki lastiklerin uzun ömürleri aşınma dayanımlarına bir örnek teşkil etmektedir. Lastikler hafif şoklardan kolayca etkilenmezler fakat keskin malzemeler tarafından kolayca kesilebilir veya patlatılabilirler [20].

4.1.5. Su Emme

Lastikler suya bırakıldıklarında yüzeyde ve gelişigüzel seviyelerde kalırlar fakat su geçirmezler. Yürütülen çeşitli çalışmalar sonucunda lastiklerin maksimum su emme oranlarının %2-4 arasında olduğu belirlenmiştir [20].

4.1.6. Isı Geçirgenliği

Lastik kauçuğun ısı iletkenliği oldukça kötüdür ve zemin ve agreganın tersine daha iyi ısı yalıtkandır. Isı yalıtkanlığı parça boyutuna, takviye çelik içeriğine, sıkıştırma oranına, nem içeriğine, çevre sıcaklığına ve diğer değişkenlere bağlıdır. Örneğin, nem içeriği %1'den daha az ve 1 mm boyutundaki parçacıkların ısı geçirgenliği 0.0838 Cal/metre-saat-^{o}C iken nem içeriği %5 ve 25 mm boyutundaki parçacıkların ısı geçirgenliği 0.147 Cal/metre-saat-^{o}C olmaktadır [20].

4.1.7. Ses Yalıtımı

Lastik kauçukların ses geçirgenliğinin zayıf olması nedeniyle ses yutucu olarak kullanılabilirler. Lastik kauçukların karayollarında ses bariyeri olarak kullanılması buna bir örnek teşkil etmektedir [20].

4.1.8. Titreşim Yalıtımı

Lastik parçacıklarının sıkıştırılabilirliği, lastiklerin titreşimleri soğurmasına imkân tanır. Lastik parçacıklarının deprem titreşim kontrolü olarak kullanımı hakkındaki çalışmalar sürmektedir [20].

4.1.9. Yanabilirlik-Tutuşabilirlik

Lastik kauçuklar, mimari amaçlarla kullanılan ağaç, kâğıt, köpük ve kumaş gibi bazı yapı malzemelerinde daha yüksek bir sıcaklıkta (yaklaşık 306 ^{0}C) yanmaya başlamaktadırlar [20].

5. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

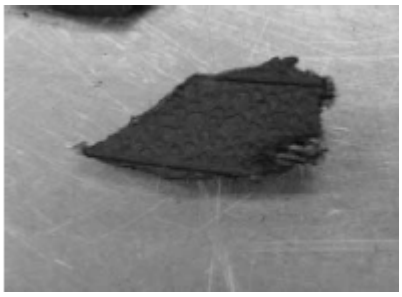
Betonun süneklik, rezilyans, tokluk ve kırılma yüzey enerjisi gibi özelliklerinin düşük olması nedeniyle, betonda arzu edilen bu özelliklerin elde edilebilmesi amacıyla beton içerisine agrega olarak atık lastikler katılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Li ve arkadaşları [1], yaptıkları çalışmalarında, beton içerisinde iki tip lastik biçimi kullanılmışlardır bunlar;

- Çip veya parçacık halindeki lastikler,
- Lif halindeki lastikler.

Beton hazırlanırken, Tip 1 Portland çimentosu, çakıl, doğal kum ve akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılmıştır. Basınç mukavemeti 40 MPa olacak şekilde kontrol numunesi hazırlanmıştır. Lastik agregalı beton hazırlanırken, hacimce % 15 kaba agrega atık liflerle veya çiplerle yer değiştirilmiştir.

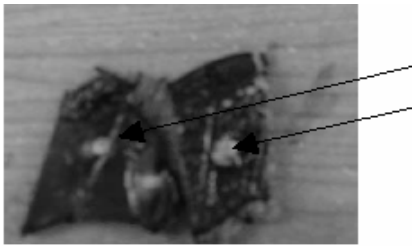
Atık lastik çipler otomobil ve kamyon lastiklerinden karışık elde edilmiştir. Yaklaşık 1/1 oranda ve çelik sargılı otomobil ve kamyon lastikleri kullanılmıştır. Çipler kare yüzeylidir (25.4 x 25.4 mm) ve kalınlıkları 5 mm'dir. Çipler üç alt gruba ayrılmıştır. Birincisi kontrol olarak kullanılan çipler, ikincisi yüzeyi NaOH ile ıslatılmış çipler. Bunun için çipler NaOH çözeltisi içinde seramik bir kapta hareket ettirilerek (karıştırma) yarım saat bekletilmiştir. Daha sonra bu çipler içme suyu kullanılarak durulanmıştır. Çipler ve çimento harcı ara yüzeyinde aderansı sağlamak amacıyla fiziksel demirleme üçüncü alt grup olarak kullanılmıştır. Bunu sağlamak amacıyla her çipin ortasına 5 mm çapında bir delik açılarak çimento harcının buralardan lastiklerin içine girmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.1. Lastik çip [1].



Şekil 5.2. Yüzey işlemi [1].



Şekil 5.3. Fiziksel demirleme [1].

Atık lastik lifler mekanik kesim yapılarak elde edilmiştir. Lifler otomobil ve kamyon lastik karışımından 1/1 oranda veya sadece otomobil lastiğinden elde edilmiştir. Bazı liflerde çelik sargı var, bazılarında ise yoktur. Burada liflerin dayanıklılığının, modifiye betonun mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Lif yüzey oranının, modifiye betonun mukavemetine ve dayanıklılığına etkisini araştırmak için uzunlukları 25.4, 50.8 ve 76.2 olan üç lif çeşidi kullanılmıştır.

Deneyler yapılırken her seri için altı numune hazırlanmıştır. Altı numunelik her serinin üç numunesi, elastisite modülü, basınç dayanımı ve poisson oranını hesaplamak için kullanılmıştır. Geriye kalan üç numunede ise yarmada çekme mukavemeti deneyleri yapılmıştır.

Tablo 5.1. Atık lastik ve polipropilenin mekanik özellikleri [1].

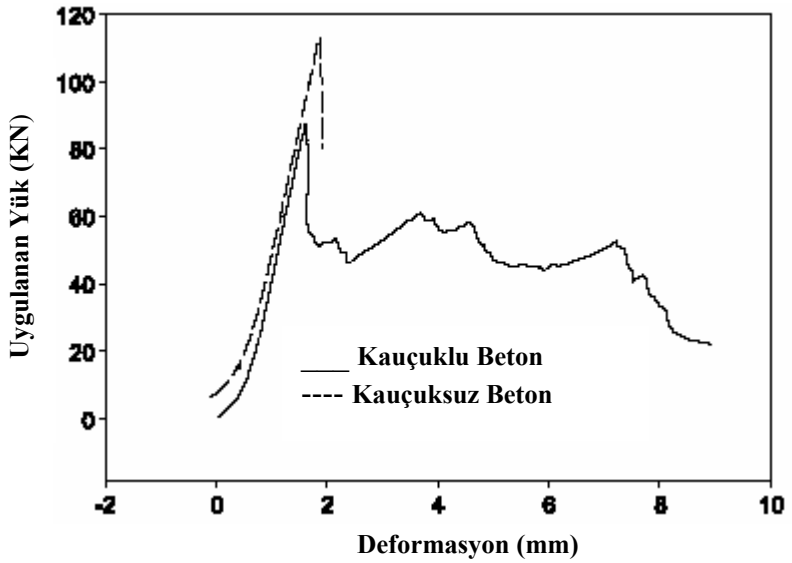
	Yoğunluk (gr/cm^3)	**Elastisite Modülü (MPa)**	**Çekme Mukavemeti (MPa)**
Atık Lastik Kauçuğu	0.84	%100 gerilmede 2.0	28
Polipropilen	0.91	3500	620

Tablo 5.2. Deneyde kullanılan çip ve liflerin boyutları [1].

Seri No:	**Numune Cinsi**	**Kauçuk Uzunluğu (mm)**	**Kauçuk Genişliği (mm)**	**Kauçuk Kalınlığı (mm)**
1	**Kontrol**	-	-	-
2	**Çelik sargılı karışık çipler**	25.4	25.4	5
3	**NaOH yüzey işlemi yapılmış ve çelik sargılı lastik çipler**	25.4	25.4	5
4	**Çelik sargılı ve ortasında delik bulunan karışık lastik çipler**	25.4	25.4	5
5	**Çelik sargısız otomobil lastiği lifler**	25.4	5	5
6	**Çelik sargısız otomobil lastiği lifler**	50.8	5	5
7	**Çelik sargısız otomobil lastiği lifler**	76.2	5	5
8	**Çelik sargılı otomobil lastiği lifler**	50.8	5	5
9	**Çelik sargılı karışık lastik çipler**	50.8	5	5
10	**Çelik sargısız otomobil çipleri ve hacimce %0.1 polipropilen lifler (50.8 mm uzunluk)**	50.8	5	5

Tablo 5.3. Deney sonuçları [1].

Seri No	Basınç Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Slump (cm)	Hava İçeriği (%)
1	39.08	3.11	34.72	0.23	14.7	4.5
2	22.33	2.29	28.89	0.22	14.4	4.1
3	23.23	2.19	28.88	0.21	14.3	5.0
4	22.89	2.38	28.69	0.22	14.2	4.6
5	22.16	2.17	26.93	0.23	14.6	4.8
6	20.48	2.15	28.59	0.25	15.2	5.0
7	20.82	1.99	28.39	0.24	14.0	4.7
8	22.83	2.41	30.40	0.25	14.8	4.6
9	25.14	2.62	31.19	0.21	15.2	4.9
10	25.60	2.69	31.96	0.23	14.8	5.0



Şekil 5.4. Kauçuklu ve kauçuksuz betonun yük-deformasyon eğrisi [1].

Toplamda 10 seri (60 adet) deney numunesi, 152.4 x 304.8 mm'lik silindir şeklinde hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Test ve analiz sonuçlarından öncelikle şu sonuçlar çıkarılmıştır;

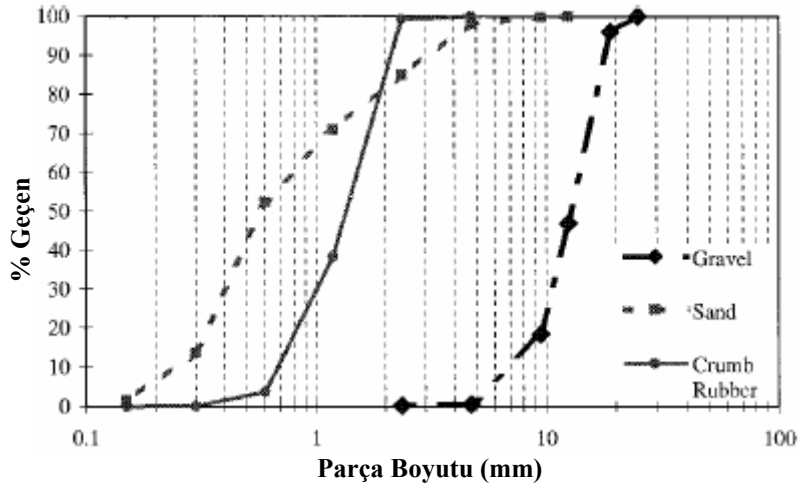
- Lifler, çiplerden daha iyi sonuç vermişlerdir. İnce lifler kalın liflere göre daha iyi performans göstermesine rağmen, etki önemli derecede değildir.
- Yeni metotlar uygulanmadıkça NaOH büyük boyutlu çipler için işe yaramamaktadır.
- Fiziksel demirlemenin aderans açısından bazı etkileri vardır
- Uzun lifler dolanmaya müsaittir. Lif uzunluğunun 50 mm'den az olarak sınırlandırılması önerilir.
- Atık lastiklerin içerisindeki çelik sargıların, modifiye betonun mukavemet artışına pozitif etkileri vardır. Kamyon lastikleri otomobil lastiklerine göre daha iyi performansa sahiptirler.

- Melez lif takviye, daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlamak için bir potansiyele sahiptir. Nihai mukavemeti tamamıyla düzeltmek için daha fazla polipropilen life ihtiyaç vardır.

Khatib ve Bayomy [21], lastik kauçuklu betonun mekanik özelliklerini araştırmak üzere bir dizi deneysel çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarında kırıntı lastik (ince agrega yerine) ve lastik çipler (iri agrega yerine) kullanmışlardır. Karışım malzemelerinin oranları ve atık lastiklerin elek analizi sonuçları aşağıdaki gibidir.

Tablo 5.4. Karışım dizaynı [21].

Malzeme	Özgül Ağırlık	Ağırlık (kg/m^3)	Hacim (m^3/m^3)
İri Agrega	2.650	1,024.0	0.386
İnce Agrega	2.670	786.0	0.294
Portland Çimento	3.150	388.0	0.123
Su	1.000	186.0	0.186
Hava İçeriği	-	-	0.010
Kırıntı Lastik	1.180	0.0	0.000
Lastik Çip	1.120	0.0	0.000
Toplam	—	2,384.0	1.000

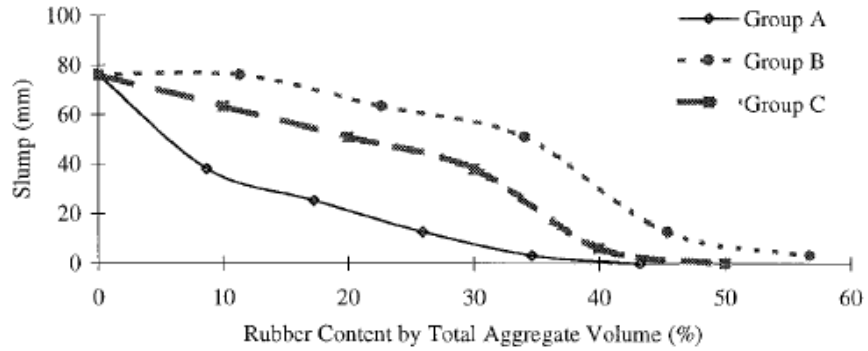


Şekil 5.5. Kırıntı lastiğin elek analizi [21].

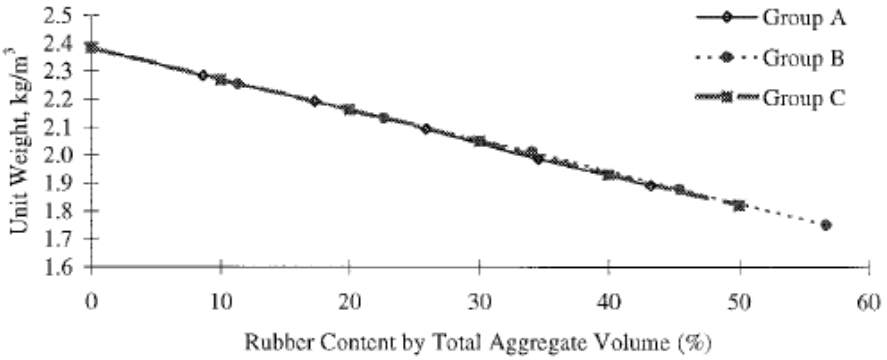
A, B ve C grubu olmak üzere üç grup karışım hazırlanmıştır;

- **Grup A:** Burada sadece kırıntı lastiklerle ince agrega yer değiştirilmiştir. Hacimce %5-%100 arasında sekiz değişik karışım oranı belirlenmiştir.
- **Grup B:** Burada sadece iri agrega ile lastik çipler yer değiştirilmiştir. Hacimce %5-%100 arasında sekiz değişik karışım oranı belirlenmiştir.
- **Grup C:** Hem iri hem de ince agrega %5-%100 arasındaki sekiz değişik oranda kırıntı lastik ve çiplerle yer değiştirilmiştir. Burada maksimum kauçuk içeriği toplam agreganın %50'si kadardır.

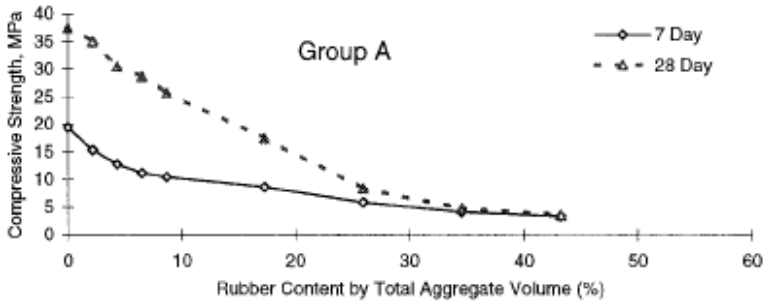
Bu şekilde hazırlanmış betonların taze haldeki ve sertleşmiş haldeki bazı özellikleri araştırılmıştır. Bazı sonuçlar Şekil 5.6'daki gibidir.



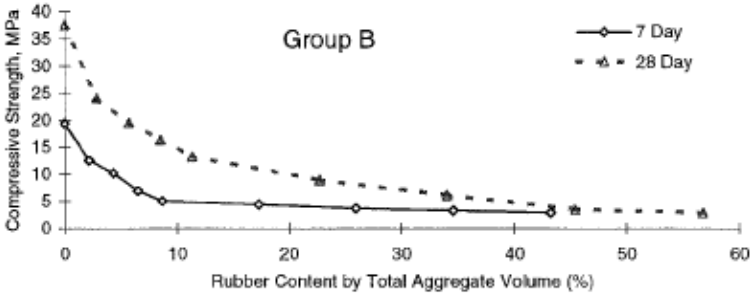
a)



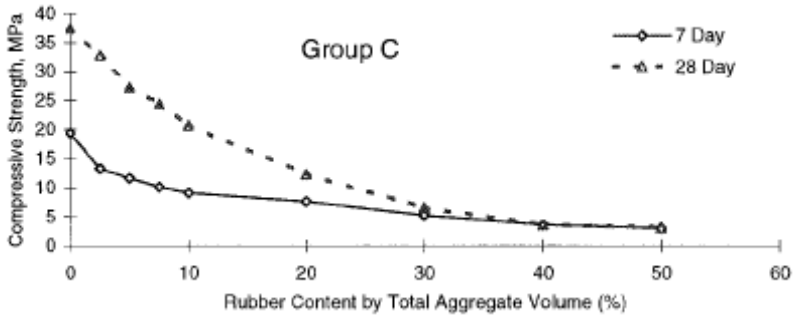
b)



c)



d)



e)

Şekil 5.6. Lastik kauçuk katkılı betonun deney sonuçları [21].

Yapılan deneyler ışığında, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır;

- Betonun işlenebilirliği karışımın kauçuk içeriğine bağlıdır,
- Mukavemet verilerine göre karışımın kauçuk içeriği arttıkça betonun mukavemetinde sistematik bir azalma gözlenmektedir,
- Deney gözlemleri sonucunda, aşırı mukavemet kaybından dolayı karışımın lastik kauçuk içeriği %20'yi aşmamalıdır.

Oliveras ve arkadaşları [22], yaptıkları çalışmada, küçük parçacıklı atık lastik ve kısa polipropilen lif katkılı beton numunelerinin statik ve dinamik yükler altındaki (7. ve 28. günler sonunda) mekanik davranışlarını deneysel olarak belirlenmeye çalışmışlardır. Deneysel sonuçlar benzer nitelikteki polipropilen lif veya lastik katkısı olmayan beton numuneleriyle mukayese edilmiştir. Mikroskobik çalışma (SEM), çimento ile lastik liflerin ara yüzeylerinin uygunluğunu analiz etmek amacıyla dâhil edilmiştir. Basınç, dolaylı gerilme ve statik eğilme testleri ile dinamik basınç testleri yapılmıştır.

Bu araştırmaya bağlı olarak Salamanca yakınlarında oturmaya elverişli Gudino'da kırıntı lastik kauçuklu betondan bir deneysel trafik yolu yapılmıştır. Üç yıl yoğun kullanım sonunda (otomobil ve kamyon), yol hâlâ çok iyi bir performans sergilemiştir.

Tablo 5.5. Karışım dizaynı [22].

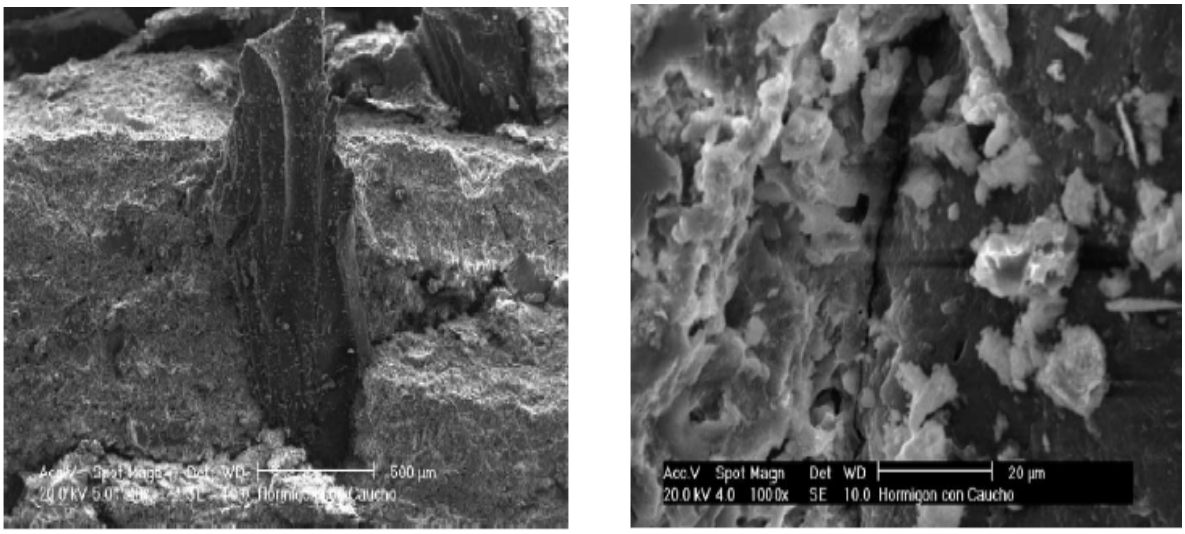
Çimento CEM I 42.5	20.6 kg
Su	8.414 litre
İri Agrega, 12/18 mm	63.164 kg
Kum, 3/6 mm	40.052 kg
İnce Agrega, 0/3 mm	11.06 kg
Süper Akışkanlaştırıcı	411 gr
Priz Geciktirici	60gr
Polipropilen	51.5 gr
Lastik (Kauçuk) (Hacimce %3.5)	2.051 kg

Atık lastikler kazaya uğramış kamyon lastiklerinden elde edilmiştir. Soyma yöntemi ile 0.85 ve 2.15 cm (ortalama 1.25 cm) uzunluğundaki lifler hazırlanmıştır. Yüzeyleri kesme yöntemi nedeniyle pürüzlü ve hasarlıdır. % 4 ince toz parçacıkları içerirler. Lastik liflerin yoğunlukları 0.84 gr/cm^3 ve % 6.5 ortam neminde su absorbsiyon katsayısı % 25'tir. Lifler maksimum ağırlığının % 0.05'i kadar demir içermektedirler. Liflerde yumuşama noktası sıcaklığı 175 C$^\circ$ ve tutuşma sıcaklığı 200 C$^\circ$ olarak saptanmıştır. Kırıntı kamyon lastiğinin diğer özellikleri Tablo 5.6'daki gibidir.

Tablo 5.6. Kırıntı kamyon lastiğinin özellikleri [22].

Elastisite Modülü	
%100	1.97 MPa
%300	10 MPa
%500	22.36 MPa
Gerilme Mukavemeti	28.1 MPa
Hasar Mukavemeti	% 590
Esneklik	
23 C$^\circ$	%44
75 C$^\circ$	%55

Yapılan mekanik testlerle birlikte eşzamanlı mikroskobik çalışma da yürütülmüştür. İlk mikro resimde lastik kauçuk ve çimento harcı arasında mükemmel bir aderans gözlenmiştir, ikinci resim ise çimento harcı ile lifler arasındaki yüzeyin detaylarını göstermektedir.



Şekil 5.7. Çimento harcı ile lastik kauçuk lifler arasındaki aderans [22].

Basınç, dolaylı çekme ve eğilme dayanımı testleri lif katkılı ve lif katkısız numunelerde 7. ve 28. günler sonunda tamamlanmıştır. Basınç ve dolaylı çekme testleri için 15 x 30 cm'lik silindir numuneler kullanılmıştır. Eğilme dayanımı testleri için 10x10x 40 cm ve standart 15x15x60 cm'lik iki numune kullanılmıştır. Kauçuk liflerin çatlak kontrol analizini araştırmak için standart dışı numuneler kullanılmıştır. Karışım oranları, hacimce %3.5, %5 lifli ve lifsiz olmak üzere üç değişik oranda hazırlanmıştır.

Periyodik bir basınç yükü uygulandığında kauçuk lif katkılı betonda bir gevşeme görülmektedir. Yük uygulandığında momente nazaran burkulma etkisinde bir gecikme meydana gelmektedir. Bu gecikme kısmen polimerik içyapının doğal bir sonucudur. Deneysel dinamik ölçümler, 15x30 cm'lik standart numunelerle, %3.5 ve %5 kamyon lastiği lifi içerikli numunelerle ve 7. ve 28. günlerde yapılmıştır. Her grup üç numuneden oluşmuştur.

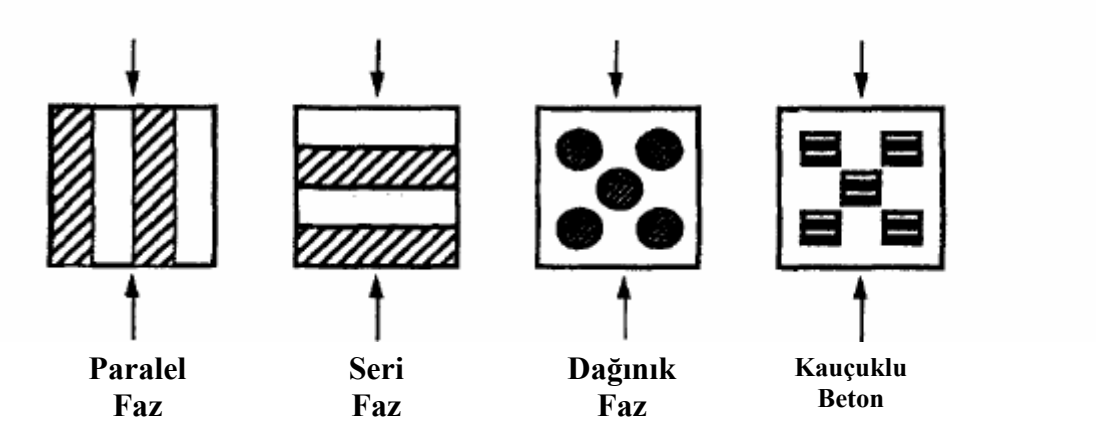
7 ve 28. günlerde lif takviyeli ve lifsiz standart numunelerde yapılan basınç, dolaylı çekme ve dört nokta eğilme mukavemeti sonuçları mantıklı bir dağılımda çıkmıştır. Genelde lif katkılı numuneler lifsiz numunelerden daha geniş bir dağılımda çıkmıştır. Bunun anlamı lif katkılı numuneler lifsiz numunelerden daha az güvenilir olmasıdır. Lif katkılı betonun yoğunluğunda ise bir düşüş vardır. Üç nokta statik eğilme mukavemeti deneyinde, elastisite modülünde veya maksimum eğilme mukavemetinde çok küçük bir azalma gözlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara işaret edilmiştir;

- Betona %5'den fazla lastik kauçuk katmak, betonun mekanik (maksimum gerilme, elastisite modülü) özelliklerine önemli bir etki yapmamaktadır.
- Statik ve dinamik deneyler sonucunda mekanik özelliklerde, zamanla bir artış ve lif içeriği veya sıcaklık etkisine bağlı olarak bir azalma gözlenmiştir.

İlker Bekir Topçu ve Nuri Avcular [23], yaptıkları çalışmalarında kompozit malzeme kurallarına göre lastik kauçuklu betonun bir analizini yapılmışlardır. Kauçuklu beton, normal C16 betona değişik oranlarda katılan atık otomobil lastiklerinden elde edilmiştir. Harç oluşumunda, agrega ve kauçuk üç farklı yüzeysel işleme tabi tutulmuştur. Elastik sabitin saptanmasında, deneysel sonuçların denklemlere kesinlikle uyduğu kompozit malzeme kuralları kullanılmıştır. Elastisite modülünü çözmek için bir denklem önerilmiş ve daha sonra önerilen bu denklemin doğruluğu incelenmiştir.

Kompozit malzeme kurallarına göre inceleme yaparken dikkat edilmesi gerekenlerden biri malzemenin yüzey özelliği ve oranlarıdır. Bu çalışmada birim hücre modeli uygulanmıştır.



Şekil 5.8. Birim hücre modeli [23].

Lastik kauçuklu beton, başlangıçta üç ayrı fazdaki malzemenin (harç, agrega, kauçuk) karışımı olarak kabul edilmiştir. Önce çeşitli agrega-kauçuk karışımları kullanılarak birkaç model (numune) üretilmiştir. Daha sonra her modelin fiziksel özellikleri birkaç deneyle hesap edilmiştir. Sonuçta her model için kendi fiziksel özelliklerine bağlı olarak formüller ortaya koyulmuştur. Nihai denklem aşağıdaki gibidir.

$$E_c' = k' E_m \frac{1 + 2V_{ar}\,\frac{\alpha - 1}{\alpha + 2}}{1 - V_{ar}\,\frac{\alpha - 1}{\alpha + 2}}, \quad \alpha = \frac{E_{ar}}{E_m} \qquad \text{..... (5.1)}$$

E = Elastisite Modülü,

V = Hacim,

c = Karışım,

m = Matris,

ar = Agrega – Kauçuk

Erhan Güneyisi ve arkadaşları [24], yapmış oldukları çalışmalarında, silika katkılı ve silika katkısız lastik kauçuklu betonun mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bir test programı izlemişlerdir. Bu çalışmada ince ve iri agrega yerine sırasıyla kırıntı lastikler ve lastik çipler kullanılmıştır. Agregalar, hacimce %2.5–20 oranında lastik kauçuk ile yer değiştirilmiştir. Silika füme çimento ağırlığının %5–20 si kadar eklenmiştir. Numuneler üzerinde, basınç, yarmada çekme mukavemeti ve elastisite deneyleri ASTM standartlarına göre yapılmıştır.

Kırıntı lastiğin gradasyonu ASTM C 136'ya göre ayarlanmıştır. Lastik çip gradasyonunun normal agrega ile benzer olduğu söylenemez çünkü çip uzunlukları 10–40 mm arasında değişmektedir. Su/Çimento oranı 0.40 ve 0.60 olan iki kontrol numunesi hazırlanmıştır. Silika füme içeriği çimento ağırlığının %5, %10, %15, %20'si olacak şekilde eklenmiştir. Çipler ve kırıntı lastikler ise agrega hacminin %2.5, %5, %10, %15, %25, %50'si olacak şekilde eklenmiştir. Her seride üç küp, üç silindir numune olmak üzere 70 seri numune hazırlanmıştır. Küp numuneler, 15 x 15 x 15 cm, silindir numuneler ise 15 x 30 cm olarak hazırlanmıştır.

Taze betonun özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM C 143 ve ASTM C 138'e göre slump ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş betonun özelliklerini belirlemek için, bütün numunelerde basınç, yarmada çekme mukavemeti ve elastisite modülü deneyleri 90 günlük süre sonunda yapılmıştır. Basınç testleri küp numuneler üzerinde ASTM C 39'a göre, yarmada çekme mukavemeti testleri ise silindir numuneler üzerinde ASTM C 496'ya göre yapılmıştır. Ayrıca elastisite modülü deneyleri silindir numuneler üzerinde ASTM C 496'ya göre yapılmıştır.

Başlangıçta su/çim oranı 0.60'tan 0.40'a indirildiğinde basınç mukavemeti 54 MPa dan 86 MPa ya yükselmiştir. Diğer sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Silika füme katkılı ve katkısız taze betonda, daha iyi bir işlenebilirlik ve daha hafif beton gözlenmiştir. Betona %50'ye kadar lastik kauçuk eklendiğinde birim ağırlıkta %77'ye varan bir azalma kaydedilmiştir.
- Lastik kauçuk miktarı arttırıldıkça basınç, yarmada çekme mukavemeti ve elastisite modülü değerlerinde sistematik bir azalma gözlenmiştir. Silika füme kullanıldığında ise mekanik özelliklerde belirgin bir artış gözlenmiştir.
- Mukavemetteki şiddetli azalmadan dolayı kauçuk içeriği agrega hacminin %25'ini geçmemelidir. %50 kauçuk kullanıldığında basınç mukavemetinde %86, yarmada çekme dayanımında %80 ve elastisite modülünde %83'ün üzerinde bir azalma meydana gelmiştir. Fakat %15 kauçuk kullanarak ve su/çim oranını 0.40'a çekerek yüksek mukavemetli (≥40 MPa) beton elde etmek mümkün olmaktadır.
- Ayrıca bu çalışmada ayrıca mekanik özelliklere bağlı olarak matematiksel bir model de hazırlanmıştır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. Numune Hazırlama

Bu çalışmada, hacimce %5, 10, 15 ve 20 oranlarındaki atık lastikler agrega ile yer değiştirilerek beton numuneler hazırlanmıştır. Agrega ile yer değiştirilmek üzere elde edilen atık taşıt lastikler, 0-4 ve 4-8 mm olmak üzere iki farklı elek aralığına ayrılmış ve karışım hazırlanırken 0-4 mm kum yerine 0-4 mm lastik kauçuk ve 4-8 mm agrega yerine de 4-8 mm lastik kauçuk belirtilen oranlarda yer değiştirilmiştir. Hazırlanan beton numuneler 100 mm küp ve 100x100x500 mm prizma kalıplara tekniğine uygun bir şekilde yerleştirilmiştir. 100 mm küp numuneler atık lastik katkılı betonun basınç dayanımı, birim ağırlık, ultrases hızı, SEM ve EDX analizlerinde, 100x100x500 mm prizma numuneler eğilme dayanımlarının belirlenmesinde ve eğilme deneyi sonunda çıkan parçalar ise dolaylı çekme deneylerinde kullanılmıştır.

6.1.1. Üretilen Beton Serilerin Kodlanması

Üretilen beton seriler lastik agrega boyutu ve karışım oranlarına göre şöyle kodlanmıştır.

K = Lastik agrega içermeyen kontrol numunesi.
İLB-5 = İçerisinde hacimce %5 oranında 0-4 mm lastik agrega bulunan beton numunesi.
İLB-10 = İçerisinde hacimce %10 oranında 0-4 mm lastik agrega bulunan beton numunesi.
İLB-15 = İçerisinde hacimce %15 oranında 0-4 mm lastik agrega bulunan beton numunesi.
İLB-20 = İçerisinde hacimce %20 oranında 0-4 mm lastik agrega bulunan beton numunesi.
KLB-5 = İçerisinde hacimce %5 oranında 4-8 mm lastik agrega bulunan beton numunesi.
KLB-10 = İçerisinde hacimce %10 oranında 4-8 mm lastik agrega bulunan beton numunesi.
KLB-15 = İçerisinde hacimce %15 oranında 4-8 mm lastik agrega bulunan beton numunesi.
KLB-20 = İçerisinde hacimce %20 oranında 4-8 mm lastik agrega bulunan beton numunesi.

6.1.2. Karışım Hesabı

Hazırlanacak numunelerin karışım oranları TS 802'ye uygun olarak hazırlanmıştır [25]. Karışım oranları hazırlanırken maksimum agrega çapı 8 mm ve Su/Çimento oranı (0.55) sabit alınmıştır. Beton içerisine toplam agreganın hacmine göre %5, 10, 15 ve 20 oranlarında sırasıyla ince ve iri agrega ile yer değiştirilecek şekilde hazırlanan karışım oranları Tablo 6.1'de verilmektedir.

Tablo 6.1. Beton karışım oranları (1 dm^3)

Lastik Oranı (%)	**Kontrol**		**5**		**10**		**15**		**20**	
Bileşen	**Hacim (cm^3)**	**Ağırlık (gr)**	**Hacim (cm^3)**	**Ağırlık (gr)**	**Hacim (cm^3)**	**Ağırlık (gr)**	**Hacim (cm^3)**	**Ağırlık (gr)**	**Hacim (cm^3)**	**Ağırlık (gr)**
Su	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
Çimento	138.4	418	138.4	418	138.4	418	138.4	418	138.4	418
Lastik 0-4 mm	0.0	0.0	29.8	28.35	59.7	56.71	89.5	85.06	119.4	113.41
Agrega 0-4 mm	387.9	993.0	358.1	916.62	328.2	840.22	298.4	763.81	268.5	687.41
Agrega 0-8 mm	209.0	535.0	209.0	535.04	209.0	535.04	209.0	535.04	209.0	535.04
Hava	35	-	35	-	35	-	35	-	35	-
Toplam	1000	2176.1	1000	2128.0	1000	2080.0	1000	2031.9	1000	1983.9
Teorik Br. Ağ. (gr/cm^3)	2.18		2.13		2.08		2.03		1.98	
Su	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
Çimento	138.4	418	138.4	418	138.4	418	138.4	418	138.4	418
Lastik 4-8 mm	0.0	0.0	29.8	27.2	59.7	54.3	89.5	81.5	119.4	108.6
Agrega 0-4 mm	387.9	993.0	387.9	993.0	387.9	993.0	387.9	993.0	387.9	993.0
Agrega 0-8 mm	209.0	535.0	179.2	458.6	149.3	382.2	119.5	305.8	89.6	229.4
Hava	35	-	35	-	35	-	35	-	35	-
Toplam	1000	2254.1	1000	2204.8	1000	2155.6	1000	2106.3	1000	2057.1
Teorik Br. Ağ. (gr/cm^3)	2.25		2.20		2.15		2.11		2.06	

6.2. Malzemeler

6.2.1. Numune Kalıpları

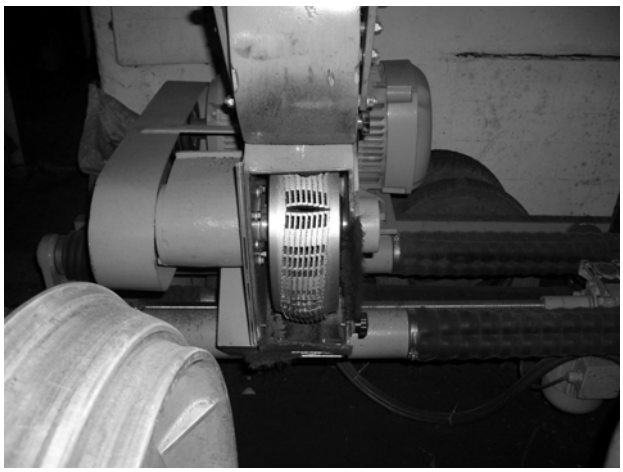
Basınç dayanımı, birim ağırlık, ultrases hızı, SEM ve EDX analizleri için hazırlanacak beton numunelerin hazırlanmasında 100 mm küp kalıplar kullanılmıştır. Eğilme ve yarma çekme dayanımı için hazırlanacak numuneler için ise 100x100x500 mm prizma kalıplar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan bu kalıplar Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan kalıplar

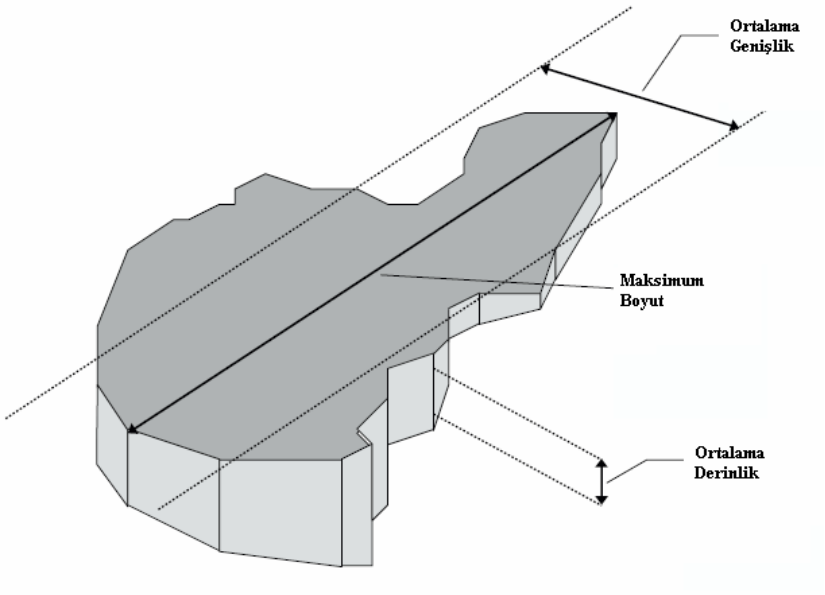
6.2.2. Atık Taşıt Lastiği

Bu çalışmada kullanılan atık taşıt lastikler, lastik kaplama işlemi sırasında ortaya çıkan atık lastiklerden seçilmiştir. Kaplama işlemi için hazırlanan kullanılmış lastiklerin temas yüzeyleri Şekil 6.2'de gösterilen aletler yardımıyla kesilerek elde edilmiştir. Elde edilen lastikler beton içerisinde kullanmak üzere elemek suretiyle iki dane dağılımına ayrılmıştır. Lastikler 0-4 mm elekten geçecek şekilde ve 4-8 mm elekten geçecek şekilde olmak üzere iki ayrı gruba ayrılmıştır. 0-4 mm arasındaki lastikler ince lastik agrega, 4-8 mm arasındaki lastikler iri lastik agrega olarak adlandırılmıştır.

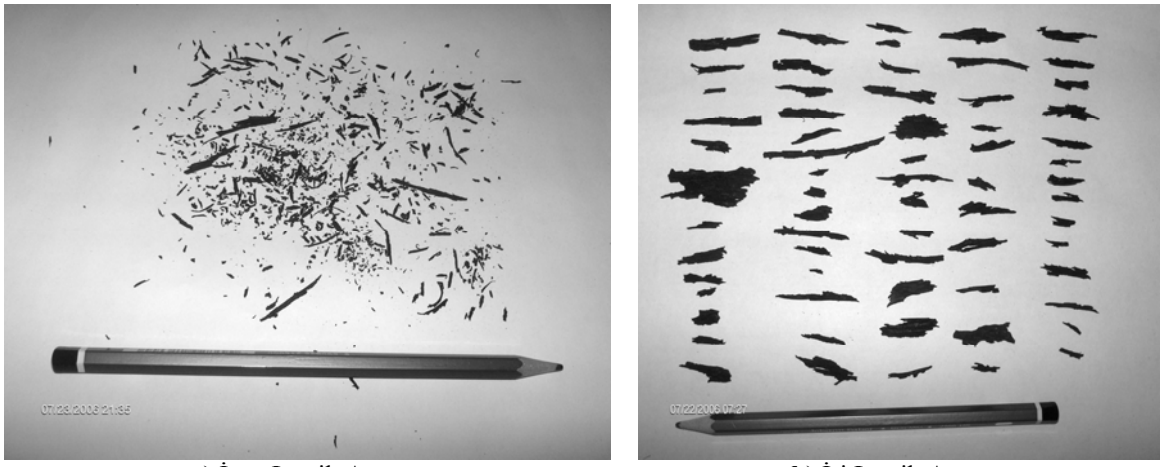


Şekil 6.2. Atık lastiklerin elde edildiği kesme makinesi

Deneylerde kullanılan atık lastikler Şekil 6.3'deki gibidir. Lastiğin maksimum genişliği elekten geçen kısımdır. Bazı lastikler çok uzun olmaları nedeniyle elek analizi için uygun değildirler.



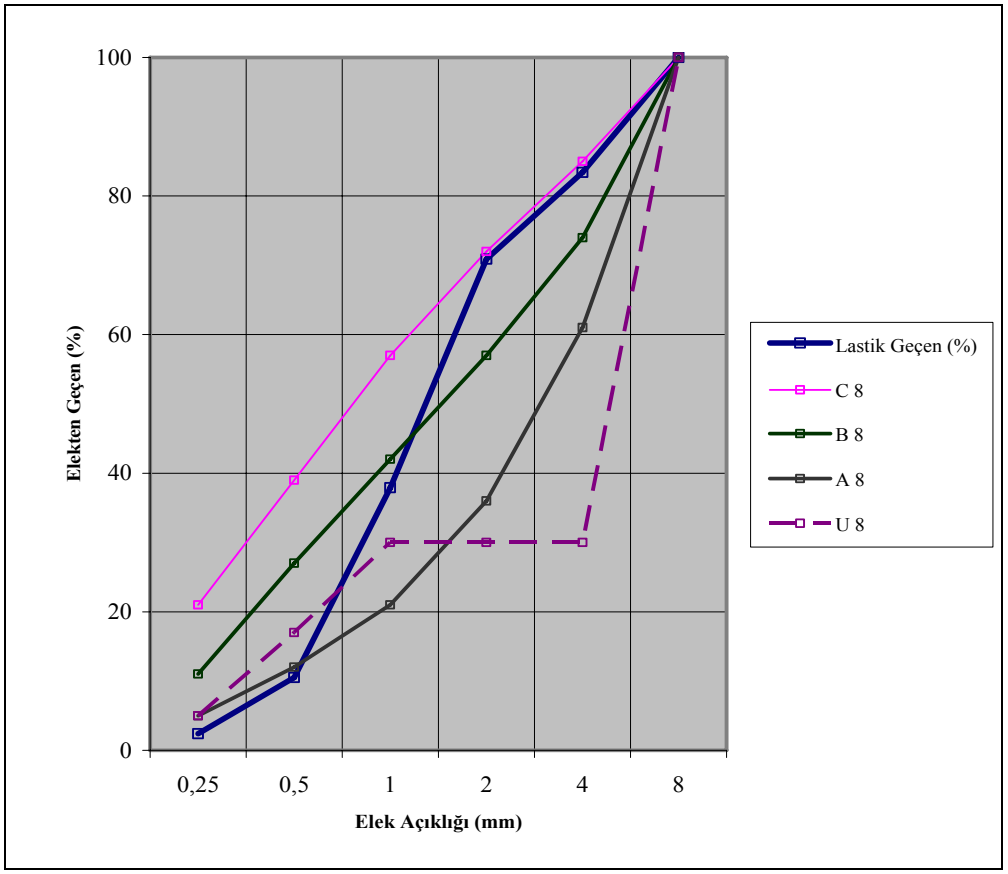
Şekil 6.3. Atık lastiğin dane-boyut analizi [26].



a) İnce Lastik Agrega **b)** İri Lastik Agrega

Şekil 6.4. Deneylerde kullanılan atık lastikler

Deneysel çalışmalarda kullanılan kullanılmış lastik agregalar Şekil 6.4'de görüldüğü gibi iri ve ince olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. İri lastik agregaların ortalama boyları ve ortalama genişlikleri bir kumpas yardımıyla yüz adet numune üzerinde ölçüm alınarak ölçülmüştür. Yüz adet numune üzerinde yapılan ölçümler neticesinde, bu çalışmada kullanılan iri lastik agregaların boyları 10 ile 45 mm arasında ve ortalama 21.75 mm, çapları ise 1.50 ile 13 mm arasında ve ortalama 3.63 mm olarak belirlenmiştir. İnce lastik agregalar boy ve çap ölçümleri için uygun değildirler. Bu çalışmada kullanılan lastik agreganın elek analizi deneyi yapılmıştır. Kullanılan lastik agregaya ait granülometri eğrisi Şekil 6.5'de verilmiştir.



Şekil 6.5. Lastik agregaya ait granülometri eğrisi

Deneylerde kullanılan lastiklerin özgül ağırlık tayinleri yapılırken, lastikler su üzerinde yüzdükleri için aşağıdaki yöntemle özgül ağırlık tayinleri yapılmıştır.

Hacmi belli (V_k) bir kabın darası alındıktan sonra içerisine tamamen dolacak şekilde lastikler sıkıştırmadan yerleştirilip tartılarak lastiklerin ağırlıkları bulunmuştur (W_1). Daha sonra tekrar darası alınan lastikle dolu kap içerisine su ilave edilmiştir. Kap içerisine giren suyun lastikleri taşırmaması için kabın üzerine elek yerleştirilmiştir. Kap tamamen su ile dolunca tekrar ağırlık ölçülerek su ağırlığı ve hacmi belirlenmiştir (W_2 ve V_s) kabın alabileceği su hacmindeki azalma lastiklerin hacmi olarak kabul edilerek aşağıdaki formüle göre lastiklerin özgül ağırlıkları tayin edilmiştir.

$$\text{Özgül Ağırlık} = \frac{W_1}{V_k - V_s} \quad (\frac{gr}{cm^3}) \qquad \text{..... (6.1)}$$

Yukarıda anlatıldığı şekilde yapılan özgül ağırlık deneyi sonucunda, ince lastik agregaların özgül ağırlığı 0.95 gr/cm^3 ve iri lastik agregaların özgül ağırlığı ise 0.91 gr/cm^3 olarak tayin edilmiştir.

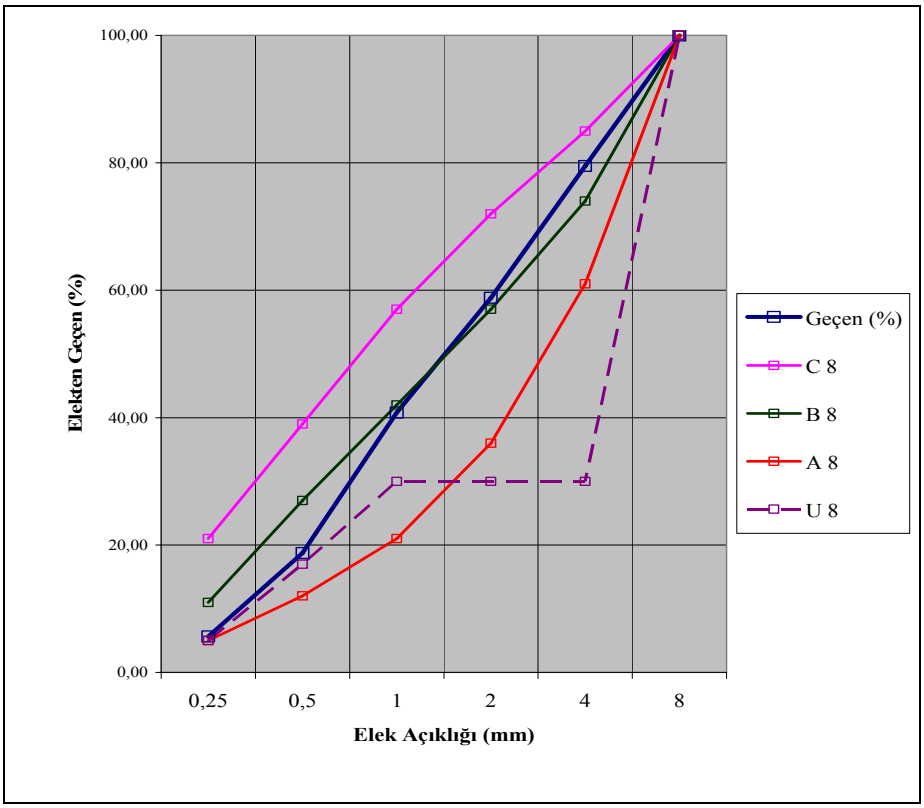
Ayrıca bu çalışmada kullanılan lastik agregaların gevşek ve sıkışık birim ağırlıkları da tayin edilmiştir. Kullanılan iri lastik agregaların gevşek ve sıkışık birim ağırlıkları sırasıyla 0.36 ve 0.46 gr/cm^3, ince lastik agregaların gevşek ve sıkışık birim ağırlıkları ise sırasıyla 0.38 ve 0.47 gr/cm^3 olarak belirlenmiştir.

6.2.3. Agrega

Bu çalışmada maksimum dane çapı 8 mm olan Elazığ-Palu kumu kullanılmıştır. Kullanılan kumun birim ağırlığı 2.65 gr/cm^3 ve su emmesi %1'dir. Bu agregaya ait elek analizi sonuçları ve granülometri eğrisi sırasıyla Tablo 6.2'de ve Şekil 6.6'da verilmektedir.

Tablo 6.2. Deneylerde kullanılan kuma ait elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	Elek Üzerinde Kalan (gr)	Kümülâtif Kalan (gr)	Kalan (%)	Geçen (%)
8	0	0	0	100
4	205	205	20.50	79.50
2	207	412	41.20	58.80
1	180	592	59.20	40.80
0.5	220.5	812.5	81.25	18.75
0.25	131	943.5	94.35	5.65
Kap	56.5	1000	100	-



Şekil 6.6. Deneylerde kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi

6.2.4. Çimento

Bu çalışma kapsamında bütün deneylerde Elazığ Altınova Çimento Fabrikası AŞ.'nin ürettiği PÇ 42.5 Portland Çimentosu (CEM I 42.5) kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal analizler firma tarafından yapılmış olup analiz sonuçları Tablo 6.3'de verilmektedir.

Tablo 6.3. Deneylerde kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler

Çimentonun kimyasal özellikleri	
Bileşenler	**Bileşen miktarları (%)**
Silisyum dioksit (SiO_2)	20.4
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	5.61
Demir oksit (Fe_2O_3)	3.27
Kalsiyum oksit (CaO)	63.01
Mağnezyum oksit (MgO)	2.49
Kükürt trioksit (SO_3)	2.26
Klorür (Cl)	0.006
Kızdırma kaybı (K.K.)	1.64
Tayin edilemeyen (T.E.)	1.68
Çimentonun fiziksel özellikleri	
Özgül ağırlık, (gr/cm^3)	3.02
Özgül yüzey, (cm^2/gr.Blaine)	3470
Hacim genleşmesi, (mm)	7
Priz başlama süresi, (h/dk.)	03:10
Priz sonu, (h/dk.)	04:15
Çimentonun mekanik özellikleri	
2. gün mukavemet, (N/mm^2)	24.2
7. gün mukavemet, (N/mm^2)	43.5
28.gün mukavemet, (N/mm^2)	54.5

6.2.5. Su

Betonda karışım suyunun iki önemli işlevi vardır. Bunlardan birincisi, çimentonun kimyasal reaksiyonunu sağlaması ve çimentonun hidratasyonunu tamamlayarak mukavemet kazandırmasıdır. İkincisi ise agrega ile çimento hamurunun birbirine yapışması, betonun boşluksuz olarak yerleştirilip sıkıştırılması için gerekliliğidir [5]. Bu çalışma kapsamında hazırlanan bütün beton numunelerde karma ve temas suyu olarak Fırat Üniversitesi şebeke suyu kullanılmıştır.

6.3. Deney Yöntemi

6.3.1. Taze Beton Deneyleri

6.3.1.1. Çökme Deneyi

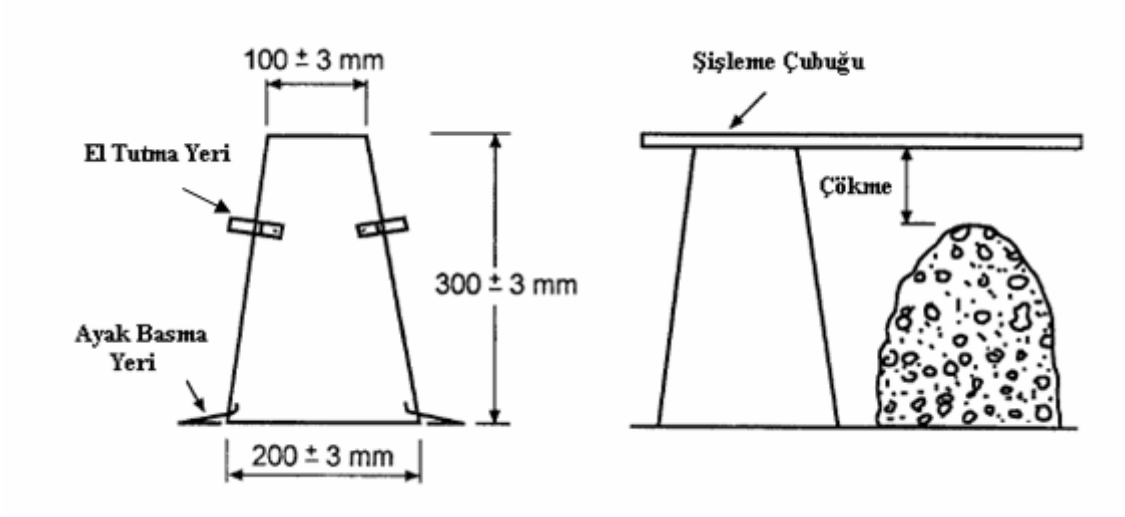
Atık otomobil lastiği ilaveli betonun kıvamı hakkında bilgi edinebilmek amacıyla kıvam deneyleri TS EN 12350-2'ye göre yapılmıştır.

Türk standardına göre, çökme deneyi için Şekil 6.7'de gösterildiği gibi metalden yapılmış, alt ve üst uçları açık olan kesik koni şeklindeki bir huni ve huninin içerisine yerleştirilecek betonu şişlemek için, ucu yuvarlanmış bir çelik çubuk kullanılmaktadır.

Çökme hunisinin tabanının çapı 20 cm, üst yüzünün çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm'dir. Betonu şişlemek için kullanılan çelik çubuğun boyu 60 cm, çapı 1.6 cm'dir. Huninin dış yüzeyinde karşılıklı yerleştirilmiş iki adet kulp ile alt ucuna yakın kısımda huniye dış yüzeyden bağlantılı karşılıklı iki adet metal çıkıntı bulunmaktadır. Bu metal çıkıntılar, huninin içerisine beton doldurulurken huninin yere tamamen yapışmasını ve böylece alttan herhangi bir sızıntı olmamasını sağlamak üzere, ayakla basmak için konulmuştur.

Deney başlamadan önce huninin içi nemli bir bezle silinmekte ve huni, düz ve su emmez bir yüzey üzerine yerleştirilmektedir.

Hazırlanan taze beton, mala yardımıyla huninin içerisini dolduracak beton hacminin yaklaşık üçte bir bölümleri halinde, yani üç tabaka halinde (yaklaşık 7, 16 ve 30 cm) yerleştirilmektedir. Her tabaka, şişleme çubuğuyla ayrı ayrı 25'er kez şişlenmektedir. En üst tabakanın şişlenmesi işlemi bittikten sonra kalıbın üstü mala veya şişleme çubuğu ile tesviye edilmektedir. Bütün bu işlemlerden hemen sonra, huni yandaki saplarından tutularak yavaşça düşey bir şekilde yukarı çekilmektedir. Kalıbından kurtulan beton, sululuk derecesine bağlı olarak, az veya çok miktarda bir çökme göstermektedir. Boş huni hemen çökme yapan beton yığının yanına konularak ve şişleme çubuğu huninin üzerine yatay olarak yerleştirilerek, çubuğun alt seviyesi ile çökme yapmış olan betonun üst yüzünün ortalama yüksekliği arasındaki mesafe, en yakın 0.5 cm'ye kadar, cetvelle ölçülmektedir. Ölçülen değer, betonun çökme değeri olarak ifade edilmektedir [27].



Şekil 6.7. Çökme hunisinin şematik şekli ve ölçüleri

6.3.1.2. Taze Betonda Birim Ağırlık Deneyi

Bu deney sıkıştırılmış taze betonun birim ağırlığını belirlemek ve sertleşmiş betonun birim ağırlığı hakkında tahminde bulunmak amacıyla TS EN 12350-6'ya göre aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

Hacmi bilinen bir kap içerisine, taze beton, iki tabaka halinde sıkıştırma çubuğu yardımıyla her tabakaya 25 defa vurularak sıkıştırılır. Sıkıştırma sonrasında, sıkışmış hava ceplerinin tahliyesi sağlanacak şekilde, beton yüzeyinde büyük hava kabarcıkları çıkışı duruncaya kadar kabın dış kenarına tokmak ile hafifçe vurulur. Kabın yüzeyi tesviye edilerek kap içindeki betonun kütlesi belirlenir ve Formül 6.2 yardımıyla taze betonun birim hacim ağırlığı tayin edilir [28].

$$\text{Birim Ağırlık} = \frac{\text{Betonun Ağırlığı}}{\text{Kabin İç Hacmi}} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \quad \text{..... (6.2)}$$

6.3.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

6.3.2.1. Sertleşmiş Betonun Yoğunluğu

Bu çalışmada sertleşmiş betonun yoğunluğu belirlenirken, kür tankından çıkarılan numuneler bir gün 20 ^{0}C sabit sıcaklıkta beklendikten sonra deneye başlanmıştır. Ayrıca

numunelerin hacmi su ile yer değiştirme metoduyla belirlenmiştir. Sertleşmiş betonun yoğunluğu TS EN 12390-7'ye göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Bir gün süreyle laboratuar şartlarında bekletilmiş deney numunesi su içerisindeki kefe yardımıyla Şekil 6.8'deki gibi tartılarak su içerisindeki ağırlık tayin edilir. Daha sonra yüzeyi kurulanan numunenin havadaki hacmi belirlendikten sonra Formül 6.3 ve 6.4 yardımıyla önce numunenin hacmi ve daha sonra da yoğunluğu tayin edilir [29].

$$V = \frac{M_{Hava} \quad M_{Su}}{\delta_{Su}} (m^3) \quad \text{..... (6.3)}$$

Burada;

V = Numunenin Hacmi (m^3),

M_{Hava} = Numunenin Havadaki Kütlesi (kg),

M_{Su} = Numunenin Su İçerisindeki Görünür Kütlesi (kg),

γ_{Su} = Suyun 20 ^{0}C sıcaklıktaki yoğunluğu.

$$Yo\bar{g}unluk = \frac{Numunenin\,Kütlesi}{Numunenin\,Hacmi} \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad \text{..... (6.4)}$$



Şekil 6.8. Su ile yerdeğiştirme metodu [29].

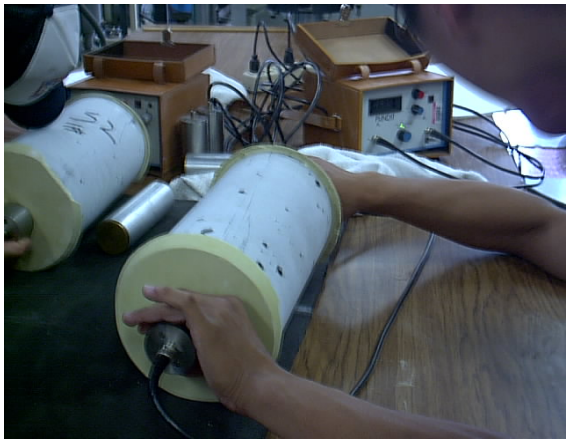
6.3.2.2. Sertleşmiş Betonda Ultrases Hızı İle Ölçüm

Ultrasonik test cihazının kullanılmasıyla herhangi bir beton bloğun bir yüzüne ultrasonik sinyal (nabız atışı gibi ritmik sesüstü vuruşlar) uygulanarak betonun içerisinde basınç dalgaları yaratılmaktadır. Ultrasonik test cihazı, sesüstü dalganın, betona gönderildiği yüzey ile geri alındığı yüzey arasındaki bir mesafeyi ne kadar zaman süresinde geçtiğini ölçmektedir.

Ultrasonik cihazın kullanılmasıyla, betonun içerisine gönderilen sesüstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğerine geçme süresi ölçülmekte ve dalga hızı hesaplanmaktadır. Hesaplanan sesüstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özelikleri arasındaki ilişki yaklaşık olarak elde edilmektedir.

Ultrasonik test cihazı ile ölçüm yapabilmek için belirli boyutlarda numunelerin kullanılması şart değildir. Ultrasonik test cihazı ile yapıdaki betonun basınç dayanımı, elastisite modülünün, yoğunluğunun ve çatlakların varlığının belirlenmesinde kullanılabilir.
Ultrasonik test yönteminin uygulanması durumunda, ölçüm yapılan betonda çatlama veya kırılma oluşmamaktadır.

Ultrasonik test cihazı, sesüstü dalgaların, dalga gönderici ve alıcı başlıklar arasındaki bir mesafeyi ne kadar zamanda geçtiğini mikro saniye birimiyle otomatik olarak belirlemekte ve cihazın üzerindeki ekranda göstermektedir.



Şekil 6.9. Ultrasonik test cihazı [30].

Katı bir malzemenin içerisinden geçen sesüstü dalgalarının hızı (V), sesüstü dalganın içerisinden geçtiği malzemenin elastisite modülü (E) ve malzemenin yoğunluğu (D) ile ilgilidir.

Beton bloğun bir yüzeyinden içeriye gönderilen sesüstü dalganın, bloktaki diğer bir yüzeye ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı Formül 6.5'deki gibi hesaplanmaktadır [30].

$$V = \frac{S}{t} x10^{6} \ (\frac{km}{s}) \quad \text{..... (6.5)}$$

Burada,

V = Sesüstü dalga hızı (km/s),

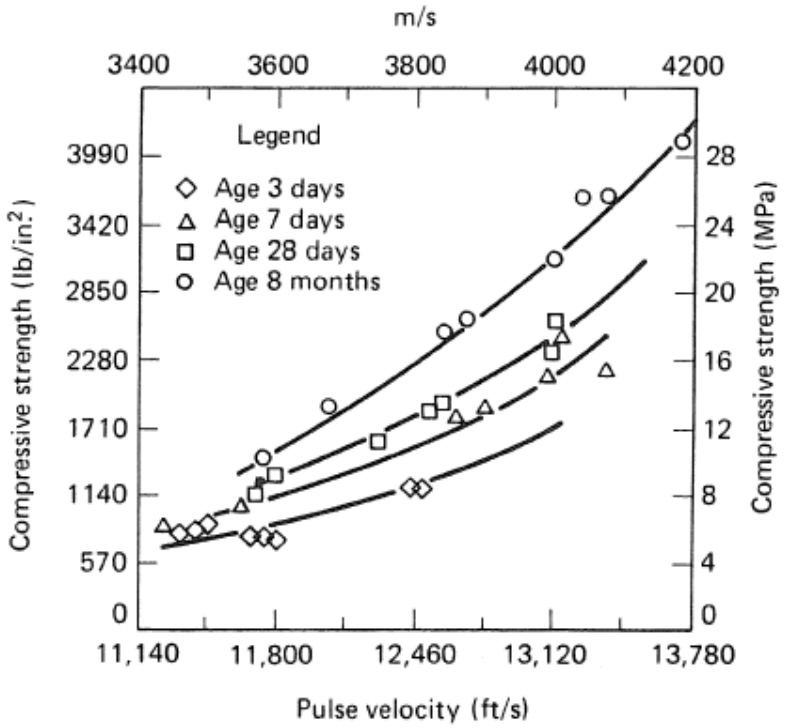
S = Sesüstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (m),

t = Sesüstü dalganın gönderildiği yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman (μs).

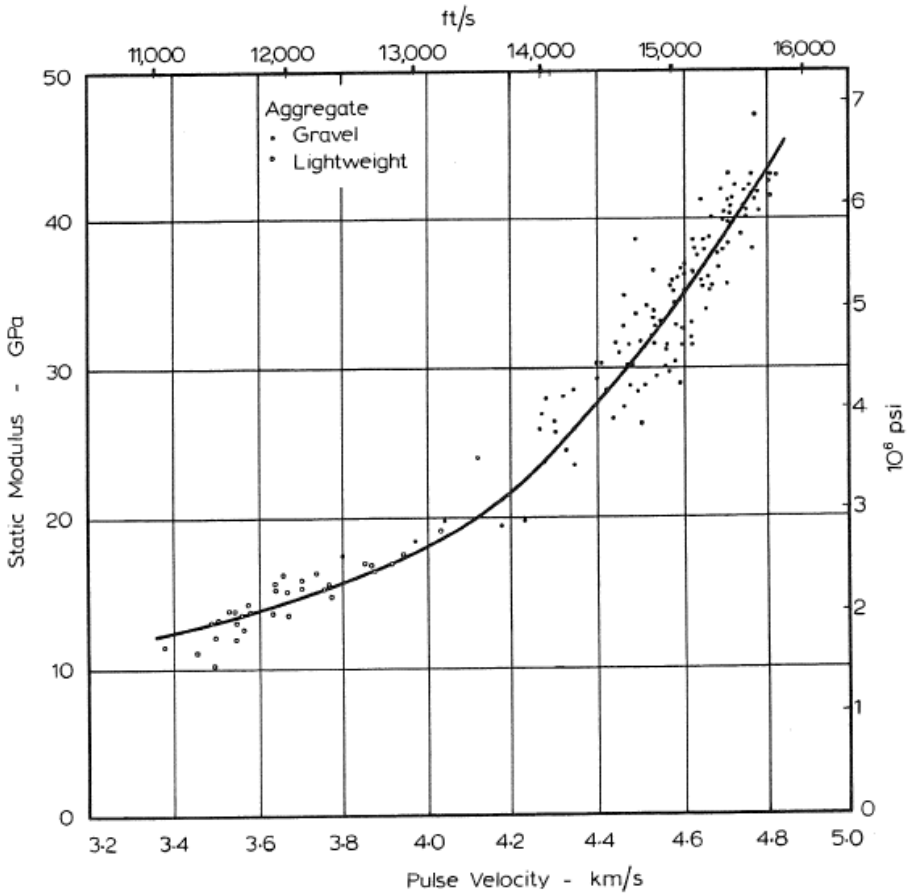
Elde edilen ses hızı değerleri yardımıyla Tablo 6.4 yardımıyla betonun kalitesi tahmin edilebilir.

Tablo 6.4. Ses Hızı ile Betonun Kalitesinin Tahmin Edilmesi [30].

Ses Hızı (km/s)	**Beton Kalitesi**
> 4.5	Mükemmel
3.5-4.5	İyi
3.0-3.5	Şüpheli
2.0-3.0	Zayıf
< 2.0	Çok Zayıf



Şekil 6.10. Ultrasonik ses hızı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki [31].



Şekil 6.11. Ultrasonik ses hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki [32].

6.3.2.3. Sertleşmiş Betonun Basınç Dayanımı

Beton üzerinde yapılan araştırmalarda, malzemenin muhtelif özellikleri ve basınç dayanımı arasında ilişkiler aranmış ve bu araştırmalar sonucunda betonun çeşitli özelliklerinin, basınç mukavemeti ile aynı yönde değiştiği görülmüştür. Bu ilişkiden dolayı betonun basınç dayanımı, betonun kalite ölçütü olarak kullanılmaktadır.

Betonun en önemli mekanik özelliğinden birisi basınç dayanımıdır. Beton mukavemet değerleri arasında en yüksek olanı basınç, en düşük olanı çekmedir. Pratikte betonun çekme gerilmesinin hiç olmadığı, hemen çatladığı varsayılır. Bundan dolayı beton sadece basınca çalıştırılır.

Betonun basınç dayanımı, betonun diğer nitelikleriyle paralellik gösterir. Yüksek basınç dayanımlı bir betonun, kompasitesi yüksek, su geçirgenliği çok az, dış etkilere dayanıklı ve aşınması az olur.

Pratik yönden dayanım 3, 7, 28 ve 90. günlerde tayin edilebilir. Basınç dayanımı zamana bağlı olarak artar ve genel olarak, standart bir beton numunesinin basınç dayanımının

28 günlük değeri %100 kabul edilir. Beton, yaşlandıkça mukavemet değeri artar ve bu artış 28 güne kadar hızlı, bundan sonra yavaş devam eder.

Betonların 7 ve 28 günlük basınç mukavemetleri arasındaki bağıntıya bakıldığında mukavemetin 2/3'ü kadar bir mukavemet kazandığı görülür. Betonun 7 günlük basınç mukavemeti, imalatçıya genel olarak kalitesi hakkında fikir vermektedir. Betonun basınç dayanımının bilinmesi diğer bazı mekanik özelliklerinin tahmin edilmesine yardımcı olur.

Temel bir yapı malzemesi olan beton, doğası bakımından diğer yapı malzemelerinden ayrılır. Beton özelliklerinin, tıpkı yaşayan sistemlerde olduğu gibi zamanla gelişme gösterdiği saptanmıştır. Betonun bir bütün olarak doğası, bileşenlerinin özelliklerinin tek tek süperpozisyonu ile elde edilemez. Beton davranışlarının önemli bir bölümü, bu bileşenlerin arasındaki etkileşimler sonucu ortaya çıkar. Beton, kompozit bir yapı malzemesidir. Betonun taşıyıcılığının en belirgin ölçütü de basınç dayanımıdır. Genellikle betonun kalitesi, dayanımıyla temsil edilmektedir [5].

Bu çalışmada betonun basınç dayanımı tayin edilirken TS 3114 standartlarına uyulmuştur. 27. günün sonunda kürden çıkarılan 100 mm küp numuneler bir gün süreyle 20 ^{0}C derecedeki laboratuar ortamında kurumaya bekletilmiştir. Daha sonra sırasıyla ses hızı ölçümü ve birim ağırlık tayininden sonra numunelerin yüzeyleri kurutularak deneye hazır hale getirilmiştir.

TS 3114 esasına göre beton karışımlarına kuvvet uygulanması, basınç presi aletinin tablaları arasına yerleştirildikten ve tablaların numunenin alt ve üst yüzüne iyi bir şekilde oturması sağlandıktan sonra başlanmıştır. Bu şartlar altında yürütülen deneyde, basınç presi makinesi, beton numunesinin taşıyabileceği maksimum kuvvete ulaştığı anda yüklemeye otomatik olarak son vermiştir. Maksimum kırılma yüklerine göre değişik oranlarındaki lastik kauçukla hazırlanmış küp numunelerin basınç dayanımları Formül 6.6 yardımıyla hesaplanmıştır [33].

$$\sigma = \frac{P}{A} \left(\frac{N}{mm^2}\right) \quad \text{..... (6.6)}$$

Burada;

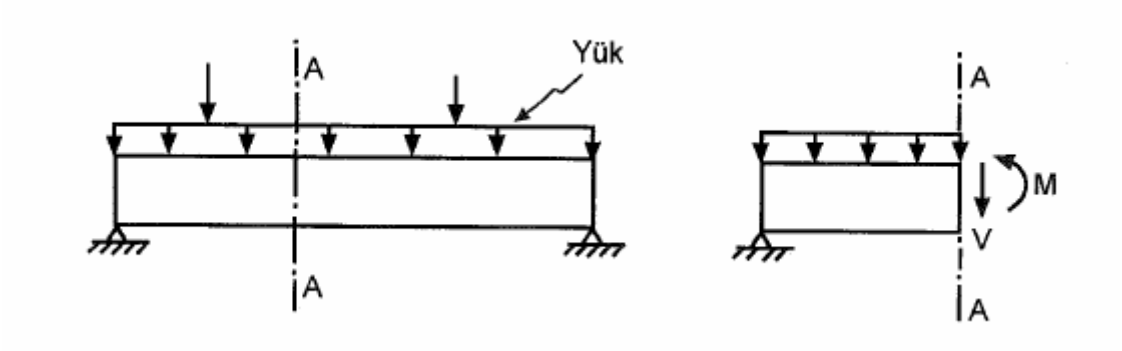
σ = Maksimum basınç gerilmesi (N/mm^2),

P = Numunenin kırıldığı maksimum yük miktarı (N),

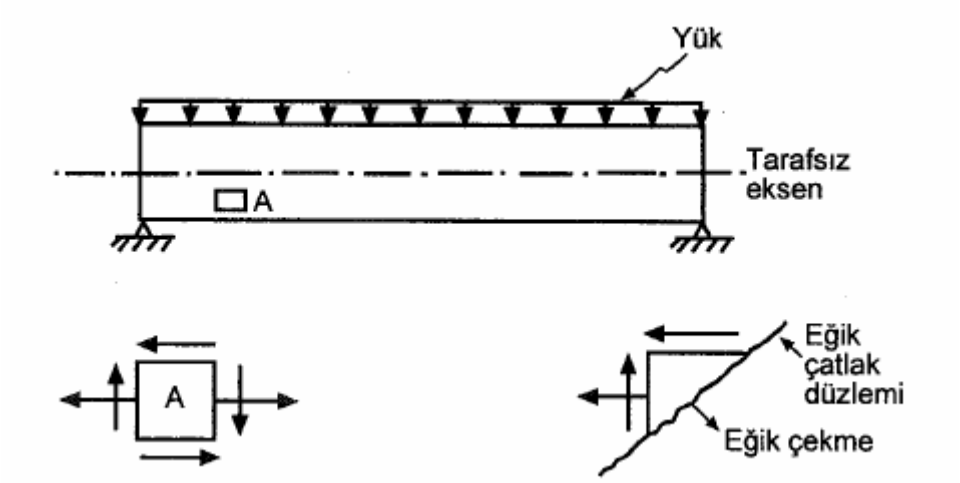
A = Numunenin kesit alanı (mm^2).

6.3.2.4. Sertleşmiş Betonun Eğilme Dayanımı

Betonun çekme dayanımı, betonda çekme etkisi yaratacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Genellikle, yapıdaki betona doğrudan çekme kuvveti uygulanmaktadır. Ancak, beton elemanların üzerlerine gelen basınç veya eğilme kuvvetleri betonun içerisinde dolayı olarak çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır [34].

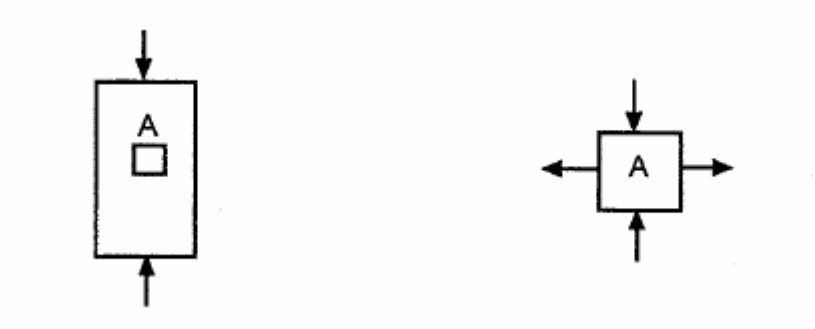


Şekil 6.12. Basit kirişteki kayma kuvveti ve eğilme momenti [34].



Şekil 6.13. Basit bir kirişte A elemanı üzerinde çekme ve eğik çekme kuvvetleri [34].

Şekil 6.12'den de görülebileceği gibi, basit bir kirişin üzerindeki eğilme yükleri, kiriş kesitinde kesme kuvvet ve eğilme momenti yaratmaktadır. Eğilme momenti, kirişteki tarafsız eksenin üstünde kalan bölgede basınç gerilmesi, altında kalan bölgede ise çekme gerilmesi meydana getirmektedir. Yani, Şekil 6.13'de gösterildiği gibi, tarafsız eksenin altındaki bölgede bulunan küçük bir A elemanının üzerinde hem çekme hem de kayma gerilmeleri bulunmaktadır. Kayma gerilmelerine diyagonal olan düzleme (eğik düzleme) dik olarak eğik çekme kuvveti oluşmaktadır.



Şekil 6.14. Basınç yükü nedeniyle oluşan çekme kuvveti [34].

Şekil 6.14'den görülebileceği gibi, betonun üzerine basınç yükü uygulanması durumunda da, betonun içerisinde dolaylı olarak çekme kuvvetleri oluşmaktadır. Betonda oluşan çekme kuvvetleri, betonun çatlamasına ve kırılmasına yol açan en önemli neden olarak kabul edilmektedirler.

Betonun çekme dayanımı, üç değişik deney yöntemiyle bulunabilmektedir. Bunlar;

- Doğrudan çekme dayanımı, çekme yüklerinin doğrudan yüklenmesi ile çekme dayanımının elde edildiği yöntem,
- Yarmada çekme dayanımı, çekme yüklerinin dolaylı olarak yüklenmesi ile çekme dayanımının elde edildiği yöntem,
- Eğilmede çekme dayanımı, beton kirişlere eğilme yüklerinin uygulanması ile eğilme dayanımının ve böylece çekme dayanımının elde edildiği yöntem.

Bu çalışmada betonun eğilme dayanımını elde edebilmek için TS EN 12390-5'e göre orta noktasından yüklenmiş basit kiriş metodu kullanılmıştır. 100x100x500 mm prizma beton numuneleri 27. günün sonunda kür tankından çıkarıldıktan sonra bir gün süreyle laboratuar şartlarında kurumaya bırakılmış ve orta noktasından kırılıncaya kadar yüklenerek eğilme mukavemetleri Formül 6.7 yardımıyla hesaplanmıştır [35].

$$\sigma_e = \frac{3PL}{2bd^2}\left(\frac{N}{mm^2}\right) \quad \text{..... (6.7)}$$

Burada;

σ_e = Eğilmede çekme dayanımı (N/mm^2),

P = Maksimum kırılma yükü (N),

L = Serbest açıklık (mm),

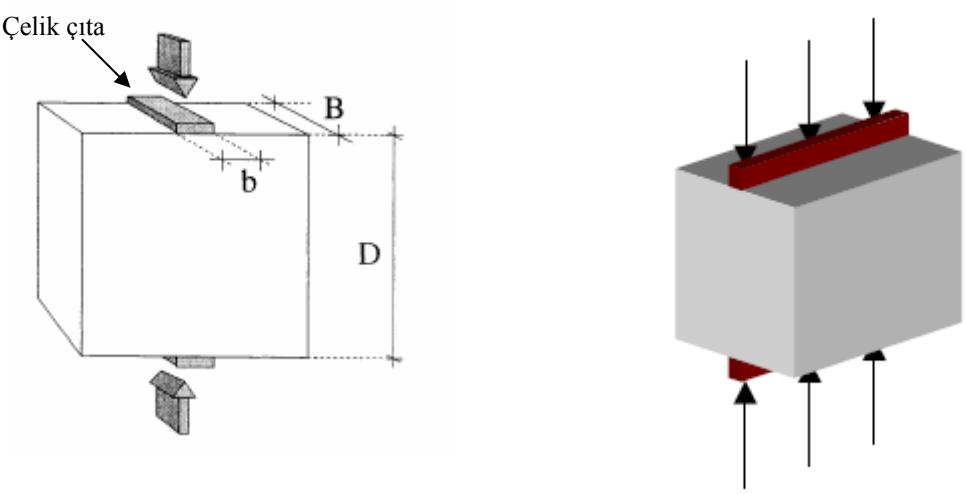
b = Kırılma kesitinin ortalama genişliği (mm) ve

d = Kırılma kesitinin ortalama yükseklik (mm).

6.3.2.5. Sertleşmiş Betonun Dolaylı Çekme Dayanımı

Basınç yükü uygulanarak beton numunelerin dolaylı çekme etkisi altındaki dayanımlarının ölçüldüğü bu yöntemin uygulanması sonucunda beton numuneler yarılarak iki ayrı parçaya ayrıldığı için genellikle yarma deneyi olarak adlandırılmaktadır. Dolaylı çekme dayanımı tayin edilirken hem silindir hem de küp numuneler kullanılabilmektedir [36].

Bu çalışmada, eğilme deneyi sonrasında çıkan parçalar alınarak Şekil 6.13'deki gibi dolaylı çekme deneyi için hazır hale getirilmiştir. Şekil 6.15'de görülen şerit çıtalar 1 mm kesite sahip 100 mm uzunluğunda demir parçalardan oluşmaktadır. Deney sırasında bu parçalar numunenin dağılmasını ve parçalanmasını önlemek ve düzgün bir kesitte kırılmayı sağlamak amacıyla numunenin alt ve üst kısımlarına yerleştirilmiştir.



Şekil 6.15. Dolaylı çekme dayanımı deney düzeneği [36].

Prese düzgün bir şekilde yerleştirilen numuneler üzerine yük uygulanmış ve kırılma anında yük otomatik kaldırılarak Formül 6.8'e göre numunelerin dolaylı çekme dayanımları belirlenmiştir.

$$f_{st} = \frac{2P}{\pi BD} \left(\frac{N}{mm^2}\right) \quad \text{..... (6.8)}$$

Burada;

f_{st} = Dolaylı çekme dayanımı (N/mm^2),

P = Numunenin kırıldığı maksimum yük (N),

B = Numunenin genişliği (mm),

D = Numunenin yüksekliği (mm).

6.3.3. SEM ve EDX Analizleri

Bu çalışma kapsamında elde edilen lastik ilaveli betonlarda, lastiklerle çimento harcı arasındaki yapışma özelliği ve lastikler ile çimento bileşenlerinin arasındaki reaksiyonlar hakkında bilgi edinebilmek amacıyla SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDX (X-Ray analizi) çalışmaları yapılmıştır.

Elektron mikroskobunda bulunan bir malzeme, direk olarak 10-20 kV hızlandırılmış elektron bombardımanı altındadır. Numune üzerine gönderilen sinyaller sayesinde numune yüzeyi hakkında detaylı bir topografik çalışma yapılır.

Beton, makroskobik ölçekte çimento harcı, ince agrega ve iri agregadan oluşan bir karışımdır. Mekanik davranışına göre beton; çimento harcı, çimento harcı ile iri agrega parçacıkları arasındaki arayüzeyi gösteren geniş bölge ve agrega parçacıklarını içeren kompozit bir malzemedir. Birçok açıdan betonun gerilme altındaki davranışı, çimento harcı ile agrega arasındaki ara yüzeyin davranışı ve karakteristiği ile açıklanabilir. Normal betonda, agregalar ile çimento harcı arayüzeyi zayıf olduğundan, çatlak oluşumu agrega ile çimento harcı arasındaki bu zayıf bölgeyi takip eder. Bu çalışmada kullanılan lastik agregalar ile çimento harcı arasındaki yapışma özelliğini belirlemek amacıyla SEM analizleri yapılmıştır.

EDX analizinde gönderilen sinyaller sayesinde numune üzerindeki elementlerin ağırlıkça yüzdeleri tayin edilir. EDX analizi, özellikle çimento bileşenleri ile diğer beton bileşenleri arasındaki reaksiyonlar açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada kullanılan lastik agregaların çimento bileşenleri ile yapmış oldukları reaksiyonları belirlemek amacıyla EDX analizleri yapılmıştır.

SEM ve EDX çalışmalarında, basınç deneyi sonunda kırılma yüzeylerinden alınan numuneler kullanılmıştır.

7. BULGULAR ve TARTIŞMA

Beton içerisine hacimce %5, 10, 15 ve 20 oranlarında ince ve iri lastik agregalar ilave edilerek elde edilen numuneler üzerinde birim ağırlık, çökme, basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, dolaylı çekme mukavemeti ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada önce taze betonun fiziksel özellikleri belirlenmiş ve daha sonra 28. günün sonunda sertleşmiş haldeki betonun fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

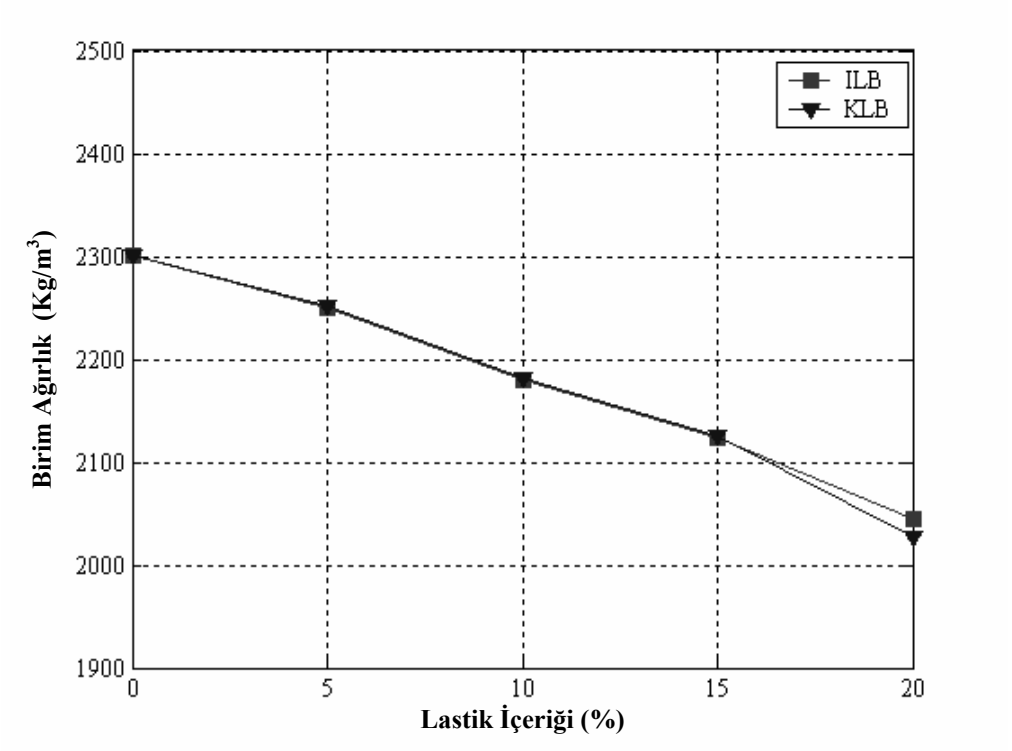
7.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

7.1.1. Taze Betonun Birim Ağırlığı

İnce ve iri lastik agrega ilaveli betonların birim ağırlıklarının, lastik miktarına bağlı değişimleri Tablo 7.1 ve Şekil 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1. Taze betonda birim ağırlık değerleri

Numune Adı	Lastik İçeriği (%)	Birim Ağırlık (kg/m^3)	Azalma Oranı (%)
K	**0**	2301	-
İLB-5	**5**	2251	2.2
İLB-10	**10**	2180	5.3
İLB-15	**15**	2110	8.3
İLB-20	**20**	2045	11.1
KLB-5	**5**	2251	2.2
KLB-10	**10**	2181	5.2
KLB-15	**15**	2125	7.6
KLB-20	**20**	2027	11.9



Şekil 7.1. Taze betonun birim ağırlığının lastik miktarı ile değişimi

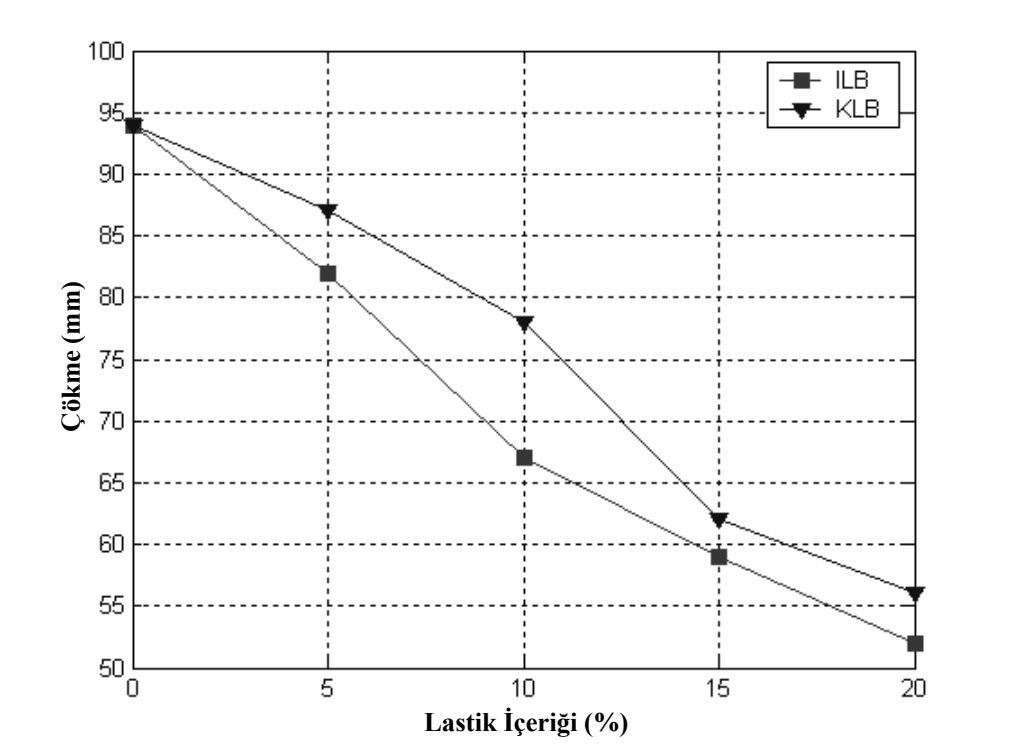
Elde edilen taze betonda lastik miktarına bağlı olarak birim ağırlıktaki değişim sonuçları, teorik olarak hacimsel beton karışım hesabındaki değerlerle paralellik göstermektedir. Deney sonuçları, beton içerisinde lastik miktarı arttıkça taze betonun birim ağırlığının da düştüğünü göstermiştir. Beton içerisine hacimce %5, 10, 15 ve20 oranlarında ince lastik ilavesi ile taze betonun birim ağırlığında sırasıyla %2.2, 5.3, 8.3, 11.1 oranlarında, aynı oranlardaki iri lastik ilavesi ile sırasıyla %2.2, 5.2, 7.6 ve 11.9 azalmalar meydana gelmiştir.

7.1.2. Taze Betonda İşlenebilirlik

Hacimce %5, 10, 15 ve 20 oranlarında iri lastik ilavesiyle taze betonun işlenebilme özelliğindeki değişimi belirlemek amacıyla çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyi sonuçları Tablo 7.2 ve Şekil 7.2'de verilmektedir.

Tablo 7.2. Taze betonda çökme miktarı değerleri

Numune Adı	Çökme Miktarı (mm)				
	Kontrol	%5	%10	%15	%20
İLB	94	82	67	59	52
KLB	94	87	78	62	56



Şekil 7.2. Taze betonun çökme değerinin lastik içeriği ile değişimi

Tablo 7.2 ve Şekil 7.2 incelendiğinde, beton içerisindeki lastik agrega miktarı arttıkça çökme değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir. Çökme miktarındaki değişim, lastiklerin az da olsa su emme kapasitesinden ve lastikler ile çimento harcı arasındaki yüzeysel sürtünmelerden meydana gelmektedir. İnce lastikler, iri lastiklere oranla daha fazla çökme göstermişlerdir. Bu nedenle, çökme miktarının lastiklerin su emme kapasitesinden ziyade lastikler ile çimento harcı arasındaki yüzeysel sürtünmelerden kaynaklandığı açıktır.

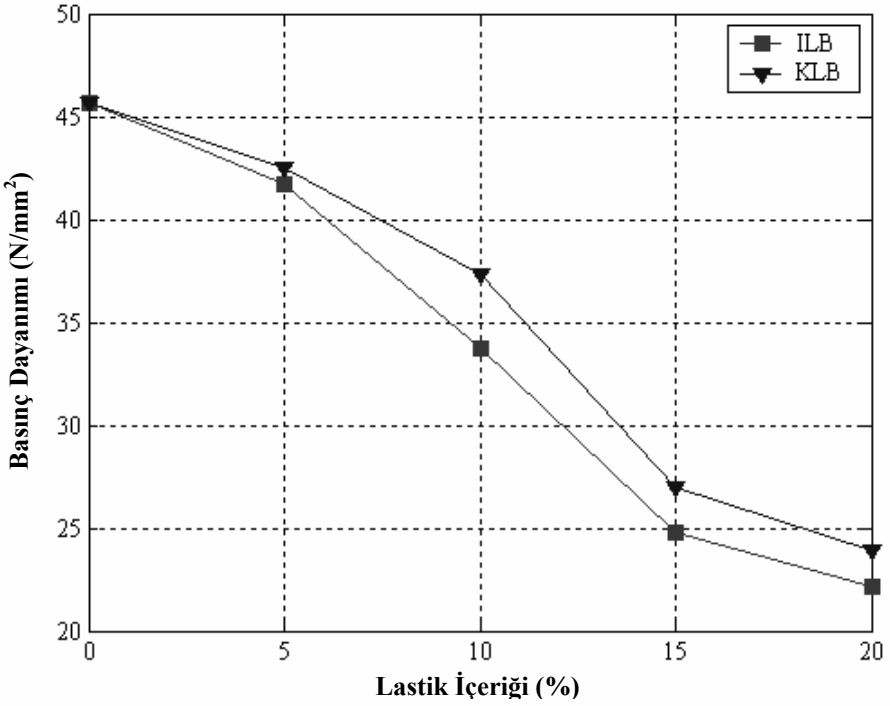
7.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Belirlenmesi

7.2.1. Basınç Dayanımı

Bu çalışmada, beton atık taşıt lastik içeren ve içermeyen beton numunelerin basınç dayanımları 28. günün sonunda belirlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 7.3 ve Şekil 7.3'de verilmektedir.

Tablo 7.3. Lastik ilaveli beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri

Numune Adı	Lastik İçeriği (%)	Basınç Dayanımı (N/mm^2)			Ortalama Basınç Dayanımı (N/mm^2)	Azalma Oranı (%)
		1	2	3		
K	**0**	38.86	44.71	53.51	45.69	-
İLB-5	**5**	41.64	41.05	42.45	41.71	8.7
İLB-10	**10**	33.35	34.18	33.55	33.69	26.3
İLB-15	**15**	24.55	23.70	25.99	24.75	45.8
İLB-20	**20**	21.40	21.20	23.81	22.14	51.5
KLB-5	**5**	43.13	42.34	41.61	42.49	7.0
KLB-10	**10**	34.58	43.03	34.29	37.30	18.4
KLB-15	**15**	22.48	30.61	27.80	26.96	41.0
KLB-20	**20**	23.38	26.32	22.03	23.91	47.7



Şekil 7.3. Lastik agrega ilaveli betonların basınç dayanımlarının değişimleri

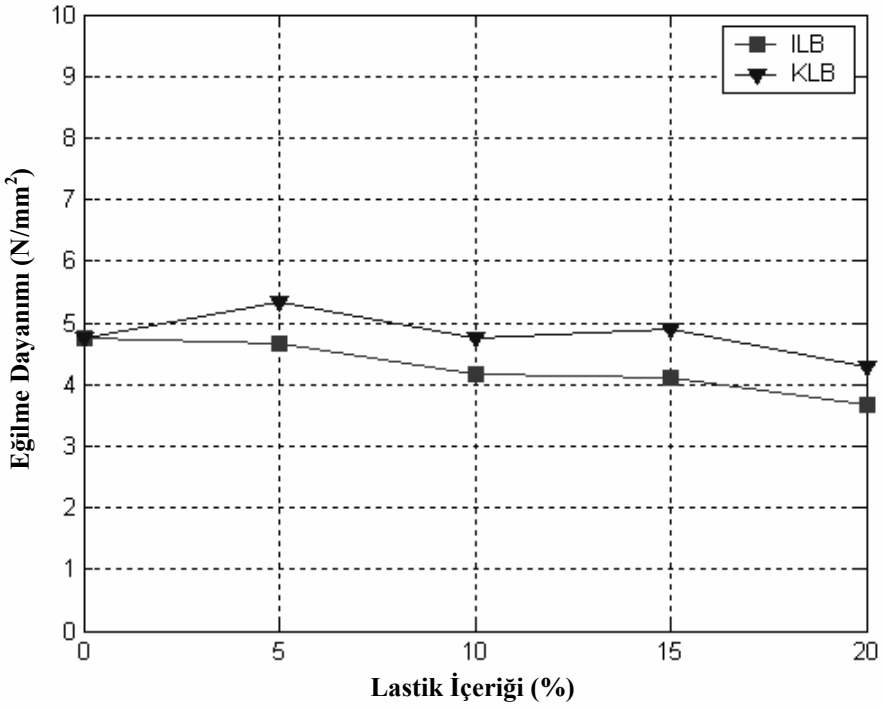
Tablo 7.3 ve şekil 7.3'de görüldüğü gibi beton içerisindeki lastik agrega miktarı arttıkça basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Şekil 7.3'den de görüldüğü gibi iri lastik ilaveli betonların basınç dayanımları ince lastikler ilaveli betonlardan daha yüksek çıkmıştır. Burada, iri lastikler ile çimento harcı arasındaki yapışma yüzeyinin ince lastikler ile çimento harcı arasındaki yapışma yüzeyine göre daha az olması basınç dayanımında önemli rol oynamıştır.

7.2.2. Eğilme Dayanımı

28. günün sonunda 100x100x500 mm prizma numuneler üzerinde yapılan eğilme dayanımı sonuçları Tablo 7.4 ve Şekil 7.4'de verilmektedir.

Tablo 7.4. Lastik ilaveli beton numunelerinin eğilme dayanımı değerleri

Numune Adı	Lastik İçeriği (%)	Eğilme Dayanımı (N/mm^2)			Ortalama Eğilme Dayanımı (N/mm^2)	Artma Azalma Oranı (%)
		1	2	3		
K	**0**	5.21	4.46	4.57	4.75	-
İLB-5	**5**	5.90	6.79	5.97	4.67	-1.68
İLB-10	**10**	4.13	4.07	4.28	4.16	-12.42
İLB-15	**15**	3.11	4.33	4.87	4.10	-13.68
İLB-20	**20**	3.28	3.65	4.05	3.66	-22.95
KLB-5	**5**	5.26	5.66	6.80	5.34	+12.42
KLB-10	**10**	6.36	6.11	6.48	4.74	-0.21
KLB-15	**15**	5.03	5.13	4.50	4.89	+2.95
KLB-20	**20**	3.46	4.70	4.72	4.29	-9.68



Şekil. 7.4. Lastik ilaveli betonların eğilme dayanımlarının değişimleri

Tablo 7.4 ve Şekil 7.4 incelendiğinde, lastik ilaveli betonların eğilme dayanımları değişiklik göstermektedir. Basınç dayanımındaki düşüşe rağmen, lastik ilavesi betonun eğilme dayanımını bir miktar artırmıştır. Genelde iri lastik ilavesinin betonun eğilme dayanımına etkisi daha fazladır. Ayrıca deney sonunda kontrol numunesi tamamen kırılıp ikiye ayrılmasına

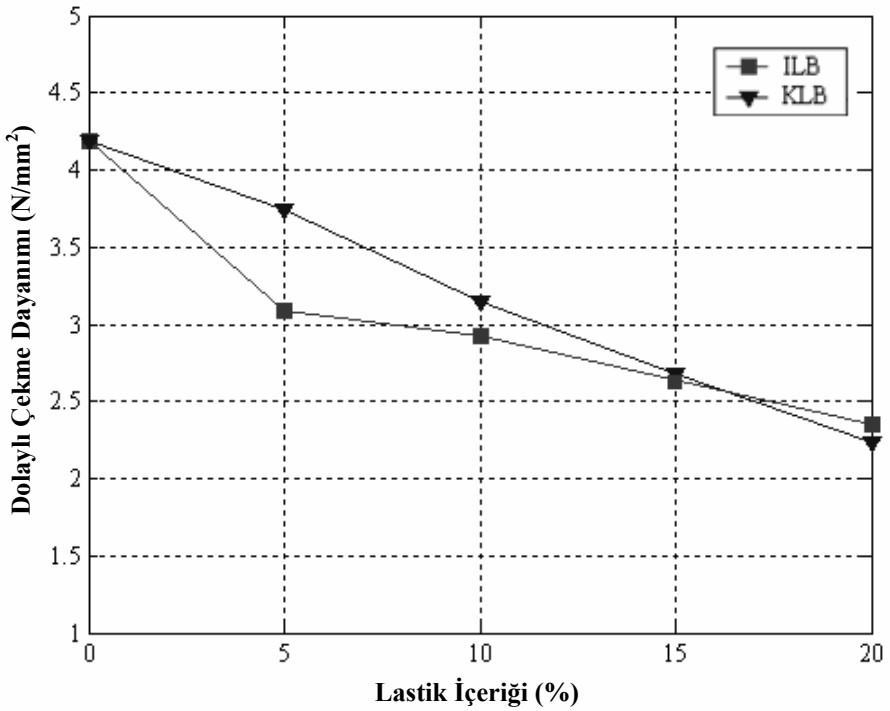
rağmen lastik ilaveli betonlar tamamen kırılmamıştır. Özellikle iri lastikler beton içerisinde lif etkisi göstermişlerdir. Deney sırasında açıklık ortasından bir komparatör yardımıyla ölçülen deformasyon değerleri lastik ilaveli betonlarda daha fazla çıkmıştır. Yani beton içerisindeki lastik ilavesi, betona bir miktar esneklik kazandırmıştır.

7.2.3. Dolaylı Çekme Dayanımı

Eğilme deneyleri sonrasında çıkan parçalar üzerinde yapılan dolaylı çekme deneyi sonuçları Tablo 7.5 ve Şekil 7.5'de verilmektedir.

Tablo 7.5. Lastik ilaveli beton numunelerinin dolaylı çekme dayanımı değerleri

Numune Adı	Lastik İçeriği (%)	Dolaylı Çekme Dayanımı (N/mm^2)			Ortalama Dolaylı Çekme Dayanımı (N/mm^2)	Azalma Oranı (%)
		1	2	3		
K	**0**	4.09	3.75	4.73	4.191	-
İLB-5	**5**	3.40	2.94	2.92	3.087	26.34
İLB-10	**10**	2.85	3.08	2.86	2.928	30.14
İLB-15	**15**	2.56	2.46	2.84	2.622	37.49
İLB-20	**20**	2.37	2.42	2.25	2.346	44.02
KLB-5	**5**	3.68	3.65	3.90	3.741	10.74
KLB-10	**10**	3.14	2.94	3.33	3.141	25.05
KLB-15	**15**	2.51	2.89	2.63	2.676	36.15
KLB-20	**20**	2.21	2.12	2.37	2.238	46.60



Şekil. 7.5. Lastik ilaveli betonların dolaylı çekme dayanımlarının değişimleri

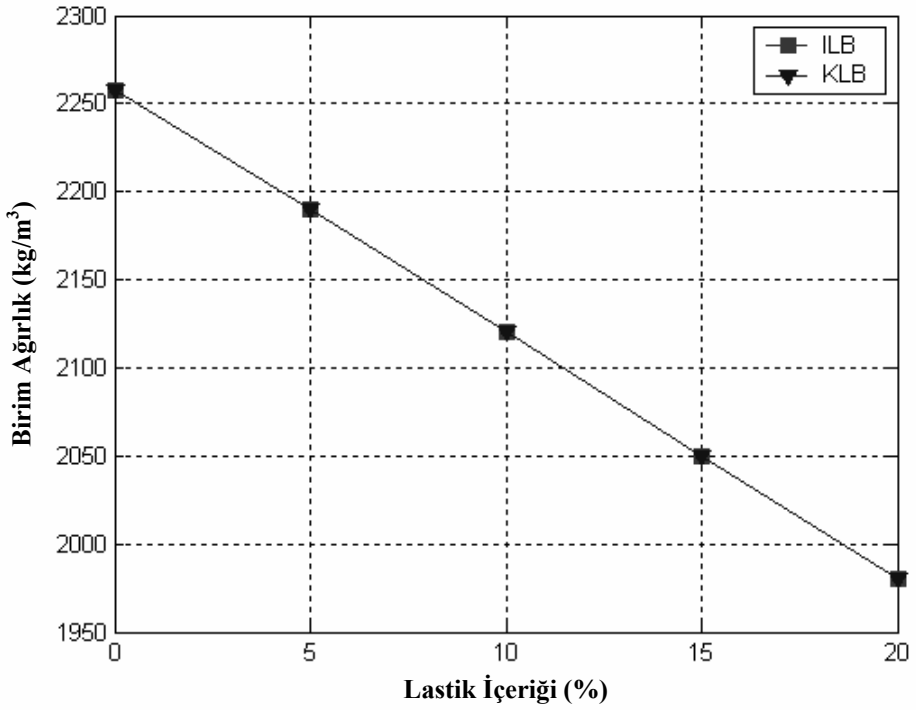
Beton içerisindeki lastik miktarı arttıkça dolaylı çekme dayanımında bir azalma meydana gelmiştir. Bu deneyde dolaylı yükler altında çekme dayanımı belirlenmesine rağmen, özellikle numunenin orta kısmındaki gerilmelerin çoğu basınç gerilmelerdir. Bu nedenle, burada artma-azalma oranları bakımından, eğilme dayanımı ile bir uyuşmazlık ve basınç dayanımıyla bir benzerlik vardır.

7.2.4. Birim Ağırlık

Yirmi sekiz günlük basınç numuneleri üzerinde yapılan birim ağırlık deney sonuçları Tablo 7.6 ve Şekil 7.6'da verilmektedir.

Tablo 7.6. Lastik ilaveli beton numunelerinin yirmi sekiz günlük birim ağırlık değerleri

Numune Adı	Lastik İçeriği (%)	Birim Ağırlık (kg/m^3)			Ortalama Birim Ağırlık (kg/m^3)	Azalma Oranı (%)
		1	2	3		
K	**0**	2257	2263	2253	2258	-
İLB-5	**5**	2178	2190	2192	2190	3.1
İLB-10	**10**	2119	2119	2114	2120	6.2
İLB-15	**15**	2056	2045	2049	2050	9.3
İLB-20	**20**	1971	1976	1993	1980	12.4
KLB-5	**5**	2179	2203	2188	2190	3.1
KLB-10	**10**	2106	2137	2111	2120	6.2
KLB-15	**15**	2053	2048	2064	2050	9.3
KLB-20	**20**	1974	2000	1971	1980	12.4



Şekil. 7.6. Lastik ilaveli betonların yirmi sekiz günlük birim ağırlık değişimleri

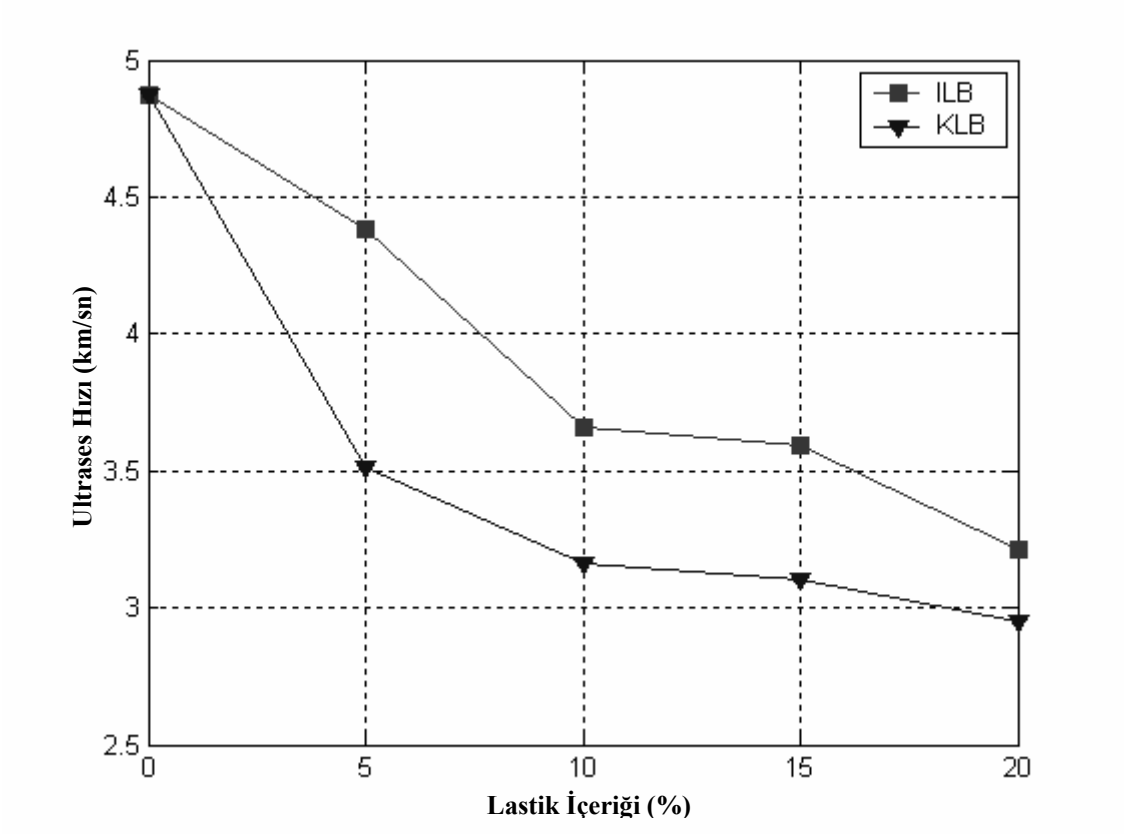
Beton içerisindeki lastik miktarı arttıkça sertleşmiş betonun birim ağırlığında taze betonda olduğu gibi bir azalma meydana gelmiştir. Birim ağırlıktaki bu azalma, %5 ince veya iri lastik ilavesi ile 1 m^3'lük bir yapı elamanında yaklaşık 60 kg'lık bir ağırlık kazancına denktir.

7.3. Ultrasonik Ses Hızı Ölçümleri

Hasarsız deney yöntemlerinden biri olan ultrasonik ses hızı ölçümü bu çalışma kapsamında yapılmıştır. İnce ve iri lastik agrega ilavesi ile beton numunelerin ultrases geçiş hızlarında meydana gelen değişimler Tablo 7.7 ve Şekil 7.7'de verilmektedir.

Tablo 7.7. Lastik agrega ilaveli beton numunelerinin ultrases hızı geçiş süreleri

Numune Adı	Ultra Ses Hızı (km/sn)				
	Kontrol	5%	10%	15%	20%
İLB	4.87	4.38	3.66	3.59	3.21
KLB	4.87	3.51	3.16	3.1	2.95



Şekil 7.7. Lastik ilaveli betonların ultrases geçiş hızı değişimleri

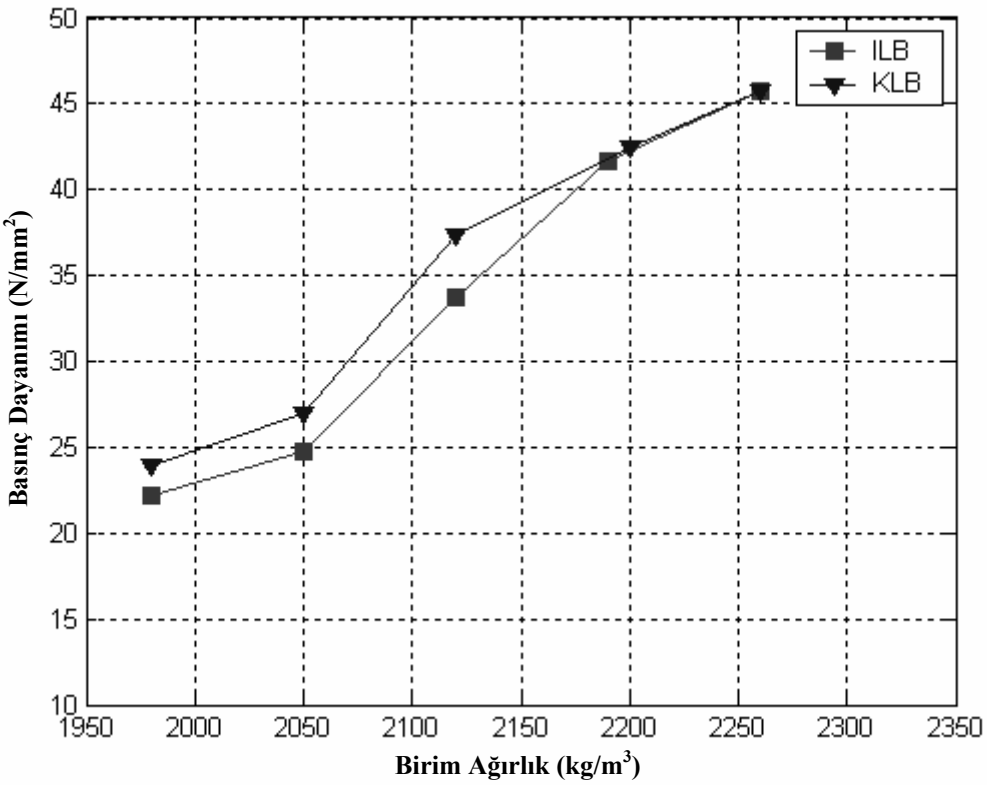
Yirmi sekiz gün sonunda basınç numuneleri üzerinde yapılan ultrases geçiş hızı değerleri beton içerisindeki lastik agrega içeriği arttıkça azalma göstermiştir. İri lastik agrega ilavesi ile meydana gelen düşüş ince lastik ilavesinden daha fazladır. Burada, ince lastik agregaların beton içerisindeki boşlukları iri lastik agregalara göre daha fazla doldurduğu anlaşılmaktadır.

7.4. Lastik Agrega İlaveli Betonların Özellikleri Arasındaki İlişkiler

Bu bölümde, beton içerisine hacimce %5, 10, 15, 20 oranlarında sırasıyla ince ve iri lastik agrega ilaveli betonların basınç dayanımları ile diğer özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

7.4.1. Basınç Dayanımı-Birim Ağırlık

Beton içerisine lastik agrega ilavesi ile elde edilen betonların basınç dayanımı ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.8. Lastik agrega ilaveli betonlarda basınç dayanımı - birim ağırlık arasındaki ilişki

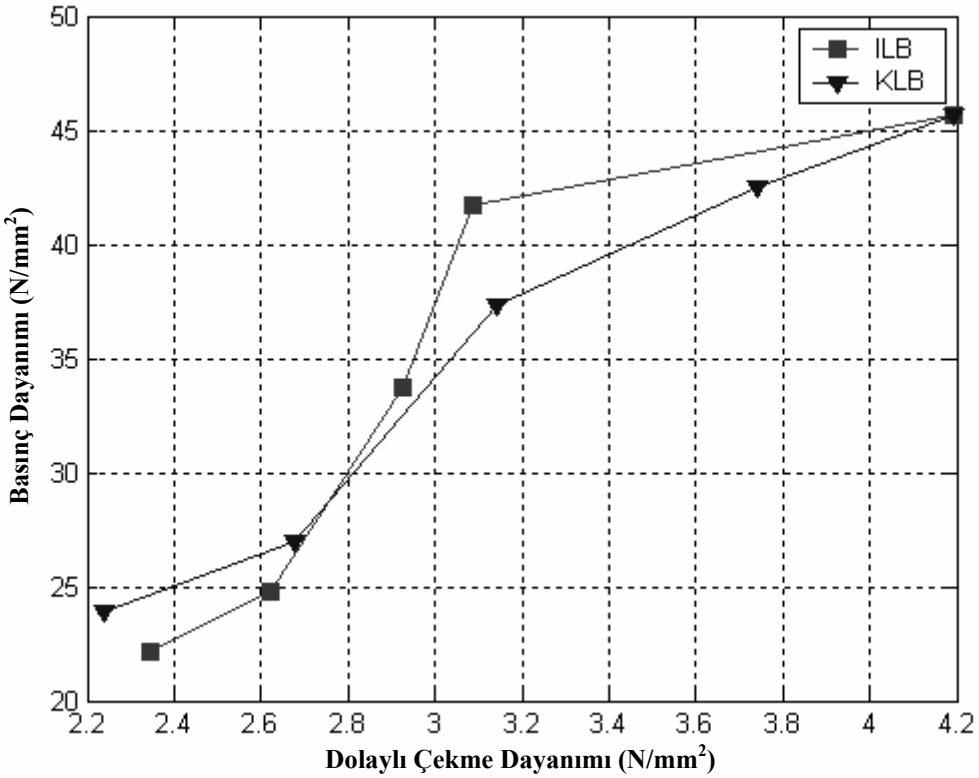
Şekil 7.8'deki eğrilere ait basınç dayanımı (σ_B) ve birim ağırlık (D) arasındaki eğri denklemleri ve korelasyon (R^2) katsayıları aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_B = 0.092 \times D - 160.41,\ R^2 = 0.99\ (\text{İLB}) \quad (7.1)$$

$$\sigma_B = 0.083\,xD - 141.64,\ R^2 = 0.98\ (\text{KLB}) \quad (7.2)$$

7.4.2. Basınç Dayanımı-Dolaylı Çekme Dayanımı

Basınç dayanımı ile dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 7.10'da verilmiştir.



Şekil 7.9. Lastik agrega ilaveli betonlarda basınç dayanımı - dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki

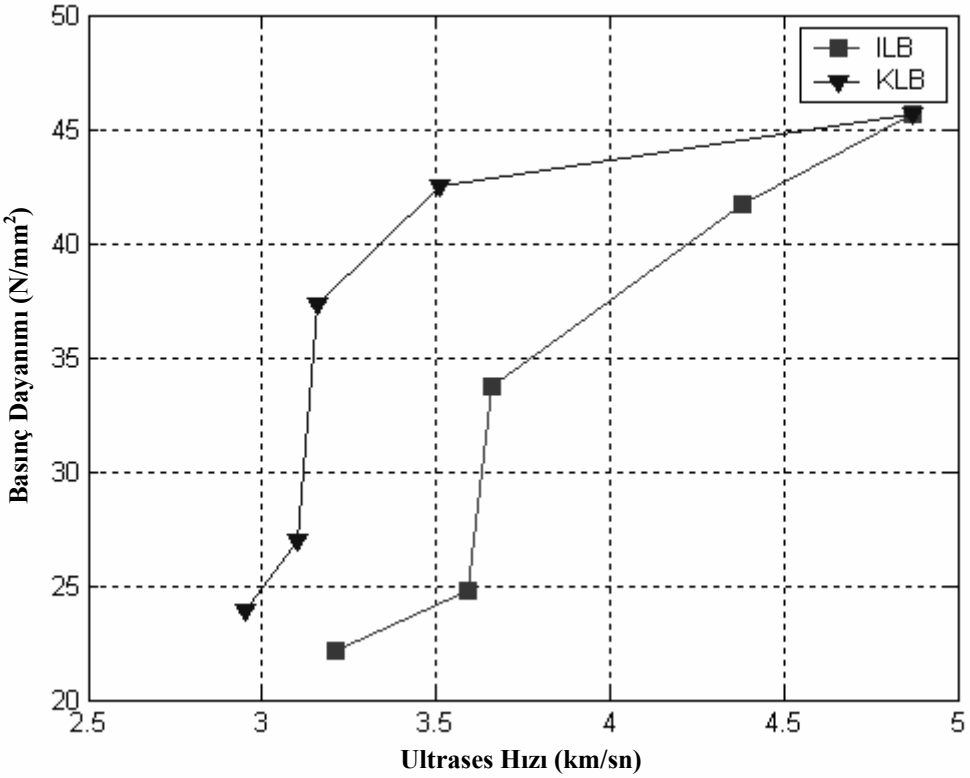
Şekil 7.9'daki eğrilere ait basınç dayanımı (σ_B) ve dolaylı çekme dayanımı (σ_D) arasındaki eğri denklemleri ve korelasyon (R^2) katsayıları aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_B = 12.995x\sigma_D - 5.836,\ R^2 = 0.94\ (\text{İLB}) \quad (7.3)$$

$$\sigma_B = 11.861x\sigma_D - 2.656,\ R^2 = 0.98\ (\text{KLB}) \quad (7.4)$$

7.4.3. Basınç Dayanımı-Ultrases Hızı

Basınç dayanımı ile dolaylı çekme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 7.10'da verilmiştir.



Şekil 7.10. Lastik agrega ilaveli betonlarda basınç dayanımı - ultrases hızı arasındaki ilişki

Şekil 7.10'daki eğrilere ait basınç dayanımı (σ_B) ve ultrases hızı (V) arasındaki eğri denklemleri ve korelasyon (R^2) katsayıları aşağıdaki gibidir.

σ_B=14.646xV-24.14, R^2=0.96 (İLB).....(7.5)

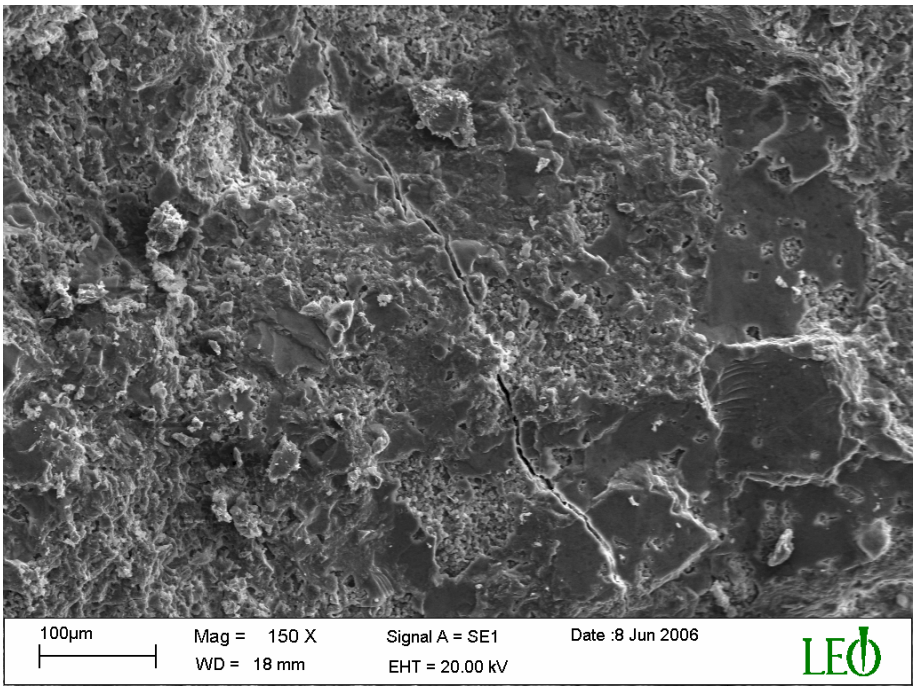
σ_B=9.468xV+1.962, R^2=0.78 (KLB) .....(7.6)

7.5. SEM ve EDX Analizleri

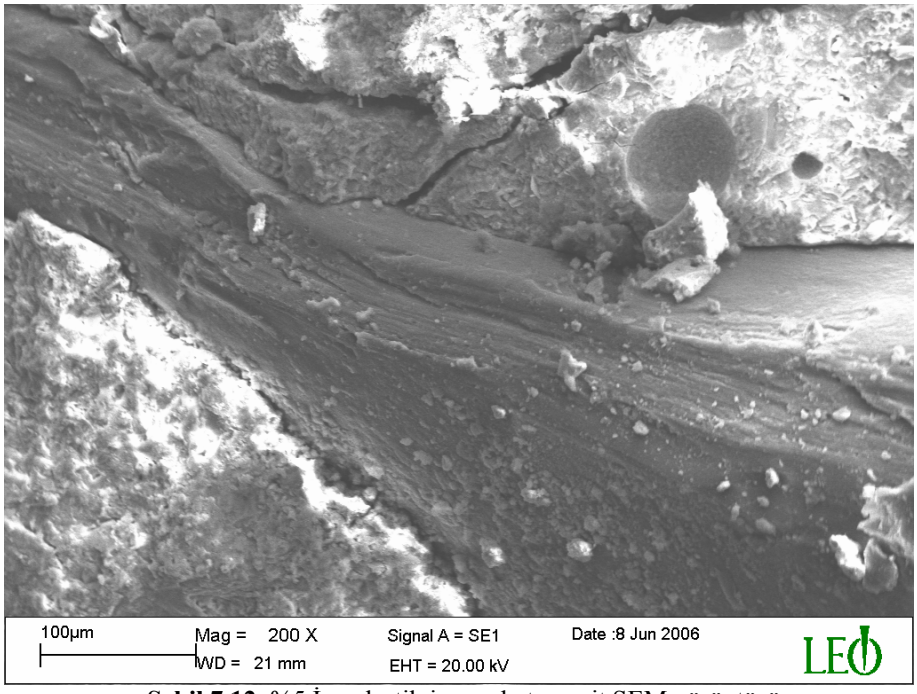
Beton içerisine hacimce %5, 10, 15 ve 20 oranlarında lastik kauçuğun agrega ile yer değiştirilmesi sonucu elde edilen betonlarda agregalar ile çimento harcı arasındaki yapışma kabiliyeti ve çimento bileşenleri ile lastik kauçuklar arasındaki reaksiyonları değerlendirmek amacıyla SEM ve EDX analizleri bu çalışma kapsamında yapılmıştır.

7.5.1. SEM Analizi

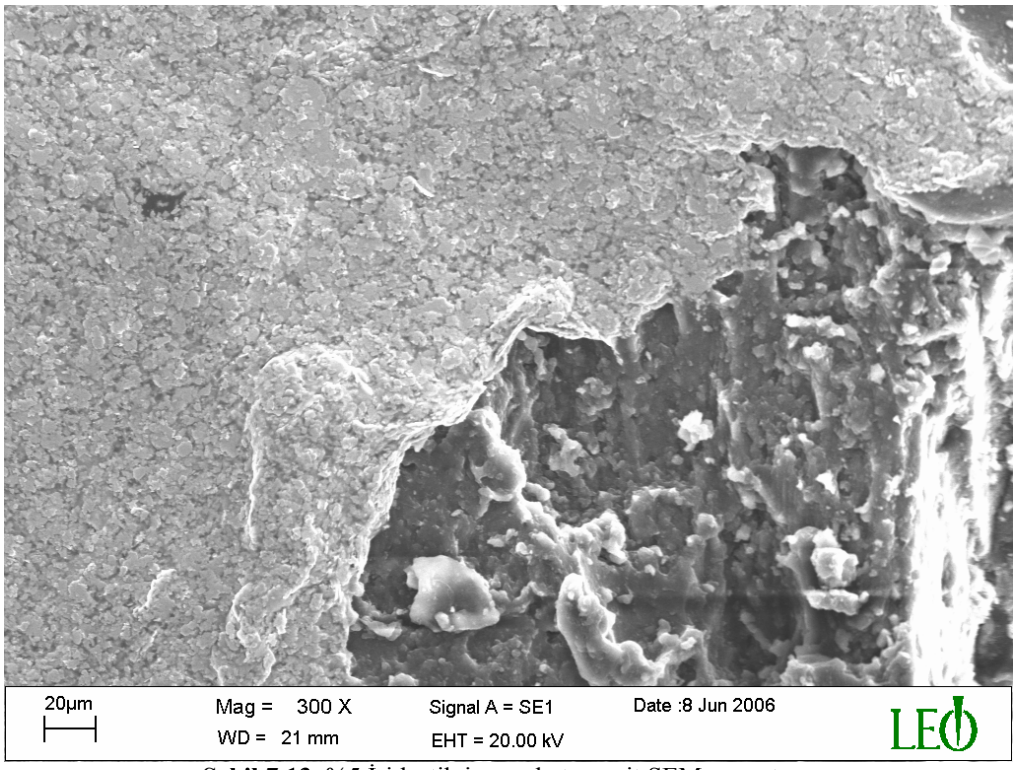
Basınç dayanımı deneyi sonrasında küp numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan numuneler SEM analizleri için kullanılmıştır. SEM görüntüleri alınırken beton içerisindeki atık taşıt lastikleri ile çimento arayüzeyinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, 7.18 ve7.19'da değişik oranlarda atık taşıt lastiği içeren betonların SEM görüntüleri verilmektedir.



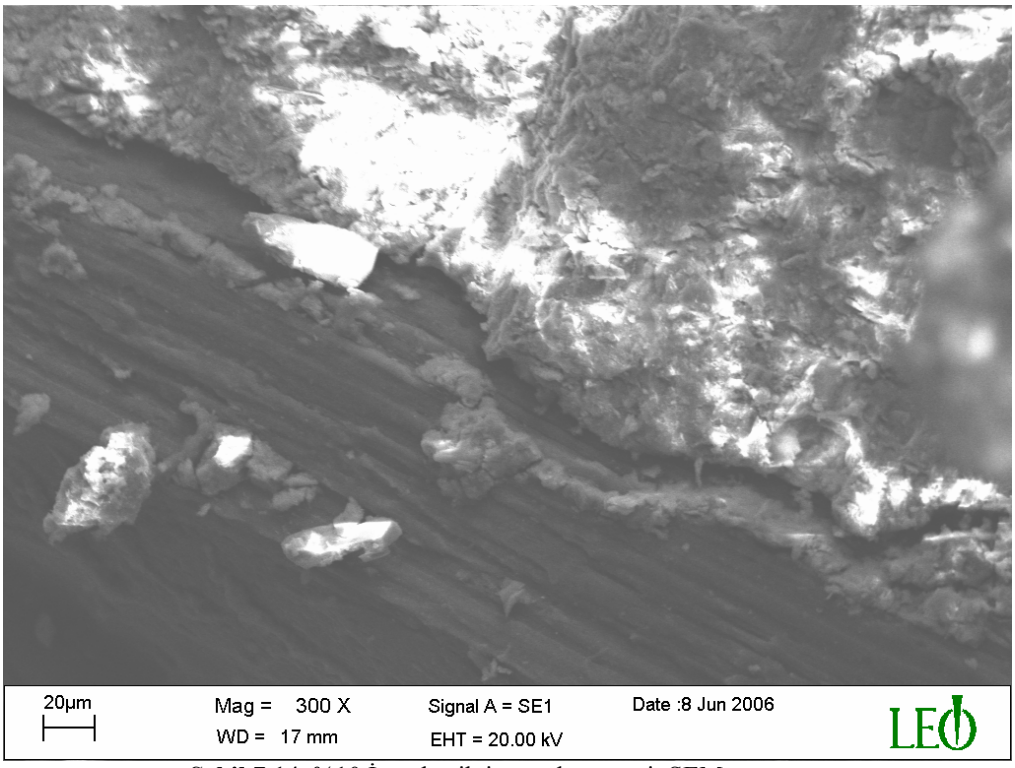
Şekil 7.11. Kontrol betonuna ait SEM görüntüsü



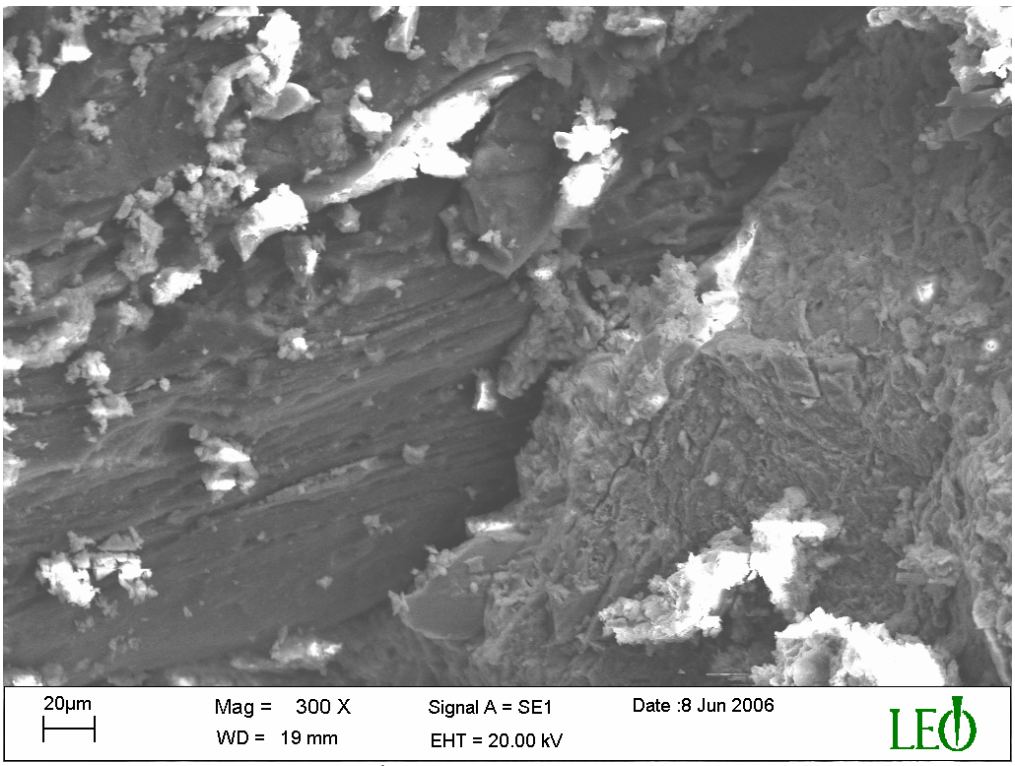
Şekil 7.12. %5 İnce lastik içeren betona ait SEM görüntüsü



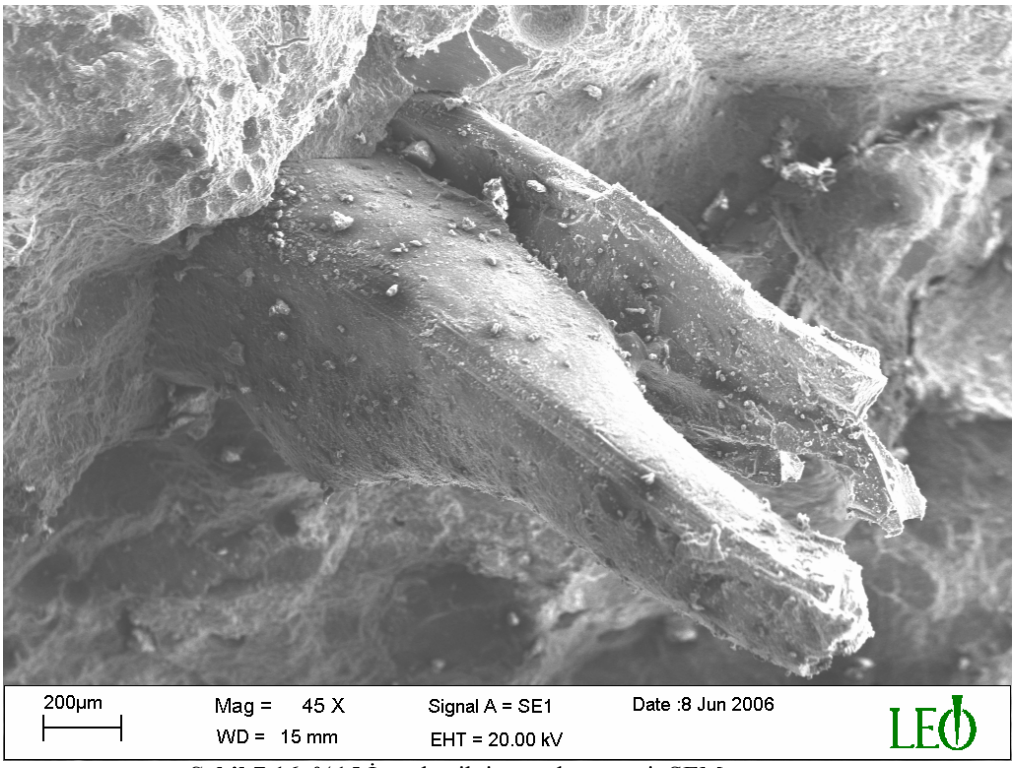
Şekil 7.13. %5 İri lastik içeren betona ait SEM görüntüsü



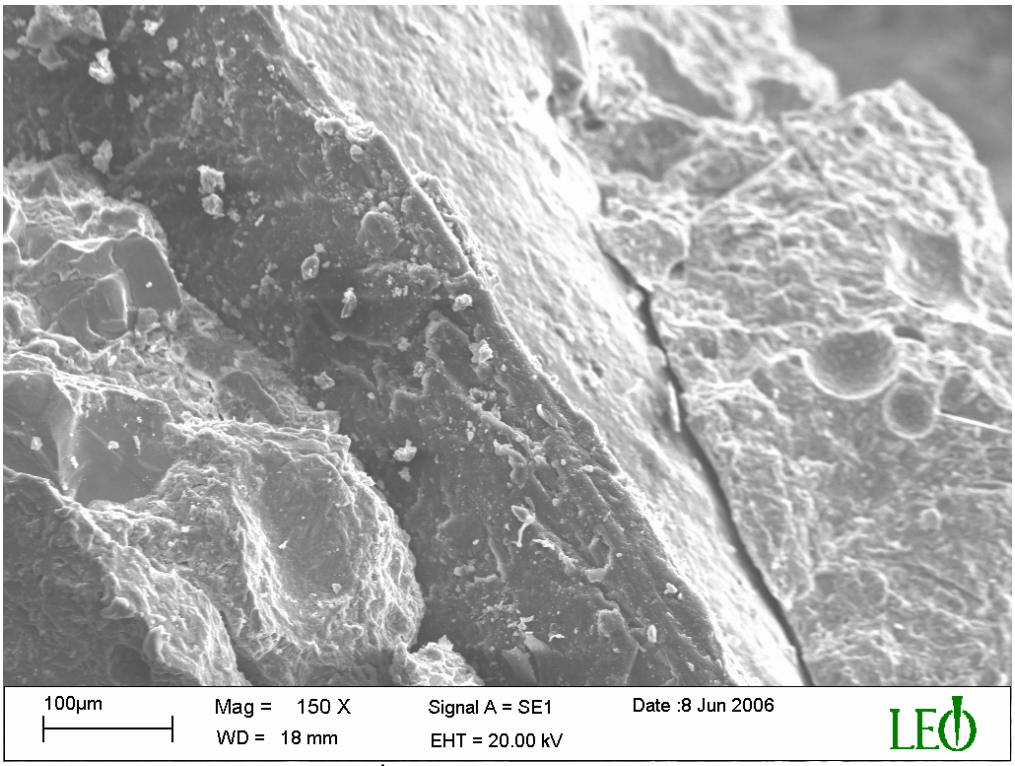
Şekil 7.14. %10 İnce lastik içeren betona ait SEM görüntüsü



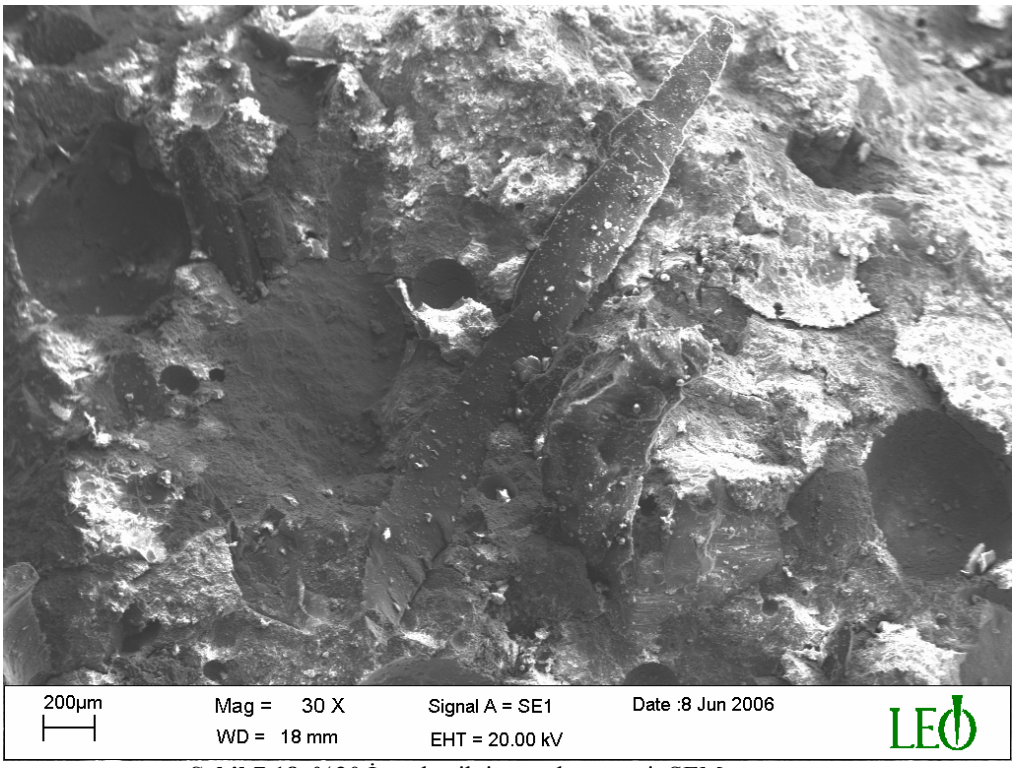
Şekil 7.15. %10 İri lastik içeren betona ait SEM görüntüsü



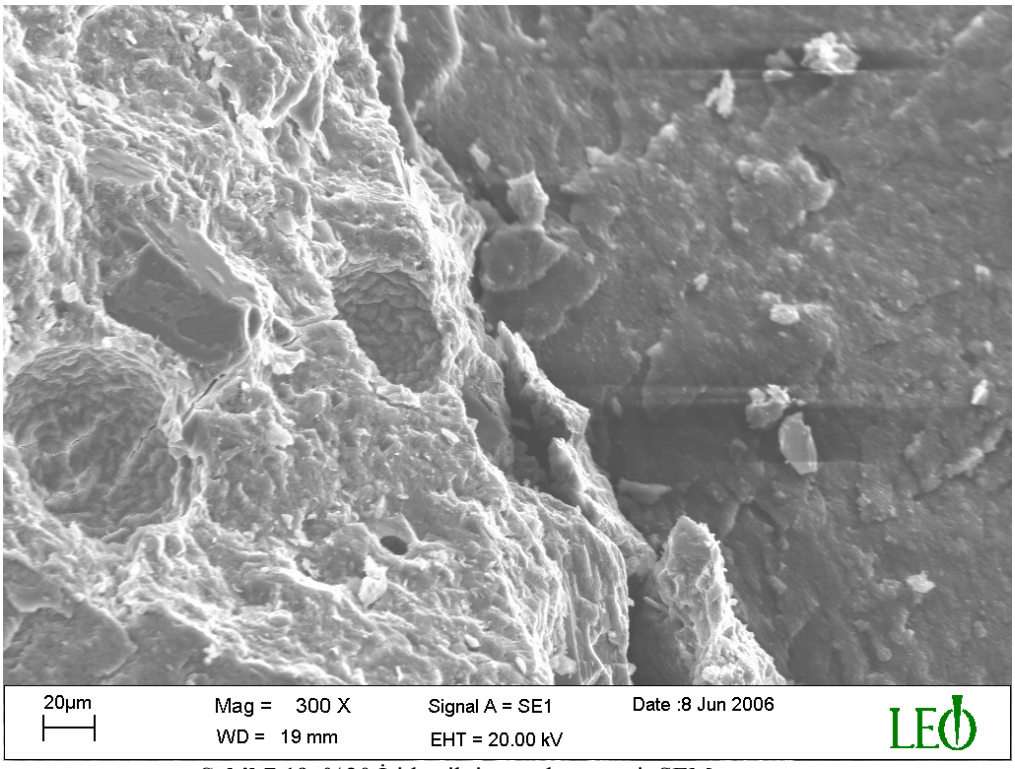
Şekil 7.16. %15 İnce lastik içeren betona ait SEM görüntüsü



Şekil 7.17. %15 İri lastik içeren betona ait SEM görüntüsü



Şekil 7.18. %20 İnce lastik içeren betona ait SEM görüntüsü

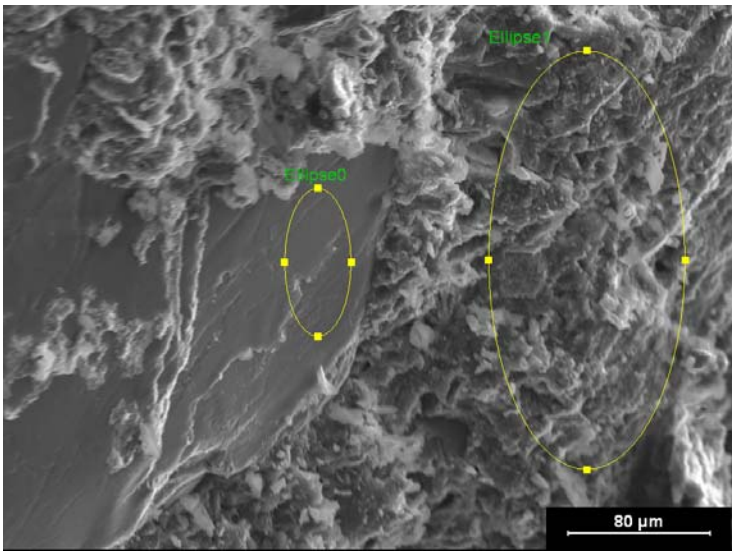


Şekil 7.19. %20 İri lastik içeren betona ait SEM görüntüsü

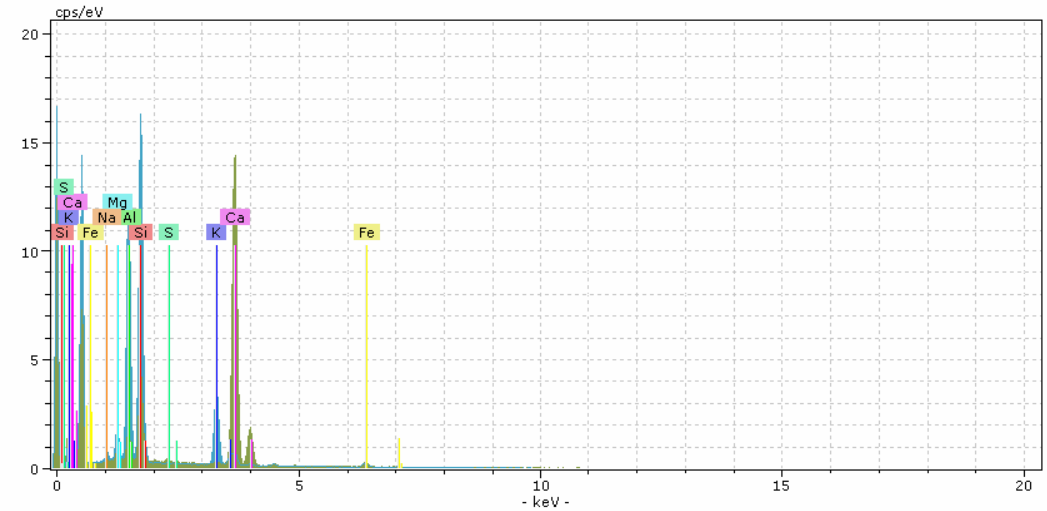
SEM fotoğrafları incelendiğinde, lastik agregalar ile çimento arasındaki arayüzeyin yapışma özelliğinin zayıf olduğu açıktır. Basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımındaki azalmalar, beton içerisindeki bu zayıf yapışma özelliğinden kaynaklanmaktadır. Şekil 7.12'den açıkça görüldüğü gibi, beton içerisindeki çatlak oluşumları bu zayıf bölgelerden başlayıp daha sonra ilerlemektedir.

7.5.2. EDX Analizi

EDX analizleri SEM analizi için hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler üzerinde atık taşıt lastikleri ile çimento pastası arasındaki arayüzeyin analizi yapılmıştır. EDX analiz sonuçları Şekil 7.20, 7.21, 7.22, 7.23, 7.24, 7.25 ve Tablo 7.8, 7.9 ve 7.10'da verilmektedir.



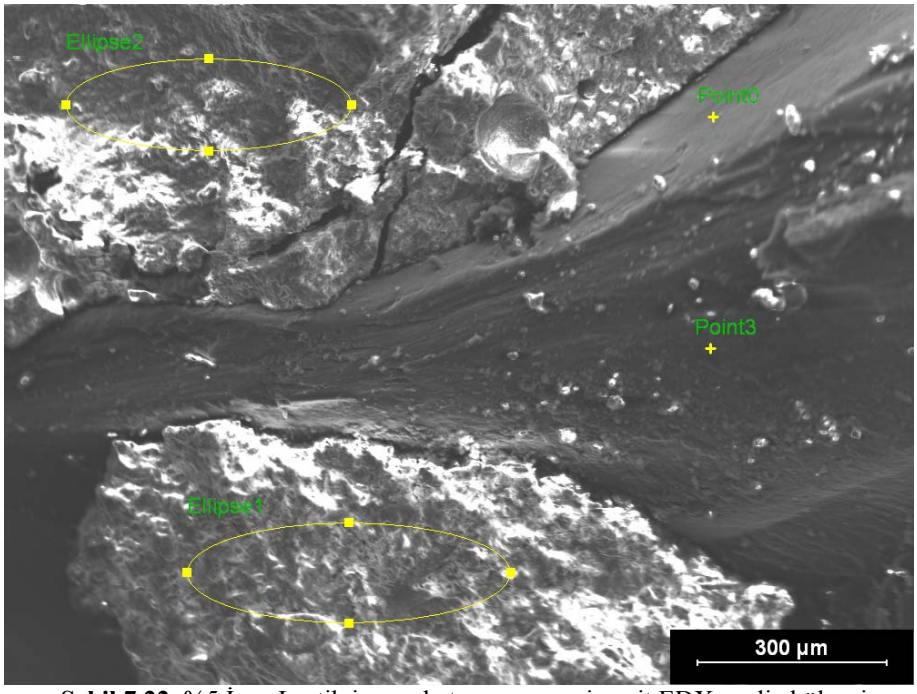
Şekil 7.20. Kontrol numunesine ait EDX analiz bölgesi



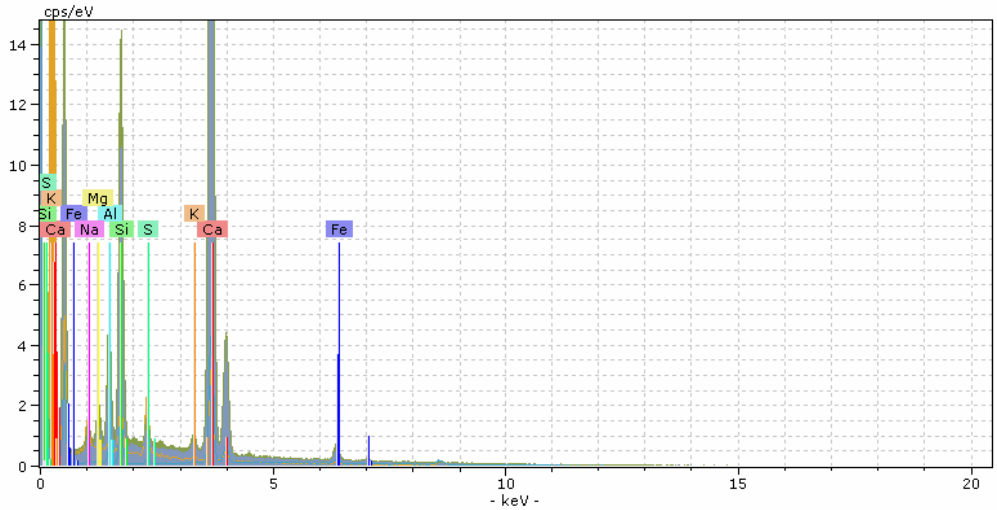
Şekil 7.21. Kontrol numunesine ait EDX analiz sonuçları

Tablo 7.8. Kontrol numunesine ait EDX analiz sonuçları

Ellipse 0			Ellipse 1		
Element	**Ağırlıkça %**	**Atomik %**	**Element**	**Ağırlıkça %**	**Atomik %**
Si	49,32	51,30	**Ca**	68,97	61,78
Al	26,79	29,00	**Si**	14,58	18,63
K	14,38	10,75	**Al**	5,26	7,00
Mg	3,48	4,18	**Fe**	3,64	2,34
Ca	2,40	1,75	**Mg**	2,67	3,94
Fe	2,12	1,11	**Na**	2,32	3,62
Na	1,51	1,92	**S**	1,63	1,83
-	-	-	**K**	0,93	0,85



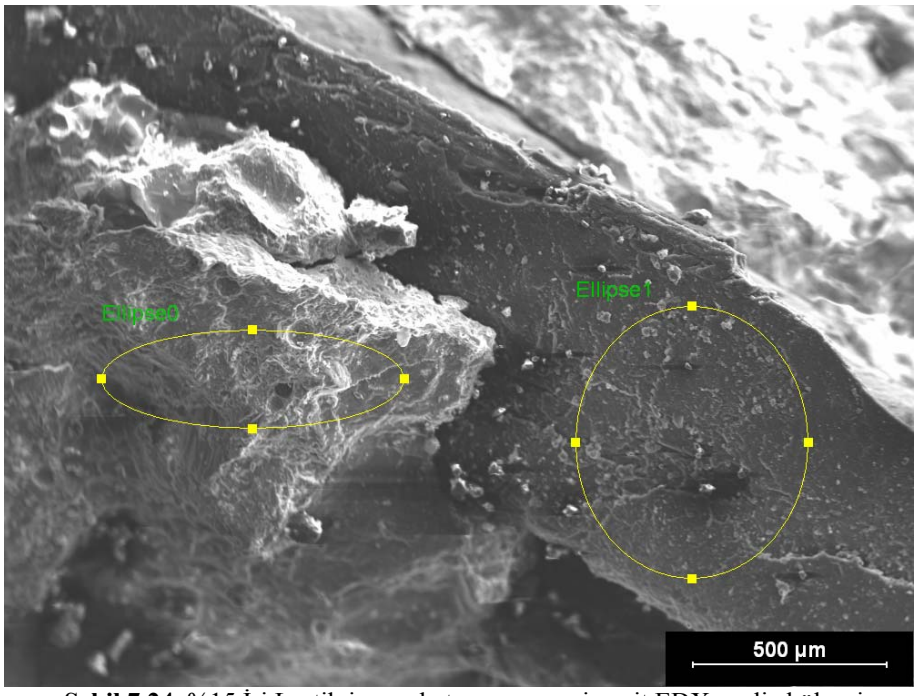
Şekil 7.22. %5 İnce Lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz bölgesi



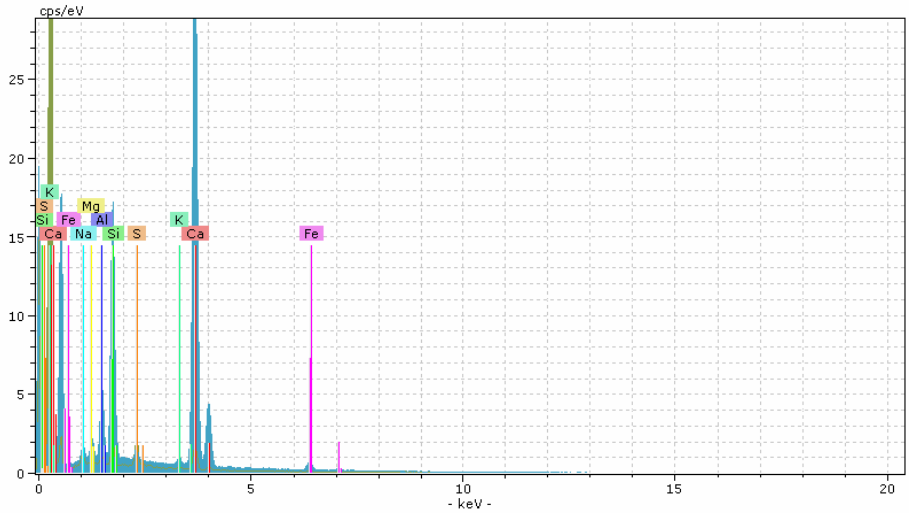
Şekil 7.23. %5 İnce Lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz sonuçları

Tablo 7.9. %5 İnce lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz sonuçları

Ellipse 1			Point 3		
Element	**Ağırlıkça %**	**Atomik %**	**Element**	**Ağırlıkça %**	**Atomik %**
Ca	62,10	24,12	**Ca**	28,70	21,84
Si	18,69	23,24	**S**	19,62	18,66
Al	6,11	7,91	**Na**	16,54	21,94
Fe	3,24	2,03	**Si**	15,41	16,73
Na	3,13	4,76	**Mg**	7,75	9,72
Mg	2,63	3,77	**Al**	6,80	7,69
S	2,59	2,82	**Fe**	2,60	1,42
K	1,51	1,35	**K**	2,58	2,01



Şekil 7.24. %15 İri Lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz bölgesi



Şekil 7.25. %15 İri Lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz sonuçları

Tablo 7.10. %15 İri lastik içeren beton numunesine ait EDX analiz sonuçları

Ellipse 0			Ellipse 1		
Element	**Ağırlıkça %**	**Atomik %**	**Element**	**Ağırlıkça %**	**Atomik %**
Ca	60,64	52,26	**S**	25,46	24,01
Si	21,42	26,33	**Si**	19,38	20,87
Al	6,20	7,93	**Ca**	18,73	14,13
Na	3,51	5,27	**Na**	12,30	16,18
Fe	2,94	1,82	**Al**	9,21	10,32
Mg	2,47	3,51	**Mg**	7,54	9,38
S	1,98	2,13	**K**	4,81	3,72
K	0,85	0,75	**Fe**	2,57	1,39

EDX fotoğrafları incelendiğinde, betona mukavemetini veren ve çimento ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucu ortaya çıkan Kalsiyum-Silika-Hidrat (C-S-H) jel oluşumlarında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Tablo 7.8, 7.9 ve 7.10'da da açıkça görüldüğü gibi kontrol betonu ile lastik agrega ilaveli betonların C-S-H jel oluşumları üzerinde alınan ölçümler sonucunda Ca, Si, Al ve Fe gibi bileşiklerin ağırlıkça yüzde değerlerinin oldukça benzer olduğu görülmektedir. Burada, lastik agregalar ile çimento bileşenleri arasında normal agregaya oranla herhangi farklı bir reaksiyonun meydana gelmediği gözlenmektedir. Ayrıca betonun genleşmesine neden olan potasyumun beton içerisindeki lastik içeriği arttıkça azaldığı gözlenmektedir.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan bütün deneysel çalışmaların sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir.

- Taze beton üzerinde yapılan fiziksel özelliklerden biri olan birim hacim ağırlık deneyi sonucunda, beton içerisindeki lastik agrega miktarı arttıkça betonun birim hacim ağırlığı azalmıştır.
- Beton içerisindeki lastik agrega miktarının, taze betonda çökmeyi azaltıcı yönde etki yaptığı gözlenmektedir. Beton içerisinde lastik miktarı arttıkça hem iri hem de ince lastik kullanıldığında çökme değerinde bir azalma meydana gelmektedir.
- Beton içerisindeki atık lastik agrega miktarı arttıkça basınç dayanımında bir azalma gözlenmektedir. İri lastik agrega ilaveli betonların basınç dayanımları ince lastik agregalı betonların basınç dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır.
- Lastik agrega ilaveli betonların eğilme mukavemetleri beton içerisindeki lastik agrega miktarına ve lastik agregaların ince veya iri oluşuna göre farklılık göstermektedir. Burada iri lastik agregalar, şekillerinden dolayı beton içerisinde lif etkisi göstermişlerdir. Özellikle iri lastik agrega ilavesi betonun eğilme dayanımını olumlu yönde etkilemiştir.
- Beton içerisindeki lastik agrega miktarı arttıkça dolaylı çekme dayanımları azalmıştır. Dolaylı çekme dayanımı sonuçları ile basınç dayanımı sonuçları paralellik göstermektedir. İri lastik agrega ilaveli betonların dolaylı çekme dayanımları, ince lastik agrega ilaveli betonlardan daha yüksek çıkmıştır.
- Sertleşmiş betonun birim ağırlık değerleri, beton içerisindeki lastik agrega miktarı arttıkça azalma göstermiştir. Hem ince hem de iri lastik agrega ilavesi ile betonun birim ağırlığı azalmış.
- Beton içerisindeki lastik agrega miktarı arttıkça, ultrases geçiş hızı değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. İri lastik ilavesi ile ultrases hızlarındaki azalma daha belirgin olmaktadır.
- SEM fotoğrafları incelendiğinde, lastikler ile çimento pastası arasındaki yapışma özelliğinin çok kötü olmamasına rağmen normal agregaya göre zayıf kaldığı açıktır. Bu nedenle, üretilen lastik agrega ilaveli betonların çatlak oluşumu, SEM fotoğraflarından da açıkça görüldüğü gibi, daha ziyade zayıf olan çimento pastası ile lastik agregaların arayüzeylerinde gerçekleşmiştir.
- EDX analizleri incelendiğinde, betona mukavemetini veren ve çimento ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucu ortaya çıkan Kalsiyum-Silika-Hidrat (C-S-H) jel oluşumlarında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir.

- Sonuç olarak, beton içerisine lastik agrega ilavesi ile daha hafif yapı elemanları üretilebilmekte fakat basınç dayanımları açısından bir sıkıntı meydana gelmektedir. Özellikle lastik ilaveli betonların eğilme dayanımları incelendiğinde, basınç dayanımındaki azalmaya rağmen eğilme dayanımındaki iyileşme, bu şekilde elde edilmiş betonların en büyük artısı olarak ortaya çıkmaktadır.
- Bundan sonra yapılacak çalışmalarda lastik agrega ilaveli betonların, ısı-ses yalıtımı, dış tesirlere karşı dayanıklılık deneyleri yapılmalı ve ileri yaşlardaki karakteristikleri araştırılmalıdır. Ayrıca, lastik agregaların beton içerisine daha iyi performans sağlayabilmesi açısından uygun kesme makineleri geliştirmeye ihtiyaç vardır.
- Lastik agregalar ile çimento harcı arasındaki yapışma özelliğinin artırılması gerekmektedir. Çeşitli katkı maddeleri (uçucu kül, pirinç kabuğu, yüksek fırın cürufu, farklı bağlayıcı malzeme kullanımı vs.) kullanılarak bu özellik geliştirilebilir.
- Beton içerisindeki agrega kalitesi ve çimento miktarı artırılarak ve Su/Bağlayıcı oranı azaltılarak beton kalitesi daha da iyileştirilebilir. Bu şekilde dayanım artırılarak, yüksek dayanım istenen uygulamalarda önerilebilir.
- Yapılan bu çalışmanın, şimdiye kadar bu konuda yapılmış çalışmalara katkı sağlayacağı, bundan sonra yapılacak çalışmalara örnek teşkil edeceği, atık bir malzeme olan taşıt lastiklerinin yönetimine ve dolayısıyla ülke ekonomisine katkıda bulunabileceği düşünülmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

3 Mayıs 1979 tarihinde Elazığ'da doğdum. İlk, orta ve lise eğitimimi Elazığ'da tamamladıktan sonra, 2000 yılında üniversite eğitimime Elazığ Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünde başladım. Lisans eğitimimi 2004 yılında tamamladım. Eylül 2004'te aynı bölümde yüksek lisans eğitimime başladım. Halen yüksek lisans yapmaktayım.

Mehmet EMİROĞLU