

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ATIK MERMER TOZU VE LASTİK AGREGA KULLANILARAK
ÜRETİLMİŞ ÇEVRE DOSTU BETONLARIN DAYANIM
VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Yük. Müh. Mehmet Esen EREN

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

ARALIK-2019

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Doktora Tezi

**ATIK MERMER TOZU VE LASTİK AGREGA
KULLANILARAK ÜRETİLMİŞ ÇEVRE DOSTU
BETONLARIN DAYANIM VE DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Tez Yazarı

Yük. Müh. Mehmet Esen EREN

Danışman

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ

ARALIK 2019
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Doktora Tezi

Başlığı: Atık Mermer Tozu ve Lastik Agrega Kullanılarak Üretilmiş Çevre Dostu
Betonların Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Belirlenmesi

Yazarı: Mehmet Esen EREN

İlk Teslim Tarihi: 24.12.2019

Savunma Tarihi: 17.1.2020

TEZ ONAYI

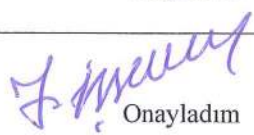
Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ  Onayladım
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Başkan: Prof.Dr.Ragıp İNCE  Onayladım
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye: Prof.Dr.Bahar DEMİREL  Onayladım
Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye: Dr.Öğr.Üyesi Ahmet BENLİ  Onayladım
Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye: Dr.Öğr.Üyesi Fethi İŞSEVER  Onayladım
Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Atık Mermer Tozu ve Lastik Agregası Kullanılarak Üretilmiş Çevre Dostu Betonların Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Belirlenmesi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

24/12/2019

Mehmet Esen EREN



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında maden sektörünün çevre kirliliği açısından önemli bir problemi olan atık mermer tozu ve otomotiv sektörünün çevre kirliliği açısından önemli bir problemi olan atık lastiklerin etkili bir şekilde tüketilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefin ekonomik şekilde gerçekleştirilmesinin en uygun yollarından biri atık mermer tozu ve atık lastiklerin kullanılarak çevre dostu beton üretilmesidir. Bu atık malzemelerin kullanılarak üretilen betonların taze ve sertleşmiş özelliklerinin belirli koşullara uygun olması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, atık mermer tozu ve atık lastik agregaları birlikte kullanarak çevre dostu betonlar üretmek ve üretilen betonlarda bu atık malzemelerin taze betonun işlenebilirliği ve sertleşmiş betonun dayanımı üzerine olan etkilerini belirlemektir.

Bu tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle benden yardım ve desteğini esirgemeyen, varlığı, kişiliği ve benim için yaptıklarıyla her zaman için kalbimde ayrı bir yeri olan ve çok saygı duyduğum danışman hocam Sayın Doç. Dr. Kürşat Esat Alyamaç'a, teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tez izleme komitemde bulunan ve çalışmalarımı detaylı bir şekilde takip edip, her türlü konuda her zaman yanımda olan değerli hocalarım Prof. Dr. Bahar Demirel'e ve Prof. Dr. Ragıp İnce'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın her safhasında bana destek olan ve deneysel çalışmalarında yardımcı olan çalışma arkadaşlarım, İnş. Müh. Noorul Amin Mawlawizade'ye, İnş. Müh. Rahimgul Rahimi'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda yapı laboratuvarında her konuda bana yardımcı ve destek olan Teknisyen Seyfettin Çiçek'e çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmada kullanılan yapı kimyasalları malzemelerinin tedarik edildiği CHRYSO-Kat Katkı Malzemeleri firmasına ve temsilcisi Tamer Şener'e teşekkür ederim.

Bilgisayar ve yazılım destekli çalışmalarda her türlü desteği veren Blg. Müh. M. Emin Şalva'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep yanımda olan, her zaman beni destekleyen başta kıymetli eşim İnş. Müh. Melike Eren'e ve sevgili çocuklarıma, değerli ablam Doç. Dr. Emine Şalva'ya ve sevgili Aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık, 2019

Mehmet Esen EREN
ELAZIĞ – 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KİSALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. ÇEVRE DOSTU BETON	4
2.1. Mermer Tozu Kullanılarak Üretilen Betonlar	7
2.2. Atık Lastik Agrega Kullanılan Betonlar	13
2.3. Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Betonlar	16
2.4. Çevre Dostu Beton Metodolojisi	19
3. MATERYAL VE METOT.....	21
3.1. Kullanılan Malzemeler Ve Özellikleri	22
3.1.1. Agregalar	22
3.1.2. Çimento	22
3.1.3. Mermer tozu	23
3.1.4. Atık lastik agregası	23
3.1.5. Karışım Suyu	24
3.1.6. Uçucu kül	24
3.1.7. Kimyasal Katkı	24
3.2. Beton Karışım Hesapları	25
3.2.1. Atık Mermer Tozu ile Üretilmiş Çevre Dostu Betonların Karışım Hesapları	25
3.2.2. Atık Mermer Tozu, Atık Lastik Agrega ve Uçucu Kül ile Üretilmiş Çevre Dostu Betonların Karışım Hesapları	27
3.3. Beton Numunelerinin Hazırlanma Yöntemi	29
3.3.1. Atık Mermer Tozlu ile Üretilen Çevre Dostu Betonlar	29
3.3.2. Atık Lastik Agrega, Mermer Tozu ve Uçucu Kül ile Üretilen Betonlar	30
3.4. Slump Testi (Çökme Deneyi) Taze Beton Deneyi	31
3.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri	33
3.5.1. Basınç Deneyi	33
3.5.2. Kılcallık Deneyi	34
4. BULGULAR	40
4.1. Atık Mermer Tozu ile Yapılan Deneyler	40
4.2. Atık Lastik Agrega ve Mermer Tozu ile Yapılan Deneyler	48
4.3. Atık Lastik Agrega ve Mermer Tozu ile Yapılan Permeabilite Deneyleri	55

5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	62
5.1. Tepki Yüzeyi Metodu	62
5.2 Geliştirilen Modeller	65
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Atık Mermer Tozu ve Lastik Agregası Kullanılarak Üretilmiş Çevre Dostu Betonların Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Belirlenmesi

Yük. Müh. Mehmet Esen EREN

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Anabilim Dalı

Aralık 2019, Sayfa :x+97

Bu çalışmada maden sektörünün çevre kirliliği açısından önemli bir problemi olan atık mermer tozu ve otomotiv sektörünün çevre kirliliği açısından önemli bir problemi olan atık lastiklerin etkili bir şekilde tüketilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefin ekonomik şekilde gerçekleştirilmesinin en uygun yollarından biri atık mermer tozu ve atık lastiklerin kullanılarak çevre dostu beton üretilmesidir. Bu atık malzemelerin kullanılarak üretilen betonların taze ve sertleşmiş özelliklerinin belirli koşullara uygun olması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, atık mermer tozu ve atık lastik agregaları birlikte kullanarak çevre dostu betonlar üretmek ve üretilen betonlarda bu atık malzemelerin taze betonun işlenebilirliği ve sertleşmiş betonun dayanımı üzerine olan etkilerini belirlemektir. Bu çalışma iki temel adımda yürütülmüştür.

Birinci adım deneylerde atık mermer tozu kullanılarak farklı karışım oranlarına sahip çevre dostu betonlar üretilmiştir. Çevre dostu betonlar üretilirken %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında mermer tozları, kum ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. Üretilen betonlarda hem çimento dozajı hem de agregası granülometreleri farklı değerlerde kullanılmıştır. Böylece işlenebilirlik ve dayanım üzerine en etkili parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Üretilen çevre dostu betonların, taze ve sertleşmiş beton özellikleri tespit edilmiştir.

İkinci adım deneylerde ise atık mermer tozu ve atık lastik agregası birlikte kullanılarak farklı karışım oranlarına sahip çevre dostu betonlar üretilmiştir. Bu kısmın amacı, atık mermer tozu ve atık lastik agregası kullanarak çevre dostu betonlar üretmek ve üretilen betonlarda bu atık malzemelerin taze beton özelliklerini, sertleşmiş betonun dayanımı ve dayanıklılığı üzerine olan etkisini belirlemektir. Burada ayrıca puzolanik bir atık malzemesi olan uçucu kül de kullanılmıştır. Üretilen çevre dostu betonların, taze ve sertleşmiş beton özellikleri tespit edilmiştir.

Elde edilen deney sonuçları, tepki yüzeyi metodu ile analiz edilmiş ve iki adet matematiksel model geliştirilmiştir. Model-1 ile mermer tozu ile üretilmiş çevre dostu betonların karışım hesabı, Model-2 ile mermer tozu, atık lastik agregası ve uçucu kül ile üretilmiş çevre dostu betonların karışım hesabı yapılabilmektedir.

Sonuç olarak, sadece mermer tozu kullanılarak veya mermer tozu, atık lastik agregası ve uçucu kül kullanılarak çevre dostu beton üretmenin mümkün olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu beton türlerinin kullanımının yaygınlaşması için iki farklı karışım hesap metodu geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çevre Dostu Beton, Mermer Tozu, Atık Lastik Agregası, Uçucu Kül, Atık yönetimi, Tepki Yüzeyi Metodu

ABSTRACT

Determination of Strength and Durability Performance of Eco-efficient Concrete Produced with Marble Waste Powder and Waste Tire Aggregate

Yük. Müh. Mehmet Esen EREN

Ph.D. Thesis

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction

December 2019, Sayfa :x+97

In this study, it is aimed to efficiently consume waste marble powder, which is an important problem in environmental pollution of mining sector and waste tires, which is an important problem in environmental pollution of automotive sector. One of the most convenient ways to achieve this goal economically is to produce eco-efficient concrete using waste marble powder and waste tires. The fresh and hardened properties of the concretes produced using these waste materials must be suitable for certain conditions. The aim of this study is to produce eco-efficient concretes by using waste marble powder and waste tire aggregates together and to determine the effects of these waste materials on the workability of fresh concrete and the strength of hardened concrete. This study was carried out in two basic steps.

In the first step experiments, eco-efficient concretes with different mixing ratios were produced by using waste marble powder. When producing eco-efficient concrete, 0% to 50% marble powders were replaced with sand by volume. Both cement dosage and aggregate granulometries were used at different values in the produced concrete. Thus, it is aimed to determine the most effective parameters on machinability and strength. Fresh and hardened concrete properties of eco-efficient concrete produced were determined.

In the second step experiments, waste marble powder and waste tire aggregate were used together to produce eco-efficient concrete with different mixing ratios. The aim of this study is to produce eco-efficient concrete by using waste marble powder and waste tire aggregate and to determine the effect of this waste material on fresh concrete properties, strength and durability of hardened concrete. It is also used here in fly ash, a pozzolanic waste material. Fresh and hardened concrete properties of eco-efficient concrete produced were determined.

The test results were analyzed by reaction surface method and two mathematical models were developed. Mixture calculations can be made with these methods which is Model-1 and Model-2.

As a result, it was found that it is possible to produce eco-efficient concrete using only marble powder or using marble powder, waste tire aggregate and fly ash. In addition, two different mixture calculation methods have been developed in order to spread the use of these concrete types.

Keywords: Eco-efficient Concrete, Marble Powder, Waste Tire Aggregate, Fly Ash, Waste Management, Response Surface Method

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1.	Atık lastik agregalar	24
Şekil 3.2.	Mermer tozu ile üretilmiş çevre dostu beton numuneler	29
Şekil 3.3.	Lastik agrega, mermer tozu ve uçucu kül ile üretilmiş çevre dostu beton numuneler	30
Şekil 3.4.	Permeabilite deney numunesi	35
Şekil 4.1.	Taze betonda çökme miktarı ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki	41
Şekil 4.2.	Taze betonda çökme miktarı ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki	43
Şekil 4.3.	7 günlük beton basınç dayanımları ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki	44
Şekil 4.4.	Beton basınç dayanımları (7 günlük) ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki	46
Şekil 4.5.	Beton basınç dayanımları (28 günlük) ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki	48
Şekil 4.6.	Atık lastik agrega oranı ile betonun çökme değeri arasındaki ilişki	49
Şekil 4.7.	Uçucu kül oranı ile betonun 3 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	51
Şekil 4.8.	Uçucu kül oranı ile betonun 7 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	52
Şekil 4.9.	Uçucu kül oranı ile betonun 28 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	53
Şekil 4.10.	Uçucu kül oranı ile betonun 90 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	54
Şekil 4.11.	Uçucu kül oranı ile farklı beton karışım oranlarına sahip betonların 3 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	55
Şekil 4.12.	320 kg/m ³ ve 0.55 S/Ç için su işleme derinliği ve zaman grafiği	56
Şekil 4.13.	400 kg/m ³ ve 0.52 S/Ç için su işleme derinliği ve zaman grafiği	57
Şekil 4.14.	400 kg/m ³ ve 0.47 S/Ç için su işleme derinliği ve zaman grafiği	58
Şekil 4.15.	480 kg/m ³ ve 0.50 S/Ç için su işleme derinliği ve zaman grafiği	59
Şekil 5.1.	Model-1a'ya ait iki boyutlu etki grafiği	68
Şekil 5.2.	Model-1a'ya ait üç boyutlu yüzey tepkisi	68
Şekil 5.3.	Model-1a'ya ait pertürbasyon grafiği	69
Şekil 5.4.	Model-1b'ye ait iki boyutlu etki grafiği	69
Şekil 5.5.	Model-1b'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi	70
Şekil 5.6.	Model-1b'ye ait pertürbasyon grafiği	70
Şekil 5.7.	Model-1c'ye ait iki boyutlu etki grafiği	71
Şekil 5.8.	Model-1c'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi	71
Şekil 5.9.	Model-1c'ye ait pertürbasyon grafiği	72
Şekil 5.10.	Model-2a'ya ait iki boyutlu etki grafiği	75
Şekil 5.11.	Model-2a'ya ait üç boyutlu yüzey tepkisi	75
Şekil 5.12.	Model-2a'ya ait pertürbasyon grafiği	76
Şekil 5.13.	Model-2b'ye ait iki boyutlu etki grafiği	76

Şekil 5.14. Model-2b'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi.....	77
Şekil 5.15. Model-2b'ye ait pertürbasyon grafiği	77
Şekil 5.16. Model-2c'ye ait iki boyutlu etki grafiği	78
Şekil 5.17. Model-2c'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi	78
Şekil 5.18. Model-2c'ye ait pertürbasyon grafiği.....	79



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1.	Agregaların granülometri eğrileri.....	22
Tablo 3.2.	Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	23
Tablo 3.3.	Atık mermer tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	23
Tablo 3.4.	Kimyasal katkının fiziksel ve kimyasal özellikleri	25
Tablo 3.5.	Mermer tozu kullanılmış betonların karışım miktarları (B granülometrisi)	26
Tablo 3.6.	Mermer tozu kullanılmış betonların karışım miktarları (A granülometrisi).....	26
Tablo 3.7.	Mermer tozu kullanılmış betonların karışım miktarları (C granülometrisi)	27
Tablo 3.8.	Mermer tozu, lastik agrega ve uçucu kül kullanılmış betonların karışım miktarları	28
Tablo 3.9.	Çökme deneyi sınıflandırması.....	31
Tablo 3.10.	Mermer tozu ile yapılan deneylere ait çökme testi sonuçları	32
Tablo 3.11.	Atık lastik agrega, mermer tozu ve uçucu kül ile yapılan deneylere ait çökme testi sonuçları	32
Tablo 3.12.	Mermer tozu ile yapılan deneylere ait basınç dayanımı test sonuçları (MPa).....	33
Tablo 3.13.	Atık lastik agrega ve mermer tozu ile yapılan deneylere ait basınç dayanımı test sonuçları .	34
Tablo 3.14.	İkinci adım deney serilerine ait permeabilite deneyi sonuçları-1	36
Tablo 3.15.	İkinci adım deney serilerine ait permeabilite deneyi sonuçları-2.....	37
Tablo 3.16.	İkinci adım deney serilerine ait permeabilite deneyi sonuçları-3.....	38
Tablo 3.17.	İkinci adım deney serilerine ait permeabilite deneyi sonuçları-4.....	39
Tablo 4.1.	Başlangıç ve nihai permeabilite hesaplamaları	60
Tablo 5.1.	Değişkenler ve değişim aralıkları.....	66
Tablo 5.2.	Varyans analizlerinin (ANOVA) sonuçları	67
Tablo 5.3.	Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları	67
Tablo 5.4.	Değişkenler ve değişim aralıkları.....	73
Tablo 5.5.	Varyans analizlerinin (ANOVA) sonuçları	73
Tablo 5.6.	Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a, b, c	: Birim hücre örgü parametreleri.
$\mathcal{E}$	: Sistemin hatasıdır
y'	: Gerçekleşen Tepki
y	: Beklenen tepki
β_0	: Model sabiti
$\beta_i \beta_{ii} \beta_{ij}$	: Değişken katsayıları
$x_i x_j$	: kodlanmış bağımsız değişkenler
ϵ_0	: Deneysel hata

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ANOVA	: Varyans analizi
CNT	: Karbon nanotüp
GNP	: Geliştirilmiş bir çeşit kimyasal beton katkısı türü
GSYH	: Gayri safi milli hasıla
GO	: Grafen Oksit
HVFA	: Yüksek hacimli uçucu kül içeren beton
IPCC	: Hükümetler arası iklim değişikliği paneli
MATLAB	: Matematiksel bir programlama yazılımı
MT	: Mermer tozu
OPC	: Geleneksel Portland Çimentosu ile üretilen beton
rGO	: Azaltılmış Grafen Oksit
T	: Lastik agrega
TYM	: Tepki yüzeyi metodu
UK	: Uçucu kül

1. GİRİŞ

Uygarlık tarihi ile ş u an dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi olan inşaat harcının tarihi neredeyse eşdeğerdir. 5000 yıl önce Mısır Piramitlerinin yapımında kullanılmış olan harç, aynı zamanda Romalılar için inşaat mühendisliğinin en büyük öneme sahip yapı malzemesi olarak kullanılmasıyla geçmişten günümüze kadar kullanımı süregelmiştir [1]. Harcın bağlayıcısı çimento olduğu zaman beton olarak isimlendirilmektedir. Beton günümüzde de en çok kullanılan yapı malzemesidir. Her yıl yaklaşık olarak 25 milyar ton beton üretildiği ve bu rakamın yılda kişi başına düşen miktarının 3.8 tonun üzerinde olduğu öngörülmektedir [2]. Yapı malzemeleri içinde beton, enerji tüketimi ve hacim başına karbon salınımı açısından, çelik gibi diğer yapı malzemelerine göre daha sürdürülebilirdir. Ancak, diğer yapı malzemelerine kıyasla çok yüksek hacimlerde tüketildiğinden bu avantaj ortadan kalkmıştır. Betonun ana bağlayıcısı olan Portland çimentosu üretimi, dünyadaki karbon salınımının %8'ine neden olurken, toplam enerji miktarının %3'ünü tek başına kullanmaktadır. Diğer yandan beton endüstrisi doğal agrega ve tatlı su tüketiminde yine en üst sırada yer alıyor. Betonun her geçen gün artan tüketim miktarları göz önüne alındığında gelecekte doğal kaynakların çok daha büyük ölçüde tükenmesine sebep olacağı ve aşırı çevre kirliliği oluşturacağı gerçeği kaçınılmazdır. Bu nedenle doğal kaynakları korurken çevre kirliliğini en asgariye düşürecek şekilde beton üretilmesi, yani çevre dostu beton üretilmesi ve kullanılması şarttır [3].

Endüstri ve teknoloji geliştikçe ve insan nüfusu arttıkça, küresel katı atık üretimi her geçen gün daha da hızlanmaktadır [4]. 20. yüzyıldan bu yana, dünyanın hızla büyüyen ekonomisinden yararlanan küresel inşaat endüstrisi, her geçen gün büyümeye devam etmektedir. Betonun yaygın kullanımı, insanların yaşadıkları ortamların kalitesini iyileştirmiştir, ancak diğer taraftan enerji ve çevreyle ilgili de büyük bir baskı getirmiştir [5]. Doğal kaynakların her geçen gün azaldığı ve bu nedenle ekonomik açıdan değerlendirildiği günümüzde, bu durum inşaat yapım maliyetlerini her geçen gün daha da artırmaktadır. Ayrıca artan inşaat hacmi nedeniyle oluşan atıklar nedeniyle çevreyle ilgili problemler artmıştır. Bu atık malzemelerin beton içerisinde kullanılmasıyla hem beton üretim maliyeti düşürülecektir, hem de bu atık malzemelerin kullanılmasıyla doğadan uzaklaştırılması sağlanacaktır [6]. Diğer yandan da beton üretimi sırasında yeni doğal kaynakların tüketimi azalacağından doğa korunmuş olacaktır. Tüm bu nedenlerden dolayı, çevre dostu beton teknolojisinin gelişmesi ve yaygınlaşması çok önemli bir araştırma konusu haline gelmektedir [4].

Günümüzde çevre dostu beton üretiminde birçok yöntem mevcuttur [3]. Eski yapılara ait molozların ayrıştırılarak içerisinden temin edilen agregaların yeniden kullanılmasıyla elde edilen geri dönüştürülmüş çevre dostu betonlar bunlara örnektir. Böylece hem yeni agrega temini için doğa bozulmamış olacak, hem de bu atık molozların çevrede oluşturacağı kirlilik de önlenmiş olacaktır [7]. Bu yöntem her ne kadar mantıklı olsa da beton içerisinde ki doğaya en çok zarar

veren çimento kullanımını azaltmadığı için ve uygulanabilirliğinin yüksek teknoloji gerektirdiğinden dolayı yeterli değildir. Beton içerisine doğadaki atık malzemelerin katılarak kullanılması ile bu atıkların bertarafı sağlanırken, beton içerisindeki kullanılan çimento miktarını azaltmaya yönelik yöntemler daha uygun olacaktır [8]. Literatürde, kireçtaşı tozu, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu, atık katı kül, uçucu kül, silika, duman, kâğıt külü vb. gibi malzemeler ile yapılmış birçok çalışma mevcuttur [9]. Bunlar dışında son zamanlar da atık mermer tozu ve atık lastik agregalar ile üretilen çevre dostu betonlar ile ilgili çalışmalar sürdürülmektedir.

Mermer blok taşlarının kesilmesi ve işlenmesi sonucu ortaya çıkan atık mermer çamuru stoklanamadığı ve kullanılamadığı için doğaya atılmaktadır [10]. Mermer endüstrisinin atıkları, sektörün başlangıcından bu yana büyük bir çevre sorunu haline gelmiştir ve mermer çamuru üç ana soruna neden olabilir; “çevre kirliliği, çevre sağlığı ve ekonomik kayıp”. Bu nedenle, atık mermer çamurunun yeniden kullanılması, çevresel ve ekonomik kazanımlar elde etmek için bir avantaj sağlayacaktır. Bu nedenle, mermer sektöründeki tüm atıkların alternatif sektörlerde hammadde olarak kullanılması, hem çevre kirliliğinin önlenmesi hem de tüm atıkların ekonomi için kullanılması açısından büyük önem taşımaktadır [11]. Beton üretiminde atık mermer çamurunu tekrar kullanmak için, önce toz haline getirilerek kurutulur ve öğütülür [12]. Atık mermer tozu inşaat sektöründe beton içerisinde agregalar veya çimento ile yer değiştirilerek kullanılmaktadır [13]. Üretilen betonun taze ve sertleşmiş özellikleri, karışım tasarım yöntemine bağlıdır. Bu sebeple doğru bir karışım tasarımı seçimi üretim için en kritik noktadır. Bu kapsamda çeşitli sayısal ve grafiksel karma tasarım modelleri geliştirilmiştir [14].

Nüfus artışı ve bunun sonucunda ulaşım ihtiyacındaki artış sonucu otomotiv sektörü çok büyük bir hacme ulaşmıştır. Kayıtlara göre yıllık lastik üretimi dünya çapında 1.5 milyarı aşmış, atık lastik sayısı ise yıllık yaklaşık 1 milyar seviyesine ulaşmıştır [15]. Atık lastiklerin büyük bir kısmı geri dönüştürülemeden doğaya atıldığı için tüm dünyada çok ciddi çevre ve sağlık problemleri oluşturmaktadır. Bu atıklar çok ciddi hacme ulaştığı için artık depolama şansı kalmamıştır [16]. Lastiklerin sahip olduğu kimyasal yapıları karmaşık olduğundan geri dönüşümü çok zordur. Bu nedenle beton içerisinde kullanılarak ortadan kaldırılmaları ve faydalı hale getirilmesi ihtiyaç haline gelmiştir [17]. İlk kez 1980 yılında Amerika’da Prof. Rad ilk kez atık araç lastiklerinden temin edilmiş malzemeyi betona katarak kullanmayı denemiştir. Yaptığı denemelerde betonun basınç dayanımında ki yüksek kaybı gözlemleyince, taşıyıcılık özelliği olmayan yerlerde kullanılmasını önermiştir [18]. Günümüzde atık lastik agrega kullanılarak üretilmiş betonların taze beton özelliklerine, mekanik dayanımlarına ve beton dayanıklılığı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda lastik oranı arttıkça taze betonun işlenebilirliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Mekanik dayanım ve beton dayanımlarında atık lastik

oranı arttıkça ters orantı ile düşüş gözlemlenirken, elastiklik ve su geçirgenliği yönünde ise doğru orantılı bir seyir izlendiği görülmektedir [19].

Bu çalışmanın ana amacı atık mermer tozu ve atık lastik agregası kullanarak, beton sektöründe kabul görebilecek çevre dostu beton karışımları elde etmektir. Bu amaçla ilk önce sadece mermer tozu kullanılarak çevre dostu betonlar elde edilmiştir. Elde edilen bu karışımlara ait deney sonuçları tepki yüzeyi metodu ile analiz edilerek, bu tür betonların beton karışım hesaplarının pratik bir şekilde yapılabilmesi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Tepki yüzeyi metodu beton özellikleri gibi birçok farklı parametreye bağlı analizlerin yapılabilmesi için en uygun istatistik metotları arasında yer almaktadır [10]. İkinci adımda ise, atık mermer tozu, atık lastik agregası ve uçucu kül kullanılarak çevre dostu beton karışımları elde edilmiştir. Elde edilen bu karışımlara ait deney sonuçları tepki yüzeyi metodu ile analiz edilerek, bu tür betonların beton karışım hesaplarının pratik bir şekilde yapılabilmesi için ikinci bir matematiksel bir model geliştirilmiştir. Sonuç olarak mermer tozu ve atık lastik agregası kullanılarak uygun çevre dostu betonlar elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu çevre dostu betonlara uygulamada yaygın olarak kullanılabilmesi için geliştirilen matematiksel modellerin önemli katkılar yapacağı düşünülmektedir.

2. ÇEVRE DOSTU BETON

Yeşil beton olarak da isimlendirilen çevre dostu betonlar, doğal kaynakların tüketimi ile enerji üretimi yapılması sonucu ortaya çıkmış endüstriyel atıkların kullanılarak azaltılması amacıyla üretilmektedirler [20]. Yeşil betonun isminin renk ile bir ilgisi bulunmamaktadır. Bu isim doğaya olan faydasını düşündürmek amacıyla tanımlanmıştır. Beton imalatlarının, yapısal tasarım, yapım ve servis ömrü göz önüne alınarak ekonomik olması amaçlanır. Bu amaçla, beton üretiminde atık ürünler (malzemeler) kullanılır. Atık malzemeler betonda, çimento veya agrega ile yer değiştirilerek kullanılırlar. Bu kullanım beton maliyeti ve enerji tüketimi hususunda önemli avantajlar sağlamaktadır [21]. Günümüzde Dünya genelinde yıllık beton üretim miktarı 10 milyar metre küpü aşmış durumdadır. Çimento betonun ana bileşenlerinden biridir ve betonun dayanım kazanması için yeterli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Ancak bunun yanında ekonomik ve çevreci olarak üretilmesi amaçlanmaktadır [22]. Bu yüzden daha çevre dostu bir çimento ile yapılan, daha çevre dostu bir beton üretmek sadece doğa için değil, aynı zamanda bu özel ekonomik pazar için de oldukça önemlidir [23]. Betonun Dünyada en çok üretilen yapı malzemesi olduğu, çimentonun betondaki kullanım miktarı ve çimento üretilirken oluşan karbondioksit salınımı düşünülürse, çevre dostu bir beton üretmek için mutlaka çimentonun dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır [24].

Geleneksel beton, çimento, agrega ve su ile üretilmektedir. Eğer geleneksel beton üretmek için kullanılan bileşenlerden birinin veya birkaçının yerine atık malzemeler kullanılarak beton elde ediliyorsa, elde edilen bu beton türü çevre dostu beton olarak adlandırılmaktadır [25]. Geleneksel betonun mevcut ekonomik ve çevresel dezavantajlarından ve çevre dostu betonun sahip olduğu faydalardan dolayı, çevre dostu beton geleneksel betonun yerine daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Çevre dostu betona olan talebin artmasında, doğal kaynakların dünyamızda hızla tükenmesi ve ulusların sera gazını azaltma isteği büyük rol oynamaktadır. Çevre dostu beton, çevresel ve teknik yönden birçok avantajlar ve ekonomik yönden faydalar sağlamaktadır. Betonda kullanılan her atık malzeme betona farklı özellikler katmaktadır. Bu atık malzemeler sayesinde taze beton, sertleşmiş beton ve durabilite özelliklerinde önemli değişimler elde edilmektedir. Atık malzemelerin, beton üretiminde kullanılması, sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan büyük avantajlar sağlamaktadır [26]. Özellikle büyük çaplı projelerde çevre dostu betonun küresel olarak kullanılmasının benimsenmesini teşvik etmek için uygun standartlar, daha fazla tanıtım projeleri, yeterli eğitim, halkın bilinçlendirilmesi, disiplinler arası işbirlikleri ve daha fazla araştırma ve geliştirme yapılması gerekmektedir [27].

20. yüzyılın sonunda, modern toplumlar için sürdürülebilir kalkınma ve çevre koruma konuları ana hedefler olmuştur. Buradaki en önemli hedef artan nüfusun ihtiyaçlarının karşılanması için yapılacak yapılarda doğal kaynakların tüketiminin korunması, çevre kirliliğinin

azaltılması ve enerji tasarrufunun sağlanmasıdır [28]. Bunlar inşaat mühendisliği ve malzeme bilimi dallarını ilgilendiren önemli konulardır. Ancak bu bağlamda yapı malzemesi endüstrisinin karşılaştığı ana problemler şunlardır:

Doğal agregaların tükenmesi, yüksek Portland çimentosu tüketimi ve buna bağlı ortaya çıkan yüksek miktarda karbondioksit salınımı, inşaat yapımı ve yıkımları sırasında ortaya çıkan molozlar, atık ve toprak dolgular ile doğal alanların tükenmesidir. Yeni inşaat yapımları ve mevcut yapıların yıkılmasının bir sonucu olarak ortaya çıkan molozlar birçok gelişmiş ülkede olduğu gibi, Avrupa Birliği'ndeki en büyük çevre sorunlarından biridir [29]. Örneğin, AB'de yaklaşık 180 milyon ton/yıl veya 480 kg/kişi/yıl inşaat atığı yani molozların ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Son yıllara kadar bu atıklardan kurtulmanın normal yolu yani atık yönetimi şekli, bu çıkan atıkların doğada geniş alanlara dökülerek saklanması, rezerv edilmesiydi. Bu şekilde, bu atıklardan ciddi büyüklükte devasa çöp alanları oluştu ve geniş alanlar işgal edilmiş oldu, bu da ciddi bir çevre problemi meydana getirdi [30]. Doğal kaynaklar olan agregaların hızla azalması ve agrega tüketiminde ki artış, yeni bir çözüm ihtiyacının bulunmasını gerekli kılmıştır. Atık betondan geri dönüştürülerek elde edilen geri dönüştürülmüş agrega, mevcutta ki doğal kaynakların korunması açısından da uygulanabilir bir çözüm getirmektedir [31]. Geri dönüşümlü agrega ile yapılan üretim çevre dostu betonun önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Ancak Dünyadaki atık sadece inşaat atıkları ile sınırlı değildir. Birçok üretim sonucunda önemli miktarlarda atık malzemeler ortaya çıkmaktadır.

Şimdiye kadar, yapısal bir materyal olan beton için sürdürülebilir çözümler bulmak adına çok çaba sarf edilmiştir. Burada iki önemli eğilim ortaya çıkmıştır. Birincisi, beton içindeki doğal agregaların geri dönüştürülmüş olanları ile yer değiştirilmesi; ikincisi ise, çimentonun bir kısmının tamamlayıcı malzemeler ile kısmi yer değiştirmesidir. Bunlara örnek olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silika duman vb. verilebilir. Özellikle beton sektöründen kaynaklanmayan atıkların betondaki kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır [2]. Termik santrallerin baca filtrelerinde biriken kül, Türkiye'de her yıl milyonlarca metreküp seviyesindedir [32]. Uçucu kül olarak isimlendirilen bu atık malzemenin depolanması mümkün değildir. Benzer şekilde maden endüstrisinin önemli bir kolu olan mermer işletmelerinde atık mermer çamuru önemli bir çevre sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır. Her iki toz malzemenin betonda kullanımı ile hem ekonomik hem de çevreci beton elde edilmektedir [33]. Bu malzemeler hem agrega hem de çimento ile yer değiştirilerek, beton üretiminde önemli miktarlarda kullanılabilir. Bunların yanında yine başka sektörlerin atıkları olan malzemeler iri ve ince agrega olarak betonda kullanılabilir. Bunun da en iyi örneklerinden biri atık lastik agregalardır. Hedeflenen beton özelliklerine sahip çevre dostu betonlar hem ekonomik hem de çevresel önemli katkılar sağlamaktadırlar [34].

Beton üretim aşamasında tüketilen enerji miktarı bakımından ve çelik gibi diğer yapı malzemelerine göre birim hacim başına oluşan karbon salınımı bakımından daha sürdürülebilir bir malzemedir. Ancak, betonun tüketim miktarının günümüzde çok yüksek miktarlara ulaşmış olması onun bu sürdürülebilirlik avantajını ortadan kaldırmıştır [35]. Betonun ana bağlayıcısı olan normal Portland çimentosunun üretimi, dünyada oluşan karbon salınım oranına yaklaşık %8 oranında etki etmekte ve dünya enerjisinin %3'ünü kullanmaktadır [36]. Ayrıca, beton endüstrisi en büyük doğal agrega ve tatlı su tüketicisidir. Gelecekte daha yüksek miktarlarda kullanılacak olan beton, doğal kaynakların tükenmesine ve büyük çapta çevre kirliliğine neden olacaktır. Bu nedenle, doğal kaynakları korurken gelecekte oluşan talebede cevap vermek adına çevre dostu betona ihtiyaç duyulmaktadır. Çevre dostu beton, geleneksel Portland çimentosu ile üretilen betona kıyasla daha az enerji ve karbondioksit salınımı içeren bir beton olarak sınıflandırılabilir. Bununla birlikte, çevre dostu beton için farklı atık malzemelerin bağlayıcı ve/veya agregalar ile yer değiştirmesi gereklidir [37]. Sürdürülebilirlik konularının yanı sıra, güçlü ve dayanıklı betona sahip olma zorunluluğu, dış etkilere karşı dayanıklı yeşil betonun gelişimini teşvik etmiştir. Çevre dostu beton, geleneksel beton gibi uygun taze ve sertleşmiş özellikler sağlamasının yanında, düşük bakım maliyeti, inşaatların hızlı bir şekilde tamamlanması ve daha uzun servis ömrü avantajlarına sahiptir [3].

Bir ülkenin ekonomisinin büyüklüğü yapı alanlarının büyüklüğü ve sağlamlığı ile mümkündür. Altyapı, yollar, köprüler, binalar, havaalanları, limanlar ve konteyner terminalleri vb. bu yapı alanlarıdır. Yapılaşmaya talep arttıkça, betona ihtiyaç da artar ve bu da daha fazla çimento talebine neden olur. Çimento inşaat endüstrisinde büyük talep görmekte ve aynı zamanda üretiminin çeşitli aşamalarında tehlikeli gazlar üretmesi nedeniyle çevresel bir endişe kaynağı olmaktadır [38]. Genel olarak, beton karışımının çimento, agrega, kum, su ve tasarlanan katkı maddelerine sahip olduğu bilinmektedir. Kirliliği kontrol altına almak ve farklı endüstrilerden gelen atık malzemeleri kullanmak için artan taleple, bu standart malzemeleri alternatiflerle değiştirme girişimi çevreci beton için atılacak ilk adımdır. Basınç dayanımı, imalat süresi, maliyet etkinliği ve kirlilik seviyelerinin azaltılması üzerindeki etkileri kapsar [39]. Doğal kaynaklar sınırsız değildir, bu yüzden nihai ürünün kalitesinden ve etkili parametrelerinden ödün vermeden bunları değiştirmek için alternatifler bulunması gereklidir. Çimento fırınları tehlikeli gazlar üretir ve küresel ısınmaya sebep olurlar. İnsanlar dışındaki diğer canlılarda çimento fabrikalarının neden olduğu kirlilikten olumsuz yönde etkilenmektedir [40]. Katı atık yönetimi, ürünlere göre endüstriyel atık miktarının artmasından dolayı önemli bir husustur. Bu, arazi depolama sorunlarını ve atık malzemelerin geri dönüşüm maliyetini arttırmaktadır. Bu malzemelerin çevre dostu betonda kullanılması, bertaraf endişesini azaltmak için çok önemli bir seçenektir. Çevre dostu beton, üretim aşamasında atık malzemeleri kullandığından dolayı adeta beton teknolojisinde yeni bir çağ açmaktadır [41].

Atık ürünler doğrudan çimento üretimi içinde kullanılabilir ve çimento üretimi sırasında enerji tüketiminden tasarruf edilmesini sağlarlar. Bu atık malzemeler puzolan özelliklerine sahiptir [24].

Bu tez çalışmasında Türkiye içinde önemli çevre problemi haline gelen mermer tozu, atık lastik ve uçucu kül kullanılarak, çeşitli çevre dostu beton karışımlar üretilmiştir. Bu malzemelerle ilgili ayrıntılı literatür araştırmaları alt bölümlerde sunulmuştur.

2.1. Mermer Tozu Kullanılarak Üretilen Betonlar

Doğal taşlar yeraltından çıkarıp ve çeşitli amaçlar için işlenirler. Doğal taşlar, mermer, granit, traverten ve oniks gibi cilalı taşlar ve bazalt, şist ve tuf gibi cilalı taşlar olmak üzere iki kategoride sınıflandırılmaktadır [42]. Taş ocağından çıkarıldıktan sonra bu tür taşlar mevcut fabrikalarda ve atölyelerde arzulanan boyutlarda kesilip ihtiyaç alanına göre işlenirler. Dünyada farklı yerlerde birçok çeşit, renk ve desene sahip mermer yatakları mevcuttur. Antik çağda, mermer aslında yapı taşı olarak kullanılmıştır. Ancak medeniyetin ilerlemesiyle birlikte mermerin dekoratif amaçlı ve sanatsal tasarımlarda kullanılması yaygınlaşmıştır [43]. Mermer günümüze kadar önemini korumuştur. Mermer, saf kireçtaşının dönüşümünden kaynaklanan metamorfik bir kayadır. Eski çağlardan beri, özellikle de dekoratif amaçlı, yapılarda kullanılan en önemli malzemelerden biridir [44].

Dünyadaki mermer rezervlerinin 15 milyar metreküpten fazla olduğu tahmin edilmektedir ve bu rezervin yaklaşık 5.2 milyar metreküp kadarının Türkiye’de olduğu tahmin edilmektedir. Mermer, dünya genelinde yaklaşık 50 ülkede, çok büyük sayıda fabrika ve atölyede işlenmektedir. Mermerin bloklar halinde çıkarılması ve işlenmesi, ülkelerin madencilik ekonomisi için hayati önem taşıyan faaliyetlerini başında gelmektedir. Bununla birlikte, mermer endüstrisinin hızlı büyümesi, çevre kirliliği açısından bazı olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Çünkü mermerin işlenmesi sonucunda atık malzemeler oluşmaktadır [45].

Mermer bloklar fabrikalarda veya atölyelerde farklı ebat ve kalınlıktaki bloklar halinde kesilir. Kaya kesme makinesinin aşırı ısınmasını ve toz oluşmasını önlemek için kesme işlemi sırasında su kullanılır. Bu işlem tozun, mermer çamurunu oluşturan su ile karışmasına neden olur. Ortaya çıkan atık malzeme, ya ilk haliyle ya da bir arıtma tesisinde susuzlaştırmanın ardından çevreye boşaltılmaktadır [46]. Bir taş ocağında işlene mermer bloğunun yaklaşık %30-40’ı çamur biçiminde atık malzeme olmaktadır [47]. Yıllık olarak, Türkiye’de yaklaşık 2.5 milyon ton mermer çamuru, mermer üretiminin bir yan ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. İşleme tesislerinin artan miktarlarda ki bu atık malzemeyi depolama imkânları teknik açıdan mümkün değildir. Bu nedenle, bu atık malzemenin yeniden değerlendirilmesi ve kullanılması çevresel ve finansal açıdan büyük önem taşımaktadır [48]. Mermer çamuru, kurutulup, öğütülerek mermer tozu haline

getirilir. Mermer tozu, hayvan yemi üretimine ek olarak kâğıt, boyama ve plastik endüstrileri, hayvancılık ve kireç ve çelik üretim endüstrileri de dâhil olmak üzere çok çeşitli endüstriyel kullanım alanlarına sahiptir [49]. Bununla birlikte, mermer tozu bu endüstrilerde kullanılmak üzere fiziksel ve kimyasal olarak işlenmelidir ve mermer tozu kullanımı mevcutta ki tüm atık madde stoklarını tüketmek için de yeterli değildir. Öte yandan, beton malzemesi yılda milyarlarca metreküpü aşan kullanımıyla, atık tüketimi için avantajlı bir duruma sahiptir. Bu nedenle mermer tozunun, beton ve çimento esaslı ürünlerde kullanılması ve kullanılmaya teşvik edilmesi önemli çevresel ve ekonomik katkılar sağlayacaktır [50].

Mermer, eski zamanlardan beri kullanılan en yaygın yapı malzemelerinden biridir [51]. Mermer, inşaatta ve dekorasyon amaçlı işlerde kullanılır. Desenleri ve mineralojik bileşenleri bulundukları bölgeye bağlı olarak değişir. Mermer, taş ocaklarında veya işleme tesislerinde büyük miktarda atık üreten farklı uygulamalarla işlenir. İşleme sırasında, mermerin yaklaşık %30'u, düzensiz ya da daha küçük boyutlu olması nedeniyle atık olur. Yarı işlenmiş bloklarda atık miktarı %2-5'tir [52]. Genel olarak, doğal taşlardan elde edilen iki farklı form vardır: Katı hali, mermer parçacıkları ve içerisine su karışımı ile oluşmuş bulamaç hali, yani mermer çamurudur [53]. Mermer tozu içeren su, mermer çamuru olarak adlandırılmaktadır. Dikey/yatay kesici veya testerede işlenen bir ton mermer taşı yaklaşık %35-45 su içeriğine sahip neredeyse bir ton çamur üretir. Özellikle kuruduktan sonra bu atık çamur, tozlardan oluşan hava kirliliği gibi çevre için riskli durumlar oluşturur ve tarım arazilerini ve yakındaki diğer alanları işgal eder, bu şekilde onları verimsizleştirir. Ek olarak, bu atık yüzey ve yeraltı su rezervlerinin kirlenmesi konusunda da büyük riskler içerir [54].

İnşaat sektöründeki mermer talebinin artması nedeniyle, üretim miktarında beklenen bir artış var. ABD (Amerika Birleşik Devletleri), Türkiye, Fransa, Belçika, Hindistan, İspanya, İtalya, Mısır, Brezilya, Portekiz ve Yunanistan önemli mermer rezervlerine sahip ülkeler arasındadır [55]. Hindistan'da mermer rezervleri Rajasthan eyaletinde bulunmaktadır. Rajasthan'ın 16 semtinde 4000'den fazla mermer ocağı ve 1100 mermer işleme ünitesi bulunuyor. Sardunya'da (İtalya) granit, üretilen ana taş olmasına rağmen, mermer de büyük miktarda üretilir. İşleme tesisleri, hem çekip çıkarılan bölge hem de sanayi ve imalat olarak belirlenmiş alanda yer almaktadır. Yılda yaklaşık 5 ile 6 milyon ton mermer çamuru üretilmektedir. Bu çamur hava kirliliğine, su kirliliğine, toprak kısırlığına ve su rezervuarlarında ki değişimlere neden olmaktadır [56].

Son zamanlarda, bazı araştırmacılar, bu atığın seramik ve inşaat endüstrisinde ikame edilerek veya katkı maddeleri olarak kullanılmasına büyük ilgi göstermektedirler [57]. Mermer çamurunun diğer geleneksel bileşenlerle birlikte kullanılmasının, tuğla kalitesinin iyileştirilmesine neden olduğu bilinmektedir [58]. Mermer tozunun bir kaynak olarak kullanılması, mermer kullanımının çevresel etkilerini azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda

sürdürülebilir kalkınmaya yol açan diğer doğal kaynakların kullanımında da azalmaya yol açacaktır [59]. Bu durum bu araştırma için ana motivasyon sebebidir.

Beton; çimento, agrega ve su karışımı olan, dünya çapında en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Küresel beton üretimi yılda yaklaşık 12 milyar tondur ve bu da yılda yaklaşık kişi başı 1 m³ civarına tekabül etmektedir. Dünyadaki doğal kaynakların en büyük tüketicilerinden biri haline gelmiştir. Beton malzemesine olan ihtiyacının 2050 yılına kadar ulaşacağı yıllık üretim miktarının 7.5 milyar m³'ten (yaklaşık 18 milyar ton) daha fazla artacağı tahmin edilmektedir. Bu kadar geniş kapsamlı beton üretimi ve kullanılması, çok yüksek miktarlarda doğal agrega kullanımına ve nihayetinde çevreye zarar veren uygulamaların ortaya çıkmasının nedeni olmaktadır [60].

Şu anda, küresel çimento üretimi yaklaşık 4.1 milyar tondur ve bu endüstri, toplam insanların mevcutta ürettiği karbondioksitin %5'ini tek başına üretmektedir [61]. IPCC'ye (Hükümetler arası iklim değişikliği paneli) göre, geçtiğimiz son 12 yıl, 1850 yılından beri yapılmış küresel yüzey sıcaklıklarının ölçümlerine göre, en sıcak yıllar olarak sıralanmaktadır [62]. Sera gazı salınımını azaltmak için acil önlemler alınmazsa, genel maliyetler ve iklim değişikliği riskleri, şu andan itibaren yılda küresel GSYH'nin (Gayri safi milli hasıla) %5'inden daha fazlasını kaybetmeye eşdeğer olacaktır. Çin, ülkesinde devam eden büyük inşaat projeleri nedeniyle çimento üretiminden kaynaklanan karbondioksit salınımının oluşturduğu toplam %5 oranının, tek başına %3'üne sebep olmaktadır. Yani çimento üretiminden kaynaklı karbondioksit salınımının yaklaşık %60'ına sadece Çin Devleti sebep olmaktadır. Konut sektörü de bu toplam salınımın kendi başına yaklaşık %67'sini oluşturmaktadır. Altyapı, ticari ve endüstriyel yapılar kalan %33'lük kısmını oluşturlar [63].

Mermer, eski çağlardan beri özellikle dekoratif amaçlı olarak, binalarda kullanılan en önemli malzemelerden biridir [64]. Bununla birlikte tozunun çevre, toprak, su ve sağlık sorunları üzerinde kötü etkileri vardır. Mermer tozu, mermer bloklarının testere ile kesilmesi ve işlenmesi sırasında ortaya çıkar. Bazı fabrikalarda flokülasyon tankı ve filtre baskı ünitesi içeren su geri dönüşüm tesisleri bulunmaktadır [65]. İşlenen mermerin yaklaşık %25'i toza veya parçalara dönüşür. Dünyada şimdiye kadar 7 milyon ton mermer üretilmiştir. Mermer endüstrisinde ki mermer tozu malzemesinin bertaraf edilmesi, günümüzde dünyada ki önemli çevre sorunlarından biridir [66]. Betonun taze ve sertleşmiş özelliklerinin sağlanması, uçucu kül, silika dumanı ve mermer tozu gibi mineral katkıları gibi bazı katkı maddelerinin kullanılması ile başarılı ve ekonomik bir şekilde yapılabilir [67].

Mermer, eski çağlardan beri yaygın olarak yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Çok ince tozdan oluşan mermer endüstrisinin mermer tozu malzemesinin bertaraf edilmesi, bugün dünya çapındaki çevre sorunlarından biridir. Mermer kesim ve şekillendirmenin bir yan ürünü olarak elde edilen mermer tozu ve parçaları beton üretiminde kullanılmak için fiziksel ve kimyasal bir

açıyla karakterize edilir [68]. Genel olarak mineral ilaveleri, taze beton ve harç performansını etkiler. Bu nedenle çimento ile birlikte mermer tozuyla hazırlanan çeşitli çimento harçları ve nihayetinde süper plastik bir karışım elde edilmeye çalışılmıştır [69].

Uygulamada genellikle mermer terimi, kolayca parlatılabilen herhangi bir kaya için de kullanılmaktadır. İş dünyasında kireçtaşı, şist, traverten ve hatta granit, mermer sayılabilir. Mermer teknik olarak ağırlıklı olarak kalsit ve/veya dolomitten oluşan metaformik bir kaya olarak tanımlanabilir [70]. Türkiye, Alp-Himalaya kuşağında ki konumundan dolayı çok sayıda mermer yatağına sahiptir. Bu yataklardan farklı renk ve desenlerde 250'den fazla mermer türü üretilmektedir. Bunlardan yüz tanesi dünya çapında iyi bilinmektedir. Sadece Afyon ilinde, imha edilen atık mermer malzemesi yaklaşık 125.000 tondur [64]. Doğal taş tozu genellikle yapı malzemeleri, tuğlalar ve seramikler, çimento katkı maddeleri, kükürt giderme işlemleri ve çeşitli alanlarda hammadde veya takviye malzemesi olarak kullanılır. Ek olarak, polimer bazlı kompozit malzemenin üretiminde doğal taş tozu olarak kullanılabilir. Ayrıca kil bazlı malzemelerin üretiminde doğal taş ve granit atıkları kullanılabilir. Kaba doğal taş atıkları agrega ve asfalt çimento dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, yapay doğal taş atıkları, polimer modifiyeli harç ve yapay mermer üretiminde ince bir agrega olarak kullanılmıştır [71]. Atık doğal taş tozu, mozaik, harç, fayans, sıva ve beyaz çimento imalatında da kullanılmıştır. Doğal taş çamurunun klinker üretmek için ve harçta katkı maddesi olarak kullanılabileceği bildirilmiştir. Doğal taş tozu atığının diğer potansiyel kullanımı taş mastik asfalt uygulamasında görülür [72]. Mermer blokların kesiminde su, soğutucu olarak kullanılır. Bununla birlikte, ince parçacıklar rüzgârın etkisiyle kolayca dağılabilir ve yağmur ve karın etkisiyle sakinleşirler. Bu nedenle, ince parçacıklar mermer blokları keserken diğer mermer atıklardan daha fazla kirliliğe neden olabilir. İnce parçacıkların üretimi (<2 mm) mermer endüstrisi için en önemli sorunlardan biridir. 1 m³ mermer blok 2 cm kalınlığında levhalar halinde kesildiğinde, ince parçacık oluşum oranı toplam miktarın yaklaşık %25'i kadardır. Günümüzde çeşitli atık malzemeleri yeniden kullanmanın alternatif yolları geliştirilmiştir. Ayrıca mermer atık agregalarının fiziksel özelliklerinin belirtilen limitler dâhilinde olduğu ve bu malzemelerin hafif ve orta yoğunlukta asfalt kaplama tabakalarında bağlayıcı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir [73]. Mermer tozları ve kireçtaşı tozları içeren betonun bazı mekanik özelliklerini araştırıldığında, test sonuçları olumlu yönde mermer tozu ile basınç dayanımı, aşınma direnci ve sodyum sülfat direncinde açık bir artış olduğunu göstermiştir [74]. Ayrıca, beton üretimi için mermer ve granit atık agregalarının kullanımı araştırılmış ve geleneksel beton karışımlarının mekanik özelliklerini, işlenebilirliğini ve kimyasal direncini artırmak için kullanılabileceği belirtilmiştir [75].

Kireçtaşı kökenli atık madde olan atık mermer tozu ayrıca ciddi bir çevre sorununa neden olur. Sadece İscehisar-Afyonkarahisar bölgesinde 24 mermer ocağı ve mermer bloklarının kesilmesi ve parlatılması için 400 mermer işleme tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerin atıkları

bölgede çok miktarda yapay tepeler oluşturur ve çevre kirliliğine neden olur. Yapılan çalışmalar ile bu atıkların yapısal malzemeler de kullanılarak azaltılması hedeflenmiştir. Böylece doğada oluşan mermer tozu kirliliğinin önüne geçilebilecektir [64]. Mermer ve granit içeren numunelerde, çimento ve agrega gibi katkı maddeleri arasında çok daha iyi bir bağ vardır. Ayrıca mermer ve granit yer değişimlerinin iyi yoğunlaştırılmış bir matris oluşturduğu söylenebilir. Bu çalışmalar ile geleneksel beton karışımlarının mekanik özelliklerini, işlenebilirliğini ve kimyasal direncini geliştirmek için kullanılabileceğini göstermektedir [76].

Taş ocaklarının sürekli tükenmesi nedeniyle, inşaat malzemeleri çevreyle ilgili karakteristik özellikleri bakımından daha fazla değerlendirilmektedir. Cezayir’de teknoloji yetersizliği ve bilim dışı mermer ocağı çalışma yöntemleri sonucu bu değerli minerale normalde olması gereken miktarından çok daha fazla miktarda mermer atığı meydana getirdi ve israfa sebep oldu. Atık malzemelerin doğada bırakılması da ciddi çevre sorunlarına neden oluyor [75]. Ek olarak, mermer kesim endüstrisi yüksek miktarda atık üretmektedir [77]. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, mermer atıklarının sınıflandırılmış yapı malzemeleri için agrega olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Araştırmacılar mermer ve kireçtaşı tozları içeren betonların bazı mekanik özelliklerini çalışmışlardır, karışımlar ince kum agregaları yerine %5, %10 ve %15 mermer ve kireçtaşı tozları kullanılmış ve basınç dayanımları karşılaştırılmıştır [74]. Başka bir çalışmada ise aynı araştırmacılar, mermer ve granit değişiminin iyi yoğunlaştırılmış bir matris oluşturduğunu belirtmişlerdir [13]. Betonun dayanıklılığının artırılması içerisindeki cam içeriğine ve granitin kimyasal bileşimine bağlanabilir. Bu çalışmanın sonucunda, mermer ve granit atık agregalarının, geleneksel beton karışımlarının mekanik özelliklerinin, işlenebilirliğini ve kimyasal direncini geliştirmek için kullanılabileceğini göstermiştir [74]. Corinaldesi ve arkadaşları, mermer tozu ile kumun %10’luk yer değiştirmelerinin aynı işlenebilirlik için maksimum sıkıştırılmış sertlik sağladığını göstermişlerdir. Karışımlar, mermer tozunun kum veya çimento ile yer değiştirilmesi ile hazırlanmıştır [69]. Mermer atıkları, yalnızca betona katılabilecek ikame ediciler veya katkı maddeleri değildir, diğer yapı malzemeleri içinde kullanılabilirler [75]. Saboya ve arkadaşları tarafından yapılan deneyler, kırmızı seramik ham materyalinde %15-20 toz mermer içeriğinin kullanılmasının tuğla seramik özelliklerinin geliştirmek için en iyi oran olarak kabul edileceğini göstermiştir [78]. Mermer atıkların betonun taze ve mekanik özelliklerini anlamak için çok sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır [73]. Ek olarak, somut sonuçlar arasında karşılaştırma yapmak zordur, çünkü mevcut birkaç çalışma her zaman aynı endişelere sahip değildir [75].

Atık maddelerin doğrudan çevreye bırakılması çevre sorununa neden olabilir. Bu nedenle atık malzemenin yeniden kullanımı önemlidir. Atık, yeni ürünler üretmek için kullanılabilir veya katkı maddeleri olarak kullanılabilir, böylece doğal kaynaklar daha verimli şekilde kullanılabilir ve çevre atık birikintilerinden korunmuş olacaktır [79]. Mermer taş endüstrisi, hem katı atık mermer parçacıkları hem de mermer çamuru oluşturur. Katı atıklar, maden sahalarındaki veya

işlem ünitelerinde ki aşamaların sonucu olarak ortaya çıkarken; mermer çamuru, testere kaynaklı parlatma ve parlatma işlemlerinden ortaya çıkan mermer tozu ile mermer işleme makinelerini soğutmak ve yağlamak için kullanılan suyun işlem sırasında karışmasıyla oluşmuş yarı sıvı bir maddedir [80]. İşleme sırasında üretilen mermer çamuru, taş endüstrisinden elde edilen nihai ürünün yaklaşık %40'ına tekabül eder. Bu önemli bir miktardır çünkü taş endüstrisi yıllık ortalama 68 milyon ton işlenmiş ürün çıktısı sunmaktadır [81]. Bu nedenle bilim ve endüstri toplulukları daha sürdürülebilir bir uygulamaya odaklanmalıdır. Bu endüstriyel yan ürün için hem deney aşamasında hem de pratik uygulamalarda birçok yeniden kullanım ve geri dönüşüm çözümü bulunmaktadır [82]. Bu endüstriyel atıklar yakındaki toprağa dökülür ve bu nedenle toprağın doğal verimliliği kalmaz. Atıkların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri analiz edilip, elde edilen veriler incelenmektedir. Sonuç olarak yapılan çalışmada beton teknolojisinin ilerlemesi, doğal kaynakların ve enerji kaynaklarının tüketimini azaltabilir ve kirleticilerin çevre üzerindeki olumsuz etkisi de yine azaltabilir [79]. Halen, doğal taş işleme tesislerinde, çevre ve insanlar üzerinde önemli bir olumsuz etkisi olan büyük miktarda mermer tozu atıkları üretilmektedir [83]. Bu proje, atık mermer çamurunda elde edilen mermer tozunun beton üretiminde belirli oranlarda kullanılmasının fizibilitesini açıklamaktadır. Hindistan'da mermer işleme, en çok gelişen endüstrilerden biri olup, değişik mermer tozu içeriğinin taze ve sertleşmiş betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde ki etkileri araştırılmıştır. 30 küp ve 30 silindir numune dökülmüş olup, basınç dayanımları 7 gün ve 28 gün sonunda testlere tabi tutulup sonuçlar alınmıştır. Test sonuçları, bu endüstriyel bir ürünün %10'a kadar sertleşmiş beton performansını artırabildiğini göstermektedir [81].

Yapılan bir çalışmada Alyamaç ve Aydın, maksimum basınç dayanımına sahip bir beton özelliği yerine maksimum miktarda mermer tozu içeren bir beton karışımı geliştirip bu karışımı ile mermer tozu kullanılmayan bir referans betonu ile kıyaslamıştır [12]. Betondaki kumun mermer tozu ile değiştirilmesi amaçlanmıştır, çünkü daha fazla miktarda atık mermer tozunun betona katılması çevre dostu ve ekonomik olarak mümkündür [50]. Betonun işlenebilirliği, mermer tozu miktarı ile negatif ilişki gösterir, ancak kimyasal katkılar ile beton işlenebilirliği istenilen düzeye getirilebilir. Mermer tozu miktarı en uygun değerlerde kullanıldığında, mermer tozu betonun basınç dayanımı referans betonun basınç dayanımından daha yüksektir. Bu çalışmada numuneler için neredeyse minimum miktarda çimento kullanılmıştır. İstenilen basınç dayanımı çimento miktarı artırılarak elde edilebilir. Uygun miktarda çimento içeren mermer tozu kullanılarak daha sağlam beton elde edilebilir. Optimum mermer tozu oranları, su emme ve aşınma direnci gibi betonun dayanıklılık özellikleri üzerinde olumlu etkiye sahiptir. Beton bir atık malzeme ile üretildiğinde, beton özelliklerinin işlenebilirliği, dayanıklılığı ve dayanıklılığının iyileştirilmesi veya en azından referans betona göre bu özelliklere yakın olması beklenir. Betonda

%40'a kadar mermer tozu kullanılması gereksinimlere göre uygundur. Böylece çevre dostu, ekonomik ve dayanıklı beton elde edilir [12].

2.2. Atık Lastik Agrega Kullanılan Betonlar

Amerika Birleşik Devletlerinde yılda yaklaşık 242 milyon hurda araç lastiği ortaya çıkmakta ve eskiyen lastiklerin çoğunluğu ise bilinçsizce doğaya atılmaktadır. Bu atık lastikler ülkede ki katı atıklarının %1.2'sini oluşturuyor [84]. ABD Çevre Koruma Ajansı, 2-3 milyar hurda lastiğinin ülke genelinde yasadışı stok yığınlarında veya kontrolsüz bir şekilde lastik çöplüklerinde biriktiğini, daha fazla milyonlarcasının ise çöllere ve boş arazilere kaçak yollar ile dağıldığı tahmin edilmektedir [85]. Atık lastik artışı, önemli çevresel, sağlık ve estetik sorunlarına sebep olmaktadır. Bu sorunu çözmek için yenilikçi çözümler geliştirilmelidir [86]. Karayollarının yapımı, atık lastik geri dönüşümü için önemli bir pazar potansiyeli sağlamaktadır. Lastik agregası ile üretilmiş modifiye asfalt üzerine kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir [87]. Devlet bütçesinden finanse edilen projelerde atık lastiklerin kullanımı üzerine "Intermodal Surface Transportation Efficiency Act of 1991" yasası mevcuttur. Bu yasaya göre 1995'ten başlayarak, tüm devletlerin yıllık yönetimler olarak finanse edilen asfaltlama projelerinin %5'ini lastik kauçuğu modifiye beton yollar ile döşemesi gerekiyordu. 1998'de federal fonlu kaldırım projelerinin %20'sinin lastik katkı beton malzemeyi kullanması gerekiyordu. Bununla birlikte, bu gereksinimler parçacık halinde olması gereken lastiklerin imalatındaki yüksek maliyet ve emek gücü sebebiyle süreç ertelenmiştir. Yol yapımında atık lastiklerin tüketimi maksimum %20 tüketim oranı ile eyaletten eyalete değişmektedir. Atık lastik modifiye yollar ilgili problemler nedeniyle, sistem değiştirilmiş, Portland çimento ile üretilmiş betonunun içerisinde atık lastik kullanımı çalışmalarına giderek daha fazla önem verilmiştir. Islak üretim işlemlerine ihtiyaç duyan lastik modifiye asfaltı yerine atık lastik katkı beton, üretim sürecinde bir kısmı atık lastik ile değiştirilen agregaların kullanıldığı düşük maliyetli "kuru prosesi" kullanılmaktadır. Ayrıca, ortaya çıkan beton çok yüksek tokluğa sahiptir. Bu çok arzu edilir, çünkü geleneksel beton kırılgan bir malzemedir. Yüksek tokluk, modifiye betonun daha yüksek çatlama ve kırılma direncine sahip olduğunu göstermektedir [88]. Eldin ve Senouci, betonun sağlamlığını ve tokluğunu, atık lastik yongalarının yerini alan agregaların bir kısmıyla araştırdı. Sıkıştırma mukavemeti ve bölünmüş gerilme mukavemetinin azaldığını, kırılma enerjisini emme tokluğu ve kabiliyetinin önemli ölçüde arttığını gözlemlediler. Ayrıca malzemelerin mukavemet teorisi üzerinden lastik agregası katkı betonların kırılma mekanizmasına göre nitel bir açıklamasını sağladılar [84].

Hızla artan nüfus ve bu artış sonucunda ulaşım ihtiyacındaki talep göz önüne alındığında, ulaşım araçları için lastik üretimi katlanarak artmaktadır. Lastiklerin kullanım ömrü dolduktan

sonra ortaya çıkan atık lastiklerden dolayı çok büyük miktarda kauçuk atığı üretilir [89]. Dünyada ki yıllık lastik üretiminin 2017 yılında 2.9 milyar araç lastiği olarak üretim planı yapıldığına göre, kullanım ömrü dolmuş atık lastik sayısının lastik üretimi ile neredeyse doğru orantılı olacağı ön görülmektedir. Biyolojik olarak parçalanamayan bu çok büyük miktarda ki atık lastikler doğada büyük bir alanı kaplamakta ve çevresel tehlikelere neden olmaktadır. Lastiği yakıt olarak yakmak veya kullanmak, çevreye zararlı toksik gazlar üretmekte ve doğal havanın tahrip edici bir şekilde kirlenmesine neden olmaktadır [90]. Lastik kauçuğunun içerdiği stiren, insanlara son derece zarar veren güçlü bir toksik bir bileşendir [91]. Bu nedenle, atık lastiklerin yakılması insan sağlığı için çok tehlikeli olabilir. Doğru bir şekilde atıkların geri dönüşümünün sağlanması büyük önem arz etmektedir. Son yıllarda, araştırmacılar lastik atıklarını farklı şekillerde geri dönüştürmek için uygun bir metot oluşturmaya çalışmışlardır. Küresel lastik geri dönüşüm pazarının 2016 yılında 0.95 milyar ABD doları olduğu ve tahmin döneminde yıllık %2.1'lik bir büyüme oranında büyümesi beklenmektedir [92]. Aynı rapor, Kuzey Amerika'nın küresel lastik geri dönüşüm pazarının gelir payının yaklaşık %31'inin oluşturduğunu ortaya koydu. Artan çevresel kaygılara cevap olarak, atık lastikler artık yalnızca çevreye yarar sağlayacak şekilde değil aynı zamanda ekonomik büyümeye de katkıda bulunacak şekilde geri dönüştürülüyor. Atık lastiklerden elde edilen enerji, gelişmiş ülkelerdeki sanayi ekonomisine de katkıda bulunmaktadır [93]. Atık lastiklerin %6 ile %8', ABD'de ve AB ülkelerinde inşaat mühendisliği malzemesi olarak geri dönüştürülmekte iken ancak atık lastiklerin yalnızca %0.4'ü Avustralya'da geri dönüştürülebilmektedir [94].

Beton, dünyada en çok kullanılan inşaat malzemesidir bu nedenle beton içerisine katılması yoluyla bu atık malzemeden kurtulmak ekonomik ve faydalı bir çözüm olacaktır. Betonun dayanımını ve dayanıklılığını en üst düzeye çıkarırken maliyeti optimize etmek, beton yapının çevre dostu özelliğini iyileştirmekle birlikte küresel bir zorunluluktur. Bu konu, geleneksel beton bileşenlerinin yerini alabilecek ileri malzemeler gerektirir [95]. Lastik atığının iyi bir mukavemet, süneklik ve gerilme kontrolü özellikleri dikkate alındığında, beton bileşenlerin yerine kullanılabilir. Kauçuk, ince agregaların ve kaba agregaların değiştirilmesi veya bağlayıcı olarak kullanılmasıyla beton ve harç üzerine uygulanabilir [96].

Betonun ana bileşenleri agregalar ve çimentodur. Ayrıca beton dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Agregalar yollar, kaldırımlar, alt yapı imalatları ve binalar gibi hemen hemen tüm inşa edilmiş yapı imalatlarında bulunan önemli bir malzemedir [97]. Agregalar malzemeleri doğadan çıkarılırken çevrede oluşan tahribat ve zarar nedeniyle, diğer taraftan karbon yayımı ve yüksek üretim maliyetleri sebebiyle ekonomik açıdan ve çevre sağlığı açısından büyük problemler içermektedir [98]. Bu nedenlerle, atık malzemelerin agregalar yerine belirli oranlarda yer değişikliği ile imal edilen betonlar ile hem CO₂ salınımı azaltılıp hem de atık madde birikimi açısından etkinin azalacağı için en ideal yoldur [99]. Bu bağlamda, inşaat ve beton

endüstrisi, geri dönüştürülmüş malzemeler ve endüstriyel ürünler tüketmek için en iyi alternatiflerden biri olarak düşünülebilir. Bazı araştırmalar, atık lastiklerin betonda lifler ve agrega kısmi değişimi gibi farklı yönlerde uygulanmasını ele almıştır. Bazı çalışmalar ise atık lastik parçalarının yapı malzemelerinde kullanılmasının uygunluğunu zaten doğrulamıştır [100]. Bazıları %30'a kadar atık lastik agregayı içeren betonun mekanik ve dayanım özelliklerini araştırmışlardır. Betonda çimentonun bazı puzolanlar ile yer değiştirilerek kullanılması ve farklı beton türlerinin üretimi üzerine birçok çalışma yapılmıştır [101]. Bu ilave nano malzemeler, uçucu kül, silika dumanı, cüruf, zeolit ve çimento içeriğinin azaltılmasına yardımcı olabilecek diğer puzolan türleri ve bu sayede daha temiz ve daha sürdürülebilir bir üretim elde edilebilir [100].

Hurda lastik tehdidi şu an da çok önemli bir küresel problemdir. 2013 yılında, AB'de kullanılan lastik agrega artışlarının 3.6 milyon ton olduğu tahmin ediliyor [102]. ABD lastik üreticileri birliğine göre, ABD'de 2015 yılında 4.0 milyon ton lastikle eşdeğer 264.4 milyon hurda lastik üretilmiştir. 2015 yılında ABD'de üretilen atık lastiklerin %49'u yakıt olarak kullanılmış, %26'sı kırıntı kauçuğuna, %11'i arazi dolgularına atılmıştır ve %7'si inşaat mühendisliğinde geri dönüştürülmüştür [103]. Lastik de, kauçuk yaklaşık %50'sini (doğal kauçuk, bütadien kauçuğu, stiren bütadien kauçuğu) oluşturur, diğer bileşenler ise karbon siyahı, metal, tekstil, çinko oksit, kükürt ve katkı maddeleridir [104]. Kompozitlere göre lastikler son derece dayanıklıdır, doğal olarak biyolojik olarak parçalanamazlar ve arazi dolguları yangın tehlikeleri nedeniyle çevresel riskler oluşturur ve fareler, sivrisinekler için bir üreme alanı oluştururlar [105]. Uygun şekilde kullanıldığında çevreye tehdit oluşturabilecek atık lastiklerin özellikleri inşaat endüstrisinde teknik olarak avantajlı olabilir [106]. Hurda lastik kauçuk içeren beton üzerine farklı yüzde oranlarında ve ince veya kaba doğal agrega yerine kullanıldığı birçok çalışma yapılmıştır [107]. Atık lastik kauçuğun betona ilave edilmesi, doğal kaba ve/veya ince agreganın kısmen değiştirilmesi, üretilen betonun özelliklerini önemli ölçüde değiştirir [108]. Çalışmalar sürekli betonda kauçuğun kullanılmasının, geleneksel betona kıyasla basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastikiyet modülünü azalttığını bildirmiştir [109]. Esas olarak kauçuk parçacıklarının hidrofobi doğası ve yüksek yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır, bu da kauçuk yüzey ile çimento matrisi arasında zayıf yapışma ile sonuçlanmaktadır [110]. Taha ve arkadaşları, mikro yapısal araştırmaya dayanarak, kuvvetin önemli ölçüde azalmasının, lastik kauçuğu parçalarının yumuşak bir agrega olarak davranışına atfedilebileceğini bildirdi. Toplam kauçuk içeriğini parçacık büyüklüğünü ve özelliklerini, ayrıca karışım parametrelerini ve oranlarını etkilediği için betonun mukavemetinde azalma olur [111]. Kauçuk katkılı betonun düşük mekanik dayanıma sahip olduğu kabul edilen gerçeğinin aksine, Issa ve Salem geri dönüşümlü kırıntı kauçuk tarafından ince doğal agreganın %25'ine kadar değiştirilmesi durumunda oluşan basınç dayanımının kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını bildirdi [112].

Çevreyi ciddi şekilde tehdit eden dünya genelinde çok sayıda lastik atılıyor veya gömülüyor [113]. Atık lastik kauçuğun imhası dünya genelinde çok önemli bir çevre sorununa dönüşmüştür [114]. Atık lastikler yanma ve toprak doldurma gibi farklı şekillerde atılır veya spor alanlarında zemin malzemesine veya yollarda asfaltta bağlayıcılar ile yer değiştirilerek belirli oranlarda kullanılırlar [115]. Mevcut stoklanmış atık lastikler, hava, su ve toprak kirliliği nedeniyle sağlık, çevresel ve ekonomik risklere neden olmaktadır [114]. Son yıllardaki araştırma yönlerinden biri, atık lastiklerin gelişen teknoloji ile inşaat sektöründe imalatla en çok kullanılan malzeme olan ve çok miktarda doğal kaynak tüketen beton üretiminde kullanılmasıdır [113]. Betonun içerisinde bulunan çimento ve doğal agregalar ile atık lastik parçacıklarının kısmi yer değiştirmesi ile kullanılır. Atık lastik parçacıklarının betonda agregalar yerine kullanılması, doğal kaynakların korunmasını sağlayan çevre dostu bir yaklaşımdır [116]. Betonda ki lastik kauçuk parçacıkları düşük sertliğe, iyi bir esnekliğe sahiptir ve beton atık lastik agregaların yüzey büyüklüğünden, temizliğinden, içeriğinden, şeklinden ve kalitesinden etkilenir. Lastik agrega içeren betonun taze beton deneyleri yapılmış ve bunların gerekli standartları sağladığı tespit edilmiştir [117].

2.3. Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Betonlar

Uçucu kül veya diğer tanımıyla toz halinde ki yakıt külü, termik santraller de yakılan kömür sonucu ortaya çıkan başlıca yan üründür [118]. Bu birkaç yıl içerisinde, sadece Çin’de 600 milyon ton, Hindistan’da 220 milyon ton ve ABD’de ise 130 milyon ton uçucu kül üretilmiş ve sırasıyla bunların %70, %60 ve %50 si sadece geri kullanılabilmektedir [119]. Kalan uçucu kül ise, hava kirliliği oluşturmuş ve diğer taraftan su rezervlerine karışmasıyla doğal su kaynaklarını tahrip etmiştir [120]. Her ne kadar atık toplama alanlarına bu durumu engellemek için rezerv edilmeye çalışılsa da artık bu alanlarda kentlerde boş yer kalmamıştır [121]. Bunun yanında diğer taraftan, çimento üretimi yüksek enerji ihtiyacı olan bir iş ve üretim sırasında yüksek miktarda CO₂, SO₂, NO_x gazları ortaya çıkmaktadır [122]. 1960’lı yılların başlarından beri, birçok ülke uçucu külü betona eklemeye başladı. Bunu ya bir puzolanik madde olarak Portland çimentosu ile kısmi yer değiştirerek veya bir mineral katkı olarak yaptı. Çimentonun içerisine uçucu külün dâhil edilmesi beton karışım hesabı yapılması birçok avantajı beraberinde getirir. Bunlardan ilki, uçucu külün çimento ile yer değiştirmesi, doğada ki rezerv uçucu kül miktarının azalacağından yeşil bitki dokusunu ve çevreyi korur; ayrıca beton üretiminde kullanılan çimento tüketimi azalacağından, çimento üretimi sırasında ortaya çıkan hidrasyon ısını azaltır ve çevre sağlığı korunur. Ayrıca kullanılan çimento miktarı azalacağından beton maliyeti de düşecektir. İkinci olarak, uçucu külün eklenmesi ile beton dayanımı artış gösterir ve betonun kuruma büzülmesi azalır [123]. Üçüncü olarak, hidrate olmamış uçucu kül partiküllerinin mikro agreganın etkileri,

küçük partikül büyüklüğü ve düzgün küresel şekli, daha iyi işlenebilirlik, ara yüzey arası geçiş bölgesinde daha yüksek kompaktlık ve sistemde daha ince gözenek yapısı meydana gelmesini sağlar [118]. Betonun içerisinde uçucu külün, çimento ile %15-%30 arası ağırlıkça yer değiştirmesi araştırmalarda ve uygulama da yaygın olarak kullanılmış, bilimsel araştırmacılar ve mühendisler bu oranın %30-%60 arası yer değiştirme olarak kullanılabileceği yüksek hacimli uçucu kül kullanılan beton üretmişlerdir [124]. Yüksek hacimli uçucu küllü betonunun istenen mekanik ve dayanıklılık özellikleri, karışım oranlarının özenle seçilmesi ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmasıyla sağlanmıştır [125]. Bundan dolayı uçucu külün yüksek miktarlarda çimento ile yer değiştirmesi konusunda büyük araştırmalar vardır. Çalışmalar yüksek hacimli uçucu kül ile üretilen betonlarda çimento ile yer değiştirme oranının %60'ın üzerine çıkarılması yönüne odaklanmıştır [126].

Uçucu kül esas olarak silikat camdır ve silika, alümina, demir, kalsiyum, magnezyum, kükürt, sodyum, potasyum ve karbon minör bileşenleri içerir. Uçucu kül, genellikle F sınıfı ve C sınıfı olarak kategorize edilir ve bu kimyasal birleşimlerine bağlıdır. F sınıfı olanın rengi açık gridir [127]. Uçucu kül, beton endüstrisinde çimento ve beton üretiminde sık sık birincil malzemelerden biri olarak kullanılır. Dökülen betonlar, beton bloklar, beton döşemeler, demiryolu traversleri vb. [128].

Betondaki uçucu kül miktarı genellikle %15 ile %30 arasında değişir, bu oran çimento esaslı bağlayıcı madde kütlesine göre hesaplanır. Daha yüksek yer değiştirme seviyeleri %30 ile %50 arası büyük yapılarda (büyük temeller ve barajlar) ki betonlarda sıcaklık seviyesi kontrol altında tutularak kullanılabilir. Betonda uçucu kül yer değiştirmesi oranı yüksek seviyelerde endişe yaratsa da, son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda %40 ile %60 arası yer değiştirme oranlarına sahip uçucu kül kullanılmış çevre dostu betonlar üretilebileceğini göstermektedir [129]. Çoğu çalışma geleneksel Portland çimentosu kullanılmış betonunun erken yaşlarda ki dayanımının uçucu kül eklenmesi sonucu olumsuz etkilendiğini göstermiştir [130]. Diğer taraftan, uçucu kül eklenmesinin betonun ileri ki yaş dayanımına ve durabilitesine olumlu yönde etki ettiği, betona eklenen uçucu külün çimentonun hidrasyonu sırasında ortaya çıkan Ca(OH)_2 'yi tükettiğini ve C-S-H gibi ikincil hidratları ortaya çıkardığı belirlenmiştir [131]. Bir çalışmada Arezoumandi ve arkadaşları, barajlarda kullanılan HVFA (Yüksek hacimli uçucu kül içeren beton) kırımlarında %70 oranında C sınıfı uçucu kül kullanılması ile üretilen betonun kayma dayanımının %50 oranına sahip C sınıfı uçucu kül ve geleneksel Portland çimentosu ile üretilen beton kırımlarına göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. HVFA betonlarında uçucu külün reaksiyonu düşük derecededir, örneğin 90 günlük betonlarda uçucu külün %80'nin üzerindeki oranı reaksiyona girmez. Fakat HVFA betonunda çimento hidrasyonu iyileştirilmiştir, çünkü uçucu kül ile su-çimento oranı artırılmıştır. Uçucu kül betonda mikro agrega görevi görebilir ve bu fonksiyon uçucu kül içeriği arttıkça artar ancak yaşla birlikte azalır [132].

Geopolimer tipli uçucu kül, onların seramik benzeri karakteri nedeniyle yarı gevrek davranış gösterir. Düşük çekme dayanımına ve kırılma tokluğuna sahiptirler. Son yıllarda, nano-silika, nano-TiO₂ gibi nanomalzemeler, CNT'ler (Karbon nanotüp), tek cidarlı CNT'ler, çok cidarlı CNT'ler ve grafen bazlı malzemeler (grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit), bununla mücadele etmek için geopolimer takviyesi olarak kabul edilmiştir. Dolgu etkisi ve nano malzemeler tarafından sağlanan hidrasyon kimyasının değişimi/hızlandırılması, uçucu kül bağlayıcılarının taze ve sertleşmiş davranışını artırabilir [133]. Nano malzemelerin uçucu kül kompozitlerinin farklı özellikleri üzerindeki etkileri şu şekillerde açıklanmıştır:

A) Mikro yapıları ve mekanik dayanıma olan etkileri: Ranjbar ve diğerleri uçucu kül geopolimerinin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini geliştirmek için GNP'yi (Geliştirilmiş bir çeşit kimyasal beton katkısı türü) kullandılar. Sonuçlar gösterdi ki geopolimerin basınç ve bükülme mukavemetinin % 1 GNP eklendikten sonra sırasıyla 1.44 ve 2.16 kat arttığını göstermiştir. Geopolimerin dayanıklılığı ve rijitliği artmıştır. GNP ile modifiye edilmiş uçucu kül homojen ve yoğun bir yapı sergilemiştir. Saafı, rGO'nun (Azaltılmış Grafen Oksit) geopolimer içerisine dâhil edilmesini inceledi. Silika tipi çapraz bağlamaya bağlı spektral absorpsiyon, geopolimer spektrumlarında artmıştır [134].

B) İşlenebilirlik üzerindeki etkiler: İyi bir işlenebilirlik düzgün bir karışım sağlar, bu da uçucu kül kompozitlerinin dayanımını artırır. Nano malzemelerin yüksek özellikli yüzeyi genellikle daha yüksek su tutma kapasiteleri oluşturur ve işlenebilirliği etkiler, bu nedenle nano malzemelerin uçucu kül karışımlarına karıştırırken dikkatli olunmalıdır. GO'nun (Grafen Oksit) dâhil edilmesi macunun viskozitesini artırır ve işlenebilirliği büyük ölçüde azaltır, dolayısıyla GO'nun bağlayıcılardaki uygulanmasını sınırladığını bildirir. GO'nun kapsüllenmiş silis dumanı, GO'nun fonksiyonel etkisini silis dumanının şekil etkisiyle birleştirerek bu sorunun üstesinden gelmek için kullanılmıştır. Nanosilikanın (%3'e kadar) uçucu kül bazlı bağlayıcılara ilave edilmesinin, iyi bir işlenebilirlik özelliğine sahip bir karışımla sonuçlandığını, çünkü nanosilikanın yuvarlak şeklinin, uçucu kül parçacıklarında bir bilyalı yatak etkisi sağladığını bildirdi. Nanosilika ayrıca serbest su salınması ve macun içindeki akışı arttırması için fiziksel bir dolgu maddesi olarak da işlev görebilir. Ayrıca nano malzemeleri kullanırken uygun bir süper akışkanlaştırıcı seçimi işlenebilirlik oranında azalmayı önlemek için önemlidir. Nano silika ile süper akışkanlaştırıcı hemen karıştırılmasının uygunsuz olduğu gözlemlendi, çünkü süper akışkanlaştırıcı ve nanosilika, nanosilikanın reaktivitesini azaltmıştır. Bu sebeple süper akışkanlaştırıcı nanosilika eklendikten sonra kullanılmalıdır [135].

C) Dayanıklılık üzerindeki etkiler: Uçucu kül kompozitlerinin dayanıklılığı üzerinde nano malzemeler genellikle faydalıdır. Nano malzemelerin uçucu kül kompozitleri ile birleşmesi klorür geçirgenliğini azaltır. Uçucu kül genellikle betonun erken yaş dayanımını azaltır. İleriki yaşlarda puzolanik reaksiyon nedeniyle, bu güç eksikliği ortadan kalkar. Eğilme dayanımı, %50'den daha

düşük uçucu kül yer değiştirmesi durumunda OPC (Geleneksel Portland Çimentosu ile üretilen beton) ile üretilen betonlara göre daha yüksek çıkmıştır, %40-%80 arasında uçucu kül yer değiştirme seviyelerinde ise, uçucu kül betonunun eğilme dayanımı uçucu kül içeriği arttıkça hafifçe azaldı. Yarma çekme dayanımı ise, uçucu kül değişimi %50 seviyesinde dayanımı %20 oranında iyileştirdi. Yer değiştirme seviyesi %70'e yükseldiğinde ise OPC betonuna kıyasla %35 azalma göstermektedir [136].

2.4. Çevre Dostu Beton Metodolojisi

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda çevre dostu beton üretilirken doğaya atılan atık malzemeler kullanılarak üretilen birçok beton türü bulunmaktadır. Bunlardan bazılarında ise bu atık malzemeler birlikte kullanılarak hem daha fazla tüketimleri sağlanmış hem de birlikte kullanılmaları sonucu oluşan beton türlerinde farklı avantajlar sağlanmıştır. Bu bölümde bu tarz çalışmalara yer verilmiştir.

Gesoğlu ve arkadaşları yapmış oldukları bir çalışmada, mermer tozu, uçucu külü ve kireçtaşı birlikte kullanarak çevre dostu beton üretmişlerdir [137]. Dolgu malzemelerinin ve mineral katkıların betonda ikame katkı maddesi olarak kullanılması, inşaat sektöründe daha fazla sürdürülebilirlik sağlama beklentilerini karşılama eğilimindedir. Maliyet, endüstriyel atıkların geri dönüşümü, dayanıklılığın iyileştirilmesini ve betonun mekanik performansı ile ilgili konular bu tür malzemelerin kullanımı üzerinde baskı yaratacaktır [138]. Bu çalışmada, Portland çimentosu, mermer tozu, kireçtaşı dolgu maddesi ve uçucu külün ikili ve üçlü sistemleri ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonların taze ve sertleşmiş beton özelliklerini vurgulamayı amaçlamaktadır. Mermer tozu kullanımının, beton akışının ve V-huni akış zamanlarının artmasıyla ilişkili çökme akış çapını azaltarak betonların taze beton özelliği artırdığını gözlemlediler [139]. Bununla birlikte, mermer tozunun ikili ve üçlü çimento esaslı harmanlarda bir arada kullanılması, kendiliğinden yerleşen betonların taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde ki etkinliğini netleştirmek için daha ayrıntılı araştırmalar gerektirir [69]. Çimento harcı matrisini fiziksel olarak iyileştirme özelliğine sahip olan kireçtaşı dolgusu, literatürde yoğun olarak incelenen materyallerden biridir. Kireçtaşı dolgusu, gözenekli dolgu etkisiyle daha kompakt bir yapı sağlayarak betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirir. Uçucu külün varlığında, aynı zamanda çözünmez bir C-H-S yapısı oluşturan Ca(OH)_2 'in serbest silika ile bağlanarak puzolanik bir tepkimeyle çimento ile tepkimeye girmesine neden olur [140]. Portland çimentosu yerine %20 kireçtaşı dolgusu ve %30 doğal puzolana sahip harç prizması üretmiştir. Numuneleri 2, 7, 28 ve 90. günlerde bükülme ve sıkışma testi yaptılar. Bazı numuneler ayrıca kimyasal saldırı ve klorür iyonu geçirgenliği açısından test edildi. Üç çimentolu harç karışımının kullanılmasının erken yaşta ve uzun vadeli mekanik özelliklerde artış sağladığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca sülfat, asit ve klorür saldırılarına karşı dayanıklılık artırılmıştır [141]. Bağlayıcıların üçlü bileşiminin Portland çimentosu üretimini ve dolayısıyla CO₂ salınımını azaltarak ekonomik ve çevresel avantajlar sağladığını belirttiler. Dahası, üçlü karışımlarda bağlayıcı kullanmak, erken ve orta yaşta sıkıştırma basınçlarını arttırıyor gibi görünmektedir. Yapılan bu çalışmanın sonucunda, mermer tozu ve kireçtaşı kullanımının çökme değerini çok düşürdüğünü ve bu nedenle süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı oranını çok artırdığını, uçucu kül eklenmesi ile ise kullanılan katkı miktarın da önemli ölçüde azalma olduğu gözlemlenmiştir [142]. Mermer tozu ve kireçtaşı miktarlarındaki artış, hem ikili hem üçlü karışımların viskozitesini arttırmıştır. Üçlü karışımlara uçucu kül ilavesi yapılan karışımlar ile mevcut karışımların viskozitesi karşılaştırıldığında azalma sağladığı görülmüştür. Basınç dayanımlarına bakıldığında uçucu kül katkılı betonların, katkısız olanlara göre uçucu külün yavaş hidrasyon reaksiyonu özellikleri nedeniyle, 28 günlük basınç dayanımının diğerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kireçtaşı katkısı, karışımların her ikisinde de daha fazla basınç dayanımı sağlamıştır. Buna göre, kireçtaşının hidrasyon kinetiği ve ayrıca doldurma kabiliyetini etkilediği sonucuna varılmaktadır [137].

Kendiliğinden yerleşen beton, Japonya’da ilk kez geliştirilmesinden bu yana inşaat sektöründe büyük bir gelişme olarak kabul edildi. Bu betonun ana özelliği yüksek akışkanlıktır ve bu sayede titreşim olmadan kendi ağırlığı ile döküm yerine yerleşmektedir. Taşıma veya yerleştirme işlemi sırasında ayrışma olmadan yüksek akışkanlığa sahip kendiliğinden yerleşen beton elde etmek için, yüksek toz içeriğine sahip süper akışkanlaştırıcı ve viskozite değiştirici kimyasal beton katkılarının kullanılması iyi bir çözüm gibi görünmektedir. Bununla birlikte, bu tür bir betonun maliyeti, normal beton sınıflarına göre önemli ölçüde yüksektir [143]. Silis dumanı, uçucu kül ve öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların kullanımı beton üretiminde kullanılan malzeme maliyetini düşürürken, bu betonun kendiliğinden yerleşme uyumunu artırmaktadır [144]. Çeşitli araştırmalar, doğal puzolanların, maliyeti azaltma özelliğinden dolayı avantajları nedeniyle birçok uygulamada Portland çimentosunun belirli bir oranının yerine kısmi olarak yaygın bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Böylece betonun ısı değişimi ve geçirgenliği azalır, kimyasal direnci ise artar [145]. Yapılan çalışmada, uçucu kül sabit oranda tutulurken, mermer tozu kademeli olarak artırılmıştır. Deney sonuçlarında, mermer tozu ve uçucu külün kullanılması kendiliğinden yerleşen betonun çalışabilirliğini olumsuz etkilememektedir. Taze beton özelliklerinde mermer tozu oranı %10 ve uçucu kül kullanımı %25 oranında kullanıldığında beklenen en ideal sonuçları göstermektedir. Mermer tozunun artışı çökme değerini artırırken, T50 test zamanını ve V-funnel zamanını azaltır. Kendiliğinden yerleşen betonda geçiş kabiliyeti artar. Mermer tozunun %10 ve uçucu külün %25’inin çimento ile yer değiştirmesi sonucu kendiliğinden yerleşen betonda olumlu etki sağlamıştır [146].

3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasının ana amacı literatürde daha önce yer almayan çevre dostu bir beton çeşidi üretmektir. Bu amaçla, atık mermer tozu ve atık lastik agregası kullanılarak çevre dostu beton üretilmiş ve karışım hesabının belirlenmesine yönelik yeni bir metot geliştirilmiştir. Atık lastik agregası kullanıldığında beton basınç dayanımının düştüğü bilinmektedir. Bu olumsuzluğun belirli bir orana kadar giderilmesi için atık lastik agregalı beton gurubuna uçucu kül ilavesi de yapılmıştır [147]. Böylece yine atık malzeme olan uçucu külün de betonda kullanılması üretilen betonların çevreci özelliklerini artırmıştır.

Tez çalışmasındaki deneylere sadece atık mermer tozu kullanılarak çevre dostu beton üretimi ile başlanılmıştır. Sadece atık mermer tozu kullanılarak çevre dostu beton üretilen seriler birinci adım deneyler olarak isimlendirilmiştir. Birinci adım deneyler tamamlandıktan sonra ikinci adım deneylerde ise mermer tozu ve atık lastik agregası birlikte kullanılarak çevre dostu beton karışımları üretilmiştir. Ayrıca ikinci adım deneylerinin bir kısmında, çevre dostu beton üretiminde mermer tozu ve atık lastik agregasının yanında uçucu kül de kullanılmıştır. Uçucu kül kullanılan serilerde ileri yaş basınç dayanımlarının artması hedeflenmiştir.

Birinci adım deneylerde amaç, farklı agregası granülometrisinin mermer tozu kullanım miktarı üzerindeki etkisini belirlemektir. Agregası granülometrisi değiştikçe, boşluk oranı ve incelik modülü değişmektedir. Bu değişimlere bağlı olarak, betonun taze ve sertleşmiş özelliklerinin nasıl değişim göstereceği belirlenmeye çalışılmıştır. Agregası granülometrisi A, B ve C eğrilerine göre ayarlanmış ve farklı karışımlara sahip çevre dostu betonlar üretilmiştir [148]. Birinci adım deney serilerinde üretilen tüm çevre dostu beton karışımları için çökme testi ve beton basınç dayanım testi yapılmıştır [149].

İkinci adım deneylerde ise mermer tozu ile beraber atık lastik agregaları ve uçucu kül kullanılmıştır. Atık lastik agregaları betonun basınç dayanımını azaltacağı için, belirli oranlarda uçucu kül karışıma katılmıştır. Dökülen numunelerin taze beton deneylerinden çökme testi ile işlenebilirliğine bakılarak betonun kıvamı belirlenmiştir [150]. Basınç Deneyi ve kılcalık deneyleri ile dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Mermer tozu, betonun işlenebilirliğini azaltıcı yönde etki yaptığı için betonun basınç dayanımını düşürmeden işlenebilirliği artırabilmek amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı belirli oranda kullanılmıştır [151]. Mermer tozu, %5'e kadar kademeli olarak eklenmiştir. Atık lastik agregaları ise %4'e kadar beton içerisine eklenmiştir.

Bu tez çalışmasının nihai amacı, beton karışım oranları için hesap metotları ortaya koymaktır. Bu bölümde deneylerde kullanılan malzemeler ve deney metotları, yapılan deneylerin sonuçları Bölüm 4'de, geliştirilen karışım oranları hesap metotları ise Bölüm 5'de sunulmuştur.

3.1. Kullanılan Malzemeler Ve Özellikleri

Çevre dostu beton üretimi için özellikleri aşağıda verilen agregalar, çimento, su, atık mermer tozu, atık lastik agrega, uçucu kül ve kimyasal katkı maddesi olarak da süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

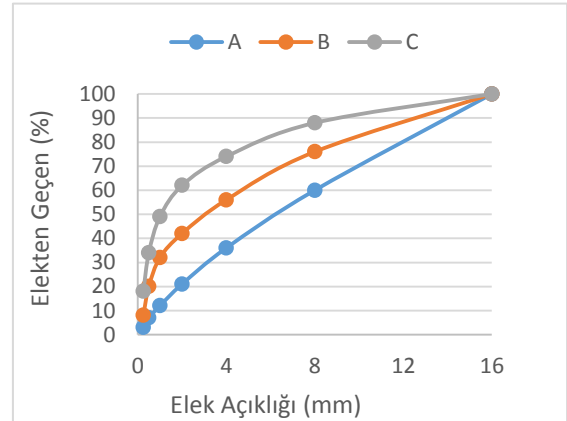
3.1.1. Agregalar

TS 706 EN 12620 standartlarına uygun olarak, her iki deney grubu içinde agregaların dane büyüklüğü maksimum 16 mm seçilmiş ve kırma taş kalker agrega kullanılmıştır [152]. Beton karışımlarında kullanılan agregalar etüv kurusu durumdadır. Kullanılan agregaların birim hacim ağırlığı ortalama 2.68 gr/cm^3 ve su emmesi ortalama %1.2'dir [153]. Birinci adım deneyler olan sadece atık mermer tozu ile yapılan deneylerde 3 farklı granülometri dağılımına sahip agrega grupları kullanılmıştır. Bunlar A, B ve C olarak isimlendirilip, boyutlarının dağılımlarına göre gruplandırılmışlardır [154]. Yani beton santralinden alınan agregalar her elekten elenip, boyutlarına göre 7 gruba ayrılmışlardır. Bu gruplara ait elek analizleri sonuçları ve granülometrisi Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

İkinci adım deneylerde ise yani atık lastik agrega ve mermer tozu ile yapılan deneylerde ise agrega granülometrisi eğrisi olarak B eğrisi seçilmiştir. Karışımlarda her elek için ayrı ayrı agregalar tartılarak hazırlanmış ve kullanılmıştır [155].

Tablo 3.1. Agregaların granülometri eğrileri

Mak. Dane Çapı	A	B	C
16	100	100	100
8	60	76	88
4	36	56	74
2	21	42	62
1	12	32	49
0.5	7	20	34
0.25	3	8	18
Toplam elekten geçen (%)	239	334	425
İncelik modülü: k	4.61	3.66	2.75



3.1.2. Çimento

Bu çalışmada bütün deneylerde TS EN 197-1'e uygun olarak Elazığ Çimtaş Çimento Fabrikası A.Ş.'nin ürettiği CEM I 42.5 N tipi Portland Çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 3.2'de sunulmuştur [156].

Tablo 3.2. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	CEM I 42.5 N	Özellik	CEM I 42.5 N
SiO ₂ (%)	21.12	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	3.10
Al ₂ O ₃ (%)	5.62	Priz başı (dk)	150
Fe ₂ O ₃ (%)	3.24	Priz sonu (dk)	210
CaO (%)	62.94	İncelik (cm ² /g)	3490
Cl (%)	0.006	Basınç dayanımı. 3 gün	25.8
Ç. Kalıntı (%)	0.5	2 gün	26.0
K. Kaybı (%)	2.9	28 gün (MPa)	47.0

3.1.3. Mermer tozu

Elazığ Organize Sanayi Katı Atık Sahasından mermer çamuru temin edilmiştir. Elde edilen çamur ilk önce açık havada kurutulmuş ve daha sonra Los Angeles aşınma cihazında öğütülmüştür. Atık mermer tozu bu şekilde elde edilmiştir. Beton karışımlarında Elazığ iline ait olan vişne mermere ait atık mermer tozu kullanılmıştır. Bu malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.3’de sunulmuştur [157].

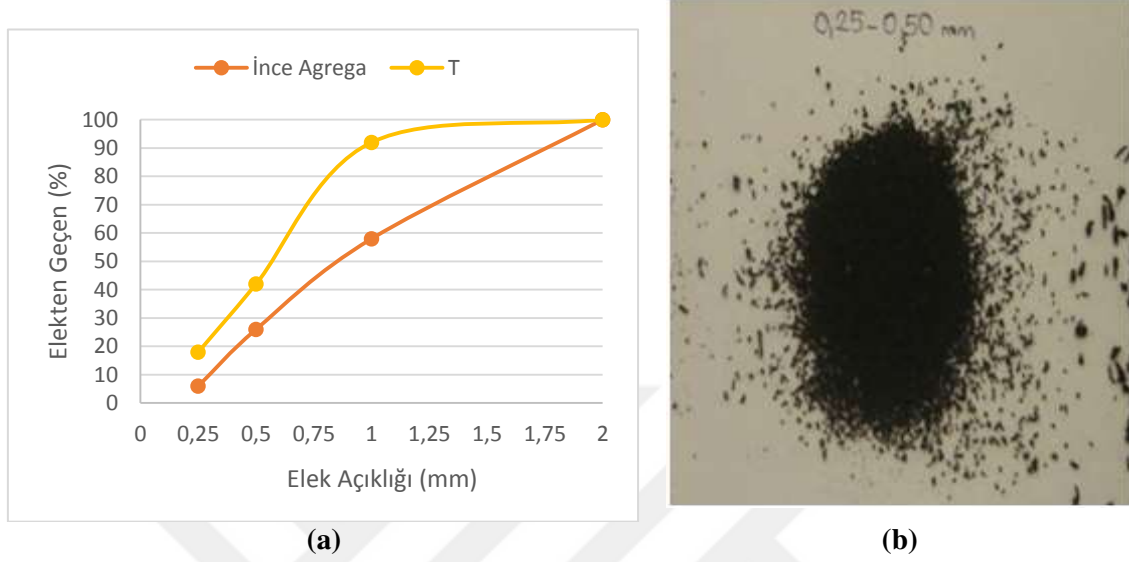
Tablo 3.3. Atık mermer tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	Mermer tozu
Yoğunluk	2.71
Specific surface area (cm ² /g)	3924
CaO (%)	40.45
SiO ₂ (%)	28.35
Fe ₂ O ₃ (%)	9.7
MgO (%)	16.25

3.1.4. Atık lastik agrega

Deney çalışmalarında kullanılan lastik agregalar (T), lastik kaplama imalatında ki atık lastiklerin mekanik kesme aleti ile kesilmesiyle elde edilir [158]. Kesilen lastik parçacıkları eleklerden elenerek 0.25, 0.50, 1 ve 2 mm olmak üzere (ince agrega) sınıflandırılmışlardır. İnce lastik agregaların özgül ağırlığı 1.22 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. Karışım hesabı yapılırken %18 oranında 0.25 numaralı, %24 oranında 2 numaralı, %50 oranında 1 numaralı ve %8 oranında 2

numaralı atık lastik agregalar karıştırılarak kullanılmıştır. Lastik agregalara ait elek analizi grafiği ve bir örnek fotoğrafı Şekil 3.1a ve Şekil 3.1b’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Atık lastik agregalar a) Granülometri eğrisi, b) Görünüş

3.1.5. Karışım Suyu

Deneysel çalışmalarında TS EN 1008 (2003)’e uygun olan Elazığ İli şehir şebeke suyu kullanılmıştır [159].

3.1.6. Uçucu kül

Bu çalışmada Çayırhan Termik Santrali’ne ait uçucu kül temin edilerek kullanılmıştır. Uçucu külün kimyasal analizleri yapılarak sonuçlarına göre reaktif kireç miktarı %10’nun altında olması sebebiyle TS EN 197-1 standardında V sınıfında (silisli uçucu kül) bulunmaktadır. Ayrıca ASTM C618 standardına göre $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ değerinin %70’in üzerinde olması nedeniyle F sınıfına (düşük kireçli) dâhil olmakla birlikte analitik CaO miktarının %10’un üzerinde olması sebebiyle kireçsi kül sınıfına da girmektedir. Bu sebeple, iki uçucu kül sınıfı içerisinde bu değerlerin sınırda olduğu görülmüştür [160].

3.1.7. Kimyasal Katkı

Kimyasal katkı olarak Chyrso Fluid Optima 284 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu yeni nesil polikarboksilat bazlı bir süper akışkanlaştırıcıdır ve yaz-kış aylarında kıvam koruyan,

yüksek erken ve nihai dayanım istenen betonlar için özel olarak önerilmektedir. [161]. Bu akışkanlaştırıcı için teknik özellikler Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Kimyasal katkının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Görünüm	Sıvı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1.085 – 0.02 gr/cm ³
pH	5
Klorür İçeriği	<%0.1

3.2. Beton Karışım Hesapları

Bu tez çalışmasında, birinci adım deneylerde mermer tozu hacimce ince agregası (0-4 mm) ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. İkinci adım deneylerde ise beton karışımının toplam hacminden (1000 dm³) belirli oranlarda mermer tozu, lastik agregası ve uçucu kül hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır.

3.2.1. Atık Mermer Tozu ile Üretilmiş Çevre Dostu Betonların Karışım Hesapları

Beton karışım oranları hesapları TS 802’ye uygun olarak hazırlanmıştır. Karışım oranları hazırlanırken maksimum agregası çapı 16 mm ve Su/Çimento oranı deneme karışımları ile tespit edilmiştir. Çevre dostu betonlara ait karışım oranları belirlenirken uygulamada kullanılan karışım değerlerine yakın değerler kullanılmasına özen gösterilmiştir. Bu nedenle çimento miktarı 320 ile 500 kg/m³ arasında seçilmiştir. S/Ç (su/çimento) oranı işlenebilir bir beton elde edebilecek miktarda seçilmeye öze gösterilmiştir. Karışım hesaplarında ana hedef, mermer tozunun kullanılabileceği en üst miktarlarda kullanılmasıdır. Bu nedenle taze beton çökme değeri kuru kıvamı azalana kadar mermer tozu oranı artarak kullanılmaya devam edilmiştir.

Farklı granülometrilere sahip beton karışım oranları Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de verilmiştir. Deneylere ara değer olan B granülometri eğrisi ile başlandığı için Tablo 3.5’de öncelikle bu serilere ait karışım değerleri sunulmuştur. A ve C eğrilerine ait karışım değerleri ise sırasıyla Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Mermer tozu kullanılmış betonların karışım miktarları (B granülometrisi)

Seri Adları	Ç	S	S/Ç	MT (%)	MT	Kk	İri	İnce	G
320-0.55-MT00-1.5	320	176	0.55	0	0	1.5	826	977	B
320-0.55-MT10-1.5	320	176	0.55	10	106	1.5	826	871	B
320-0.55-MT20-1.5	320	176	0.55	20	213	1.5	826	764	B
320-0.6-MT0-1.5	320	192	0.6	0	0	1.5	807	954	B
320-0.6-MT10-1.5	320	192	0.6	10	104	1.5	807	850	B
320-0.6-MT20-1.5	320	192	0.6	20	208	1.5	807	746	B
320-0.6-MT30-1.5	320	192	0.6	30	312	1.5	807	642	B
400-0.55-MT00-1.5	400	220	0.55	0	0	1.5	744	879	B
400-0.55-MT10-1.5	400	220	0.55	10	96	1.5	744	783	B
400-0.55-MT20-1.5	400	220	0.55	20	192	1.5	744	687	B
400-0.55-MT30-1.5	400	220	0.55	30	287	1.5	744	592	B
400-0.55-MT40-1.5	400	220	0.55	40	479	1.5	744	400	B
400-0.55-MT50-2	400	220	0.55	50	479	2	744	400	B
500-0.5-MT0-1.5	500	250	0.5	0	0	1.5	671	793	B
500-0.5-MT20-1.5	500	250	0.5	20	173	1.5	671	620	B
500-0.5-MT30-1.5	500	250	0.5	30	259	1.5	671	534	B
500-0.5-MT40-1.5	500	250	0.5	40	345	1.5	671	448	B
500-0.5-MT50-1.5	500	250	0.5	50	432	1.5	671	361	B

Ç: Çimento (kg/m³), S: Su (kg/m³), S/Ç: Su/Çimento, MT: Mermer Tozu (kg/m³), Kk: Kimyasal Katkı (%), İri: İri Agrega (kg/m³), İnce: İnce Agrega (kg/m³), G: Granülometri Eğrisi

Tablo 3.6. Mermer tozu kullanılmış betonların karışım miktarları (A granülometrisi)

Seri Adları	Ç	S	S/Ç	MT (%)	MT	Kk	İri	İnce	G
320-0.6-MT0-1.5	320	192	0.6	0	0.0	1.5	1174	661	A
320-0.6-MT10-1.5	320	192	0.6	10	67.0	1.5	1174	594	A
320-0.6-MT20-1.5	320	192	0.6	20	134.0	1.5	1174	527	A
320-0.6-MT30-1.5	320	192	0.6	30	200.0	1.5	1174	461	A
320-0.6-MT40-1.5	320	192	0.6	40	267.0	1.5	1174	394	A
320-0.55-MT0-1.5	320	176	0.55	0	0.0	1.5	1202	676	A
320-0.55-MT10-1.5	320	176	0.55	10	68.0	1.5	1203	608	A
320-0.55-MT20-1.5	320	176	0.55	20	137.0	1.5	1203	539	A
320-0.55-MT30-1.5	320	176	0.55	30	205.0	1.5	1203	472	A
320-0.55-MT40-1.5	320	176	0.55	40	274.0	1.5	1204	403	A
320-0.55-MT50-1.5	320	176	0.55	50	342.0	1.5	1204	335	A
400-0.55-MT0-1.5	400	220	0.55	0	0.0	1.5	1082	609	A
400-0.55-MT10-1.5	400	220	0.55	10	62.0	1.5	1083	547	A
400-0.55-MT20-1.5	400	220	0.55	20	123.0	1.5	1083	486	A
400-0.55-MT30-1.5	400	220	0.55	30	185.0	1.5	1084	424	A
400-0.55-MT40-1.5	400	220	0.55	40	246.0	1.5	1084	363	A
400-0.55-MT50-1.5	400	220	0.55	50	308.0	1.5	1084	302	A
480-0.55-MT0-1.5	480	264	0.55	0	0.0	1.5	963	541	A
480-0.55-MT10-1.5	480	264	0.55	10	55.0	1.5	963	486	A
480-0.55-MT20-1.5	480	264	0.55	20	110.0	1.5	963	431	A
480-0.55-MT30-1.5	480	264	0.55	30	164.0	1.5	964	378	A
480-0.55-MT40-1.5	480	264	0.55	40	219.0	1.5	963	322	A
480-0.55-MT50-1.5	480	264	0.55	50	274.0	1.5	963	267	A

Ç: Çimento (kg/m³), S: Su (kg/m³), S/Ç: Su/Çimento, MT: Mermer Tozu (kg/m³), Kk: Kimyasal Katkı (%), İri: İri Agrega (kg/m³), İnce: İnce Agrega (kg/m³), G: Granülometri Eğrisi

Tablo 3.7. Mermer tozu kullanılmış betonların karışım miktarları (C granülometrisi)

Seri Adları	Ç	S	S/Ç	MT (%)	MT	Kk	İri	İnce	G
320-0.6-MT0-1.5	320	192	0.6	0	0	1.5	477	1358	C
320-0.6-MT10-1.5	320	192	0.6	10	137.0	1.5	477	1221	C
320-0.6-MT20-1.5	320	192	0.6	20	275.0	1.5	477	1083	C
320-0.6-MT30-1.5	320	192	0.6	30	412.0	1.5	477	946	C
320-0.6-MT40-1.5	320	192	0.6	40	549.0	1.5	477	809	C
320-0.55-MT0-1.5	320	176	0.55	0	0.0	1.5	488	1390	C
320-0.55-MT10-1.5	320	176	0.55	10	141.0	1.5	488	1249	C
320-0.55-MT20-1.5	320	176	0.55	20	281.0	1.5	488	1109	C
400-0.55-MT0-1.5	400	220	0.55	0	0.0	1.5	440	1251	C
400-0.55-MT10-1.5	400	220	0.55	10	127.0	1.5	440	1124	C
400-0.55-MT20-1.5	400	220	0.55	20	253.0	1.5	440	998	C
400-0.55-MT30-1.5	400	220	0.55	30	380.0	1.5	441	874	C
400-0.55-MT40-1.5	400	220	0.55	40	506.0	1.5	440	745	C
400-0.55-MT50-1.5	400	220	0.55	50	633.0	1.5	440	618	C
480-0.55-MT0-1.5	480	264	0.55	0	0.0	1.5	391	1113	C
480-0.55-MT10-1.5	480	264	0.55	10	113.0	1.5	391	1000	C
480-0.55-MT20-1.5	480	264	0.55	20	225.0	1.5	391	888	C
480-0.55-MT30-1.5	480	264	0.55	30	338.0	1.5	392	777	C
480-0.55-MT40-1.5	480	264	0.55	40	450.0	1.5	391	663	C
480-0.55-MT50-1.5	480	264	0.55	50	563.0	1.5	391	550	C

Ç:Çimento (kg/m³), S: Su (kg/m³), S/Ç: Su/Çimento, MT: Mermer Tozu (kg/m³), Kk: Kimyasal Katkı (%), İri: İri Agrega (kg/m³), İnce: İnce Agrega (kg/m³), G: Granülometri Eğrisi

3.2.2. Atık Mermer Tozu, Atık Lastik Agrega ve Uçucu Kül ile Üretilmiş Çevre Dostu Betonların Karışım Hesapları

TS 802'ye uygun olarak hazırlanan karışım oranları hesaplarında maksimum dane çapı 16 mm olarak alınırken, su/çimento oranı deneme karışımları ile tespit edilmiştir. Çimento miktarı, 320 kg/m³, 400 kg/m³ ve 480 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Agrega granülometrisi B eğrisine göre yapılmıştır. Toplam beton hacminde atık malzemeler hacimce yer değiştirilerek, karışım miktarları hesaplanmıştır. %2.5 ve %5 oranlarında atık mermer tozu ile %2 ve %4 atık lastik agregası ile yer değiştirilmesine göre ve %2 ve %4 oranlarında uçucu kül ilavesi ile karışım hesapları yapılmıştır. Bu karışım miktarları Tablo 3.8'de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Tablolardaki kısaltmaların anlamları ise her tablonun en alt satırında sunulmuştur.

Tablo 3.8. Mermer tozu, lastik agregası ve uçucu kül kullanılmış betonların karışım miktarları

Seri Adları	Ç	S	S/Ç	T	T (%)	MT	MT (%)	UK	UK (%)	Kk	İri	İnce
320-0.55-T0-MT0-UK0	320	176	0.55	0	0	0.0	0	0	0	1.2	637.4	1183.8
320-0.55-T0-MT0-UK2	320	176	0.55	0	0	0.0	0	47.6	2	1.2	619.2	1150
320-0.55-T0-MT0-UK4	320	176	0.55	0	0	0.0	0	95.2	4	1.2	601	1116.2
320-0.55-T0-MT2.5-UK0	320	176	0.55	0	0	67.8	2.5	0	0	1.2	614.7	1141.5
320-0.55-T0-MT2.5-UK2	320	176	0.55	0	0	67.8	2.5	47.6	2	1.2	596.5	1107.7
320-0.55-T0-MT2.5-UK4	320	176	0.55	0	0	67.8	2.5	95.2	4	1.2	578.3	1074
320-0.55-T0-MT5-UK0	320	176	0.55	0	0	135.5	5	0	0	1.2	591.9	1099.3
320-0.55-T0-MT5-UK2	320	176	0.55	0	0	135.5	5	47.6	2	1.2	573.7	1065.5
320-0.55-T0-MT5-UK4	320	176	0.55	0	0	135.5	5	95.2	4	1.2	555.6	1031.7
320-0.55-T2-MT0-UK0	320	176	0.55	24.4	2	0.0	0	0	0	1.2	619.2	1150
320-0.55-T2-MT0-UK2	320	176	0.55	24.4	2	0.0	0	47.6	2	1.2	601	1116.2
320-0.55-T2-MT0-UK4	320	176	0.55	24.4	2	0.0	0	95.2	4	1.2	582.8	1082.4
320-0.55-T2-MT2.5-UK0	320	176	0.55	24.4	2	67.8	2.5	0	0	1.2	596.5	1107.7
320-0.55-T2-MT2.5-UK2	320	176	0.55	24.4	2	67.8	2.5	47.6	2	1.2	578.3	1074
320-0.55-T2-MT2.5-UK4	320	176	0.55	24.4	2	67.8	2.5	95.2	4	1.2	560.1	1040.2
320-0.55-T2-MT5-UK0	320	176	0.55	24.4	2	135.5	5	0	0	1.2	573.7	1065.5
320-0.55-T2-MT5-UK2	320	176	0.55	24.4	2	135.5	5	47.6	2	1.2	555.6	1031.7
320-0.55-T2-MT5-UK4	320	176	0.55	24.4	2	135.5	5	95.2	4	1.2	537.4	998
320-0.55-T4-MT0-UK0	320	176	0.55	48.8	4	0.0	0	0	0	1.2	601	1116.2
320-0.55-T4-MT0-UK2	320	176	0.55	48.8	4	0.0	0	47.6	2	1.2	582.8	1082.4
320-0.55-T4-MT0-UK4	320	176	0.55	48.8	4	0.0	0	95.2	4	1.2	564.4	1048.6
320-0.55-T4-MT2.5-UK0	320	176	0.55	48.8	4	67.8	2.5	0	0	1.2	578.3	1074
320-0.55-T4-MT2.5-UK2	320	176	0.55	48.8	4	67.8	2.5	47.6	2	1.2	560.1	1040.2
320-0.55-T4-MT2.5-UK4	320	176	0.55	48.8	4	67.8	2.5	95.2	4	1.2	541.9	1006.4
320-0.55-T4-MT5-UK0	320	176	0.55	48.8	4	135.5	5	0	0	1.2	555.6	1031.7
320-0.55-T4-MT5-UK2	320	176	0.55	48.8	4	135.5	5	47.6	2	1.2	537.4	998
320-0.55-T4-MT5-UK4	320	176	0.55	48.8	4	135.5	5	95.2	4	1.2	519.2	964.2
400-0.52-T0-MT0-UK0	400	208	0.52	0	0	0.0	0	0	0	1.2	584.8	1086.1
400-0.52-T0-MT0-UK2	400	208	0.52	0	0	67.8	2.5	47.6	2	1.2	543.9	1010.1
400-0.52-T0-MT0-UK4	400	208	0.52	0	0	135.5	5	95.2	4	1.2	503	934.1
400-0.52-T2-MT0-UK0	400	208	0.52	24.4	2	0.0	0	0	0	1.2	566.6	1052.3
400-0.52-T2-MT2.5-UK2	400	208	0.52	24.4	2	67.8	2.5	47.6	2	1.2	525.7	976.3
400-0.52-T2-MT5-UK4	400	208	0.52	24.4	2	135.5	5	95.2	4	1.2	484.8	900.3
400-0.52-T2-MT5-UK0	400	208	0.52	24.4	2	135.5	5	0	0	1.2	521.2	967.9
400-0.52-T4-MT0-UK2	400	208	0.52	48.8	4	0.0	0	47.6	2	1.2	530.2	984.8
400-0.52-T4-MT2.5-UK4	400	208	0.52	48.8	4	67.8	2.5	95.2	4	1.2	489.3	908.7
400-0.52-T4-MT5-UK2	400	208	0.52	48.8	4	135.5	5	47.6	2	1.2	484.8	900.3
400-0.47-T0-MT0-UK0	400	188	0.47	0	0	0.0	0	0	0	1.2	603	1119.9
400-0.47-T0-MT0-UK2	400	188	0.47	0	0	67.8	2.5	47.6	2	1.2	562.1	1043.9
400-0.47-T0-MT0-UK4	400	188	0.47	0	0	135.5	5	95.2	4	1.2	521.2	967.9
400-0.47-T2-MT0-UK0	400	188	0.47	24.4	2	0.0	0	0	0	1.2	584.8	1086.1
400-0.47-T2-MT2.5-UK2	400	188	0.47	24.4	2	67.8	2.5	47.6	2	1.2	543.9	1010.1
400-0.47-T2-MT5-UK4	400	188	0.47	24.4	2	135.5	5	95.2	4	1.2	503	934.1
400-0.47-T2-MT5-UK0	400	188	0.47	24.4	2	135.5	5	0	0	1.2	539.3	1001.7
400-0.47-T4-MT0-UK2	400	188	0.47	48.8	4	0.0	0	47.6	2	1.2	548.5	1018.5
400-0.47-T4-MT2.5-UK4	400	188	0.47	48.8	4	67.8	2.5	95.2	4	1.2	507.5	942.5
400-0.47-T4-MT5-UK2	400	188	0.47	48.8	4	135.5	5	47.6	2	1.2	503	934.1
480-0.50-T0-MT0-UK0	480	240	0.5	0	0	0.0	0	0	0	1.2	532.3	988.5
480-0.50-T0-MT2.5-UK2	480	240	0.5	0	0	67.8	2.5	47.6	2	1.2	491.3	912.5
480-0.50-T0-MT5-UK4	480	240	0.5	0	0	135.5	5	95.2	4	1.2	450.4	836.4
480-0.50-T2-MT0-UK0	480	240	0.5	24.4	2	0.0	0	0	0	1.2	514.1	954.7
480-0.50-T2-MT2.5-UK2	480	240	0.5	24.4	2	67.8	2.5	47.6	2	1.2	473.1	878.7
480-0.50-T2-MT5-UK4	480	240	0.5	24.4	2	135.5	5	95.2	4	1.2	432.2	802.7
480-0.50-T2-MT5-UK0	480	240	0.5	24.4	2	135.5	5	0	0	1.2	468.6	870.2

Ç: Çimento (kg/m³), S: Su (kg/m³), S/Ç: Su/Çimento, T: Lastik Agregası (kg/m³), MT: Mermer Tozu (kg/m³), UK: Uçucu Kül (kg/m³), Kk: Kimyasal Katkı (%), İri: İri Agregası (kg/m³), İnce: İnce Agregası (kg/m³)

3.3. Beton Numunelerinin Hazırlanma Yöntemi

Sadece mermer tozu kullanılarak üretilmiş çevre dostu betonlara ait birinci adım deney serilerine ve mermer tozu, lastik agrega ve uçucu kül kullanılarak üretilmiş çevre dostu betonlara ait ikinci adım deney serilerine ait deneysel çalışmalara ait test metotları ve deney sistemleri alt bölümlerde açıklanmıştır.

3.3.1. Atık Mermer Tozlu ile Üretilen Çevre Dostu Betonlar

Üretilen her bir seri taze beton ilk önce çökme testine tabi tutulmuştur. Daha sonra 150x150x150 mm³ boyutlarındaki küp numunelere yerleştirilmişlerdir. Hazırlanan numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıplarından söküm işlemleri yapılarak numuneler Şekil 3.2’de gösterildiği gibi kür havuzlarına yerleştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.2. Mermer tozu ile üretilmiş çevre dostu beton numuneler a) Kalıp içinde görünüş b) Kür havuzunda görünüş

3.3.2. Atık Lastik Agrega, Mermer Tozu ve Uçucu Kül ile Üretilen Betonlar

Üretilen her bir seri taze beton ilk önce çökme testine tabi tutulmuştur. Daha sonra $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki standart küp numunelere ve $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki küp numunelere yerleştirilmişlerdir. Yerleştirme işlemi 2 sefer de ve TS EN 12390-1'e uygun olarak yapılmıştır. Hazırlanan numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıplarından söküm işlemleri yapılarak numuneler Şekil 3.3'de gösterildiği gibi kür havuzlarına yerleştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.3. Lastik agregası, mermer tozu ve uçucu kül ile üretilmiş çevre dostu beton numuneleri a) Kalıp içinde görünüşü b) Kür havuzunda görünüşü

3.4. Slump Testi (Çökme Deneyi) Taze Beton Deneyi

Taze beton deneylerinden birisi olan Çökme Deneyi, TS EN 12350-2'ye uygun olarak yapılır. Burada amaç betonun işlenebilirliğini tespit etmektir. Standartlara göre çökme deneyinde metal malzemeli alt ve üst uçları açık olan kesik koni şeklindeki bir huni ve bu huni içerisine yerleştirilecek beton karışımının şişlenmesi amacıyla ucu törpülenmiş çelik çubuk kullanılmaktadır. Çökme hunisinin tabanı 20 cm, üst yüzünün çapı 10 cm ve yüksekliği ise 30 cm'dir. Karışım toplam 3 seferde sırasıyla doldurulur, her seferde dairesel olarak toplam 25'er kez şişlenmektedir. Son şişleme işleminden sonra ise mala ile üstü düzeltilir. Daha sonra bu huni yanlarında ki ayaklarından yavaşça tutularak dengeli bir şekilde yukarı doğru kaldırılır. Bu işlem ne çok hızlı ne de çok yavaş olmalıdır. Burada amaç harç karışımının kendi doğal durumu ile çökmesinin izlenmesidir. Betonun kıvamına göre çökme miktarı değişecektir. Ardından çıkarılan bu huni beton karışımının yanına dik bir şekilde yerleştirilir ve bu kabın üst kotu ile beton karışımının üst kotu arasındaki mesafe ölçülerek kaydedilir. Bu ölçü beton karışımının çökme miktarını göstermektedir. Genelde uygulama yapılacak yerdeki istenen beton ihtiyacına göre istenilen beton çökme değeri değişse de ne çok katı ne de çok akışkan olması tercih edilmez [65]. Çökme miktarına göre sınıflandırma metodu mevcut yürürlükteki standart olan TS EN 206:2013+A1'e göre Tablo 3.9'da gösterilmiştir. Tablo 3.10 ve Tablo 3.11'de farklı karışım oranlarına ve farklı granülometrilere ait serilerin çökme deneyi sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.9. Çökme deneyi sınıflandırması

Sınıf	Çökme (mm)
S1	10 - 40
S2	50 -90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	> 220

Tablo 3.10. Mermer tozu ile yapılan deneylere ait çökme testi sonuçları

Granülometri: A		Granülometri: B		Granülometri: C	
Seri Adı	Çökme (cm)	Seri Adı	Çökme (cm)	Seri Adı	Çökme (cm)
320-0.6-MT0-1.5	16	320-0.55-MT00-1.5	11	320-0.6-MT0-1.5	9
320-0.6-MT10-1.5	18	320-0.55-MT10-1.5	9	320-0.6-MT10-1.5	15
320-0.6-MT20-1.5	18	320-0.55-MT20-1.5	4	320-0.6-MT20-1.5	12
320-0.6-MT30-1.5	14	320-0.6-MT0-1.5	14	320-0.6-MT30-1.5	3
320-0.6-MT40-1.5	10	320-0.6-MT10-1.5	17	320-0.6-MT40-1.5	1
320-0.55-MT0-1.5	12	320-0.6-MT20-1.5	16	320-0.55-MT0-1.5	6
320-0.55-MT10-1.5	14	320-0.6-MT30-1.5	4	320-0.55-MT10-1.5	7
320-0.55-MT20-1.5	13	400-0.55-MT00-1.5	17	320-0.55-MT20-1.5	2
320-0.55-MT30-1.5	12	400-0.55-MT10-1.5	19	400-0.55-MT0-1.5	16
320-0.55-MT40-1.5	9	400-0.55-MT20-1.5	20	400-0.55-MT10-1.5	18
320-0.55-MT50-1.5	6	400-0.55-MT30-1.5	16	400-0.55-MT20-1.5	18
400-0.55-MT0-1.5	19	400-0.55-MT40-1.5	13	400-0.55-MT30-1.5	15
400-0.55-MT10-1.5	20	400-0.55-MT50-2	8	400-0.55-MT40-1.5	11
400-0.55-MT20-1.5	21	500-0.5-MT0-1.5	19	400-0.55-MT50-1.5	6
400-0.55-MT30-1.5	20	500-0.5-MT20-1.5	21	480-0.55-MT0-1.5	20
400-0.55-MT40-1.5	18	500-0.5-MT30-1.5	17	480-0.55-MT10-1.5	21
400-0.55-MT50-1.5	14	500-0.5-MT40-1.5	9	480-0.55-MT20-1.5	22
480-0.55-MT0-1.5	18	500-0.5-MT50-1.5	6	480-0.55-MT30-1.5	18
480-0.55-MT10-1.5	19			480-0.55-MT40-1.5	12
480-0.55-MT20-1.5	19			480-0.55-MT50-1.5	8
480-0.55-MT30-1.5	17				
480-0.55-MT40-1.5	16				
480-0.55-MT50-1.5	13				

Tablo 3.11. Atık lastik agrega, mermer tozu ve uçucu kül ile yapılan deneylere ait çökme testi sonuçları

Seri Adı	Çökme (cm)	Seri Adı	Çökme (cm)	Seri Adı	Çökme (cm)
320-0.55-T0-MT0-UK0	13	320-0.55-T4-MT0-UK0	11	400-0.52-T4-MT5-UK2	9
320-0.55-T0-MT0-UK2	18	320-0.55-T4-MT0-UK2	13	400-0.47-T0-MT0-UK0	14
320-0.55-T0-MT0-UK4	21	320-0.55-T4-MT0-UK4	16	400-0.47-T0-MT0-UK2	18
320-0.55-T0-MT2.5-UK0	12	320-0.55-T4-MT2.5-UK0	7	400-0.47-T0-MT0-UK4	17
320-0.55-T0-MT2.5-UK2	17	320-0.55-T4-MT2.5-UK2	10	400-0.47-T2-MT0-UK0	13
320-0.55-T0-MT2.5-UK4	19	320-0.55-T4-MT2.5-UK4	12	400-0.47-T2-MT2.5-UK2	13
320-0.55-T0-MT5-UK0	9	320-0.55-T4-MT5-UK0	4	400-0.47-T2-MT5-UK4	14
320-0.55-T0-MT5-UK2	14	320-0.55-T4-MT5-UK2	6	400-0.47-T2-MT5-UK0	9
320-0.55-T0-MT5-UK4	16	320-0.55-T4-MT5-UK4	7	400-0.47-T4-MT0-UK2	15
320-0.55-T2-MT0-UK0	12	400-0.52-T0-MT0-UK0	16	400-0.47-T4-MT2.5-UK4	14
320-0.55-T2-MT0-UK2	15	400-0.52-T0-MT0-UK2	18	400-0.47-T4-MT5-UK2	7
320-0.55-T2-MT0-UK4	17	400-0.52-T0-MT0-UK4	18	480-0.50-T0-MT0-UK0	17
320-0.55-T2-MT2.5-UK0	9	400-0.52-T2-MT0-UK0	14	480-0.50-T0-MT2.5-UK2	20
320-0.55-T2-MT2.5-UK2	12	400-0.52-T2-MT2.5-UK2	15	480-0.50-T0-MT5-UK4	18
320-0.55-T2-MT2.5-UK4	13	400-0.52-T2-MT5-UK4	15	480-0.50-T2-MT0-UK0	16
320-0.55-T2-MT5-UK0	7	400-0.52-T2-MT5-UK0	10	480-0.50-T2-MT2.5-UK2	15
320-0.55-T2-MT5-UK2	11	400-0.52-T4-MT0-UK2	16	480-0.50-T2-MT5-UK4	16
320-0.55-T2-MT5-UK4	13	400-0.52-T4-MT2.5-UK4	15	480-0.50-T2-MT5-UK0	12

3.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.5.1. Basınç Deneyi

Standart beton numuneler, TS EN 12390-2'ye uygun olarak hazırlandı ve su küre tâbi tutuldular. Numunelerin basınç dayanımları TS EN 12390-3'e göre belirlendiler.

Basınç deneyinde 2500 kN kapasiteli beton test presi kullanılmıştır. Cihaza yerleştirilmiş numuneler 6.8 MPa/sn'lik sabit hızla yüklenmiş ve kırılma yükleri belirlenmiştir. Bu deney sonuçları dikkate alınarak hesaplanan beton basınç dayanımı değerleri Tablo 3.12 ve Tablo 3.13'de verilmiştir.

Birinci adım deneyler için her beton serisinden 6 adet numune alınmış, bunların üçü 7. Gününde diğer üçü de 28. Gününde teste tabi tutulmuşlardır. Ancak ikinci adım deneylerde beton karışımlarda üç farklı atık malzeme kullanıldığından, her beton serisinden 12 adet numune alınmış ve beton numuneler 3, 7, 28 ve 90. günlerde teste tabi tutulmuşlardır.

Tablo 3.12. Mermer tozu ile yapılan deneylere ait basınç dayanımı test sonuçları (MPa)

Granülometri: A			Granülometri: B			Granülometri: C		
Seri Adı	$f_{c,küp}$		Seri Adı	$f_{c,küp}$		Seri Adı	$f_{c,küp}$	
	7. gün	28. gün		7. gün	28. gün		7. gün	28. gün
320-0.6-MT0-1.5	30.2	37.3	320-0.55-MT00-1.5	38.1	44.1	320-0.6-MT0-1.5	35.8	44.8
320-0.6-MT10-1.5	32.9	41.6	320-0.55-MT10-1.5	39.9	45.9	320-0.6-MT10-1.5	37.9	48.6
320-0.6-MT20-1.5	32.0	41.6	320-0.55-MT20-1.5	40.6	46.5	320-0.6-MT20-1.5	30.5	38.1
320-0.6-MT30-1.5	27.3	33.3	320-0.6-MT0-1.5	33.7	42.1	320-0.6-MT30-1.5	23.7	30.0
320-0.6-MT40-1.5	24.1	30.1	320-0.6-MT10-1.5	37.1	47.6	320-0.6-MT40-1.5	20.9	27.4
320-0.55-MT0-1.5	32.9	40.3	320-0.6-MT20-1.5	38.9	47.4	320-0.55-MT0-1.5	38.9	45.5
320-0.55-MT10-1.5	34.1	44.0	320-0.6-MT30-1.5	35.3	43.6	320-0.55-MT10-1.5	41.3	50.9
320-0.55-MT20-1.5	36.4	45.0	400-0.55-MT00-1.5	39.9	51.1	320-0.55-MT20-1.5	33.2	41.4
320-0.55-MT30-1.5	32.8	41.0	400-0.55-MT10-1.5	44.3	56.1	400-0.55-MT0-1.5	41.6	53.0
320-0.55-MT40-1.5	29.1	36.4	400-0.55-MT20-1.5	45.1	57.1	400-0.55-MT10-1.5	46.3	57.2
400-0.55-MT0-1.5	35.9	49.2	400-0.55-MT30-1.5	41.4	53.1	400-0.55-MT20-1.5	36.1	46.3
400-0.55-MT10-1.5	37.4	51.9	400-0.55-MT40-1.5	40.8	49.8	400-0.55-MT30-1.5	27.9	36.5
400-0.55-MT20-1.5	38.9	50.2	500-0.5-MT0-1.5	45.0	57.0	400-0.55-MT40-1.5	22.7	29.5
400-0.55-MT30-1.5	34.5	41.8	500-0.5-MT20-1.5	47.6	61.0	480-0.55-MT0-1.5	46.5	58.1
400-0.55-MT40-1.5	31.1	36.8	500-0.5-MT30-1.5	44.1	57.3	480-0.55-MT10-1.5	48.3	61.9
400-0.55-MT50-1.5	28.6	33.6	500-0.5-MT40-1.5	42.3	55.7	480-0.55-MT20-1.5	40.1	51.4
480-0.55-MT0-1.5	38.9	48.0	500-0.5-MT50-1.5	41.1	54.8	480-0.55-MT30-1.5	31.3	39.1
480-0.55-MT10-1.5	41.9	53.0				480-0.55-MT40-1.5	24.7	30.9
480-0.55-MT20-1.5	43.6	53.8				480-0.55-MT50-1.5	22.8	27.5
480-0.55-MT30-1.5	36.1	44.6						
480-0.55-MT40-1.5	33.0	39.6						
480-0.55-MT50-1.5	31.6	37.2						

Tablo 3.13. Atık lastik agrega ve mermer tozu ile yapılan deneylere ait basınç dayanımı test sonuçları

Seri Adı	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün	Seri Adı	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
320-0.55-T0-MT0-UK0	36.6	40.1	42.9	48.7	400-0.52-T0-MT0-UK0	42.6	46.7	50.0	56.8
320-0.55-T0-MT0-UK2	42.7	44.3	51.0	56.2	400-0.52-T0-MT0-UK2	50.2	52.1	53.2	60.7
320-0.55-T0-MT0-UK4	43.2	46.7	53.8	60.6	400-0.52-T0-MT0-UK4	47.9	51.8	56.5	63.5
320-0.55-T0-MT2.5-UK0	39.6	42.2	46.5	52.5	400-0.52-T2-MT0-UK0	23.9	25.5	27.8	31.4
320-0.55-T0-MT2.5-UK2	43.7	46.6	53.7	57.4	400-0.52-T2-MT2.5-UK2	30.1	32.1	35.0	37.4
320-0.55-T0-MT2.5-UK4	45.6	48.3	55.1	63.1	400-0.52-T2-MT5-UK4	37.2	39.4	43.7	50.0
320-0.55-T0-MT5-UK0	33.9	35.6	39.5	45.3	400-0.52-T2-MT5-UK0	30.5	32.0	34.6	39.7
320-0.55-T0-MT5-UK2	39.2	42.2	49.2	53.4	400-0.52-T4-MT0-UK2	24.5	26.4	28.2	30.6
320-0.55-T0-MT5-UK4	40.9	45.8	52.4	58.5	400-0.52-T4-MT2.5-UK4	29.9	33.5	36.2	40.4
320-0.55-T2-MT0-UK0	19.4	23.0	26.6	29.6	400-0.52-T4-MT5-UK2	32.6	38.6	41.3	46.0
320-0.55-T2-MT0-UK2	22.6	32.4	36.4	39.4	400-0.47-T0-MT0-UK0	46.8	56.8	61.9	67.0
320-0.55-T2-MT0-UK4	25.2	34.2	39.2	43.9	400-0.47-T0-MT0-UK2	56.2	63.1	66.1	68.5
320-0.55-T2-MT2.5-UK0	22.9	27.8	32.8	37.4	400-0.47-T0-MT0-UK4	53.8	61.2	64.1	67.2
320-0.55-T2-MT2.5-UK2	26.0	34.4	37.7	43.8	400-0.47-T2-MT0-UK0	27.0	31.7	34.6	40.2
320-0.55-T2-MT2.5-UK4	30.3	36.8	42.0	52.1	400-0.47-T2-MT2.5-UK2	35.6	37.4	41.5	51.5
320-0.55-T2-MT5-UK0	27.0	31.0	35.8	40.8	400-0.47-T2-MT5-UK4	40.7	48.0	55.4	63.1
320-0.55-T2-MT5-UK2	31.0	36.7	41.7	46.8	400-0.47-T2-MT5-UK0	35.4	39.1	43.4	48.7
320-0.55-T2-MT5-UK4	32.1	37.7	43.7	54.7	400-0.47-T4-MT0-UK2	27.8	30.8	33.6	42.1
320-0.55-T4-MT0-UK0	17.9	18.8	24.5	27.6	400-0.47-T4-MT2.5-UK4	33.8	36.8	40.1	45.2
320-0.55-T4-MT0-UK2	21.3	25.1	31.4	35.3	400-0.47-T4-MT5-UK2	36.2	40.5	45.4	51.0
320-0.55-T4-MT0-UK4	24.6	27.2	36.1	40.9	480-0.50-T0-MT0-UK0	47.5	52.1	55.7	63.1
320-0.55-T4-MT2.5-UK0	18.7	20.7	26.1	30	480-0.50-T0-MT2.5-UK2	56.6	58.7	62.2	68.6
320-0.55-T4-MT2.5-UK2	25.1	27.3	32.8	35.9	480-0.50-T0-MT5-UK4	55.9	60.4	65.8	69.1
320-0.55-T4-MT2.5-UK4	26.9	30.1	38.1	41.5	480-0.50-T2-MT0-UK0	29.6	31.5	34.3	37.4
320-0.55-T4-MT5-UK0	20.8	25.1	28.5	32.2	480-0.50-T2-MT2.5-UK2	36.6	39.0	42.5	47.6
320-0.55-T4-MT5-UK2	28.5	30.9	34.9	37.6	480-0.50-T2-MT5-UK4	41.1	43.5	48.3	52.0
320-0.55-T4-MT5-UK4	29.6	33.9	38.9	42.4	480-0.50-T2-MT5-UK0	37.1	38.9	42.0	45.8

3.5.2. Kılcallık Deneyi

Kılcallık deneyi, sertleşmiş beton numunelerinde basınç altında su işleme derinliğinin belirlenmesi amacıyla kullanılır. Betonun düşük su geçirgenliğine sahip olması su sızdırmazlığının belirlenmesinde ve bunun dayanıklılık üzerindeki etkisi sebebiyle önem arz eder. Bununla birlikte betonarme sistem içerisindeki çelik sistemin su geçirgenliği sebebiyle korozyona uğramasını engellemek için önemlidir. TS EN 206:2013+A1 standardına göre beton malzemeleri ve karışımlarının ayrışma olmadan tamamen sıkıştırılarak su geçirimsizliğini sağlaması amaçlanır [162].

Atık lastik agrega ve mermer tozu ile yapılan ikinci adım deney çalışmaları için 100x100x100 mm³ ebatlarında ki beton numuneler 28. günün sonunda kür havuzlarından çıkarılıp, yüzeyleri temizlendi ve 24 saat etüvde kurutuldu. Kuru ağırlıkları ölçüldü. Numunelerin her tarafı geçirimsiz bant ile sarıldı. Bu şekilde içi su dolu bir tepsi içine alttan su girişi

kapanmayacak şekilde ve numunenin yaklaşık 1 cm'lik kısmı suyun içinde kalacak şekilde yerleştirildi. Sonra 1., 5., 10., 20., ve 30.dakikalarda ve 1., 2., 3., 4., 5., 6. saatlerde ve ilaveten 1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., 8., 9. günlerde sudan çıkartılıp ağırlığı ölçülerek kaydedildi. Bu sürenin sonunda yani 9. günün sonunda numunelerin etrafındaki bantlar sökülerek 4 bir tarafından suyun yükselme miktarı yani Kılcallık ölçüldü ve bu dört sonucun ortalama değeri alınarak kaydedildi. Daha sonra bu numune suyun içerisine konularak 24 saat bekletildi ve çıkarılıp tartıldı. Böylece suya doymuş birim hacim ağırlığı saptanmış oldu. Son olarak tekrar suyun içerisine konularak su ile birlikte tartıldı. Numunenin su içerisindeki ağırlığı tespit edildi ve kaydedildi. Deney sırasında çekilen fotoğraflardan bir örnek Şekil 3.4'de verilmiştir. Bu değerlere göre yapılan analiz sonucu beton numunelerin geçirimsizlik durumu belirlendi. Deney sonuçları sırasıyla Tablo 3.14 – Tablo 3.17'de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.4. Permeabilite deney numunesi

Başlangıç kılcallık katsayısı ve nihai kılcallık katsayısı için gerekli olan su işleme derinliği Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanır,

$$I = m_t / (a \times d) \quad (3.1)$$

Burada m_t : numunenin zamanla ağırlık değişimi (g), a : numunenin su ile temas eden yüzey alanı(mm^2), d : su yoğunluğu (gr/cm^3), I : Su işleme derinliği (mm)

Başlangıç kılcallık katsayısını belirlemek için (S_i), I değeri ile zamanın karekökü arasındaki ilişkiye ait eğri çizilir ($\sqrt{t}$). Eğim, S_i ($\text{mm}/\text{s}^{1/2}$)'nin hesaplanması ile elden edilen eğrinin doğrusal regresyon analizinin eğiminden hesaplanır. 1 dakikadan 6 saate kadar olan bütün zaman aralıklarında ki veriler regresyon analizi için kullanılır. Nihai emme katsayısının belirlenmesi için (S_s), I (su emme boyu) zamanın kareköküne karşı çizilir. S_s ($\text{mm}/\text{s}^{1/2}$), doğrusal regresyon analizinin çiziminin eğiminden hesaplanır. 1 günden 8 güne kadar olan tüm veriler regresyon analizinde kullanılır.

Tablo 3.14. İkinci adım deney serilerine ait permeabilite deneyi sonuçları-1

Seri Adı	320-0.55-T4-MT0-UK0	320-0.55-T4-MT0-UK2	320-0.55-T4-MT0-UK4	320-0.55-T4-MT2.5-UK0	320-0.55-T4-MT2.5-UK2	320-0.55-T4-MT2.5-UK4	320-0.55-T4-MT5-UK0	320-0.55-T4-MT5-UK2	320-0.55-T4-MT5-UK4
Zaman									
Kuru Ağırlık	1962.5	2012.3	2094.0	1986.6	1976.7	2136.7	2107.3	2169.6	2176.9
1 dk	1964.9	2014.9	2096.6	1988.8	1978.8	2138.6	2109.8	2172.7	2180.0
5 dk	1965.5	2015.6	2097.6	1989.8	1979.9	2139.7	2111.3	2174.2	2181.5
10 dk	1966.3	2016.6	2098.4	1990.5	1980.8	2140.5	2112.4	2175.3	2182.4
20 dk	1967.0	2017.5	2099.5	1991.4	1981.8	2141.4	2113.6	2176.5	2183.8
30 dk	1967.6	2018.2	2100.5	1992.4	1982.6	2142.1	2114.7	2177.5	2184.8
1 saat	1968.9	2019.5	2102.1	1993.8	1984.0	2143.4	2116.5	2179.3	2186.9
2 saat	1970.5	2021.2	2104.5	1996.0	1985.8	2145.0	2119.0	2181.5	2189.7
3 saat	1972.0	2022.7	2106.9	1998.1	1987.4	2146.5	2121.1	2183.5	2192.3
4 saat	1973.3	2024.0	2108.8	2000.0	1988.7	2147.7	2122.9	2185.2	2194.5
5 saat	1974.3	2025.0	2110.3	2001.5	1989.8	2148.7	2124.3	2186.5	2196.2
6 saat	1975.5	2025.9	2111.8	2003.0	1990.8	2149.7	2125.7	2187.7	2197.8
1 gün	1987.6	2038.7	2129.3	2021.1	2003.8	2162.1	2141.4	2203.9	2214.8
2 gün	2000.1	2048.3	2140.7	2033.7	2014.0	2171.9	2151.8	2214.8	2223.9
3 gün	2008.2	2055.3	2148.5	2043.0	2021.3	2178.7	2158.9	2222.5	2229.9
4 gün	2014.1	2060.4	2153.7	2049.6	2026.6	2183.7	2163.9	2228.2	2234.2
5 gün	2018.9	2064.1	2157.8	2055.7	2031.5	2187.4	2167.7	2234.1	2237.7
6 gün	2022.9	2068.1	2161.5	2059.5	2034.5	2191.2	2172.0	2236.7	2240.5
7 gün	2026.3	2071.1	2164.4	2063.0	2037.5	2194.2	2175.1	2240.1	2242.7
8 gün	2029.3	2073.7	2166.9	2066.4	2040.7	2196.9	2178.2	2243.0	2244.9
9 gün	2031.7	2075.8	2169.1	2069.0	2043.0	2199.3	2180.6	2245.6	2246.7
Doygun Ağırlık	2058.4	2107.0	218874.0	2084.9	2063.9	2222.9	2196.8	2264.1	2264.1
Suda ki ağırlık	1073.5	1121.8	1208.6	1099.4	1075.1	1232.5	1205.2	1276.6	1285.0

Tablo 3.15. İkinci adım deney serilerine ait permeabilite deneyi sonuçları-2

Seri Adı	400-0.52-T0-MT0-UK0	400-0.52-T0-MT0-UK2	400-0.52-T0-MT0-UK4	400-0.52-T2-MT0-UK0	400-0.52-T2-MT2.5-UK2	400-0.52-T2-MT5-UK4	400-0.52-T2-MT5-UK0	400-0.52-T4-MT0-UK2	400-0.52-T4-MT2.5-UK4	400-0.52-T4-MT5-UK2
Zaman										
Kuru Ağırlık	2256.3	2156.5	2213.6	2042.2	1912.8	1944.5	1816.1	1870.9	1863.8	2018.9
1 dk	2261.0	2159.3	2217.2	2044.9	1914.6	1946.8	1819.3	1873.6	1865.6	2021.9
5 dk	2262.5	2161.1	2218.7	2046.5	1915.9	1948.5	1820.5	1875.4	1866.9	2023.9
10 dk	2264.1	2162.8	2220.3	2047.7	1916.8	1949.8	1821.3	1876.7	1867.9	2025.5
20 dk	2265.7	2164.6	2222.4	2049.2	1917.8	1951.4	1822.3	1878.3	1869.0	2026.8
30 dk	2266.8	2165.9	2223.9	2050.3	1918.4	1952.6	1823.0	1879.4	1869.9	2028.4
1 saat	2268.8	2168.2	2226.8	2052.6	1919.7	1954.9	1824.1	1881.5	1871.6	2030.4
2 saat	2271.1	2171.5	2231.3	2056.1	1921.6	1959.0	1826.0	1885.4	1874.7	2034.8
3 saat	2272.8	2173.6	2234.2	2058.4	1922.9	1961.8	1827.1	1888.1	1876.9	2037.4
4 saat	2273.4	2174.5	2236.1	2060.1	1923.0	1963.5	1828.3	1889.8	1878.9	2039.4
5 saat	2274.3	2176.0	2237.0	2061.3	1924.5	1964.9	1828.7	1891.2	1879.8	2040.7
6 saat	2274.9	2177.0	2237.7	2061.9	1925.2	1965.4	1829.0	1892.1	1880.2	2041.2
1 gün	2280.6	2186.9	2249.3	2076.8	1931.9	1984.3	1835.9	1909.8	1899.4	2058.3
2 gün	2283.4	2192.6	2254.4	2084.6	1935.7	1994.9	1840.3	1922.0	1911.4	2067.5
3 gün	2285.3	2195.9	2257.7	2088.6	1938.2	2001.4	1842.9	1929.0	1919.2	2072.6
4 gün	2286.1	2198.9	2259.5	2090.9	1939.8	2005.7	1844.2	1933.7	1925.8	2076.3
5 gün	2287.5	2201.0	2262.5	2094.1	1941.4	2009.5	1846.9	1937.4	1929.3	2079.7
6 gün	2289.3	2202.8	2264.2	2096.2	1942.8	2013.5	1848.0	1939.9	1932.5	2083.5
7 gün	2290.4	2204.5	2265.5	2098.1	1944.0	2016.5	1848.8	1942.3	1936.1	2086.9
8 gün	2291.5	2206.0	2267.2	2100.0	1945.4	2019.0	1850.0	1944.4	1938.6	2088.6
9 gün	2292.9	2208.1	2269.0	2102.6	1947.0	2022.0	1852.0	1947.2	1942.1	2090.3
Doygun Ağırlık	2365.3	2265.4	2306.1	2143.5	2010.3	2041.8	1909.2	1983.6	1968.8	2102.6
Suda ki Ağırlık	1376.2	1289.5	1333.3	1165.3	1020.5	1058.7	915.9	1004.2	977.3	1115.3

Tablo 3.16. İkinci adım deney serilerine ait permeabilite deneyi sonuçları-3

Seri Adı	400-0.47-T0-MT0-UK0	400-0.47-T0-MT0-UK2	400-0.47-T0-MT0-UK4	400-0.47-T2-MT0-UK0	400-0.47-T2-MT2.5-UK2	400-0.47-T2-MT5-UK4	400-0.47-T2-MT5-UK0	400-0.47-T4-MT0-UK2	400-0.47-T4-MT2.5-UK4	400-0.47-T4-MT5-UK2
Zaman										
Kuru Ağırlık	2174.8	2274.9	2293.7	1984.8	2153.3	2236.7	2134.6	2014.1	2095.9	2161.7
1 dk	2177.8	2276.6	2295.1	1986.7	2155.2	2238.5	2136.8	2016.6	2098.5	2163.7
5 dk	2179.4	2277.7	2296.3	1988.1	2156.5	2239.9	2137.8	2018.8	2100.1	2165.5
10 dk	2180.8	2278.7	2297.2	1989.2	2157.6	2241.2	2138.9	2020.0	2101.4	2167.0
20 dk	2182.4	2280.1	2298.4	1990.3	2158.9	2242.7	2139.9	2021.6	2102.7	2168.7
30 dk	2183.5	2281.2	2299.3	1991.0	2159.8	2244.0	2140.7	2022.7	2103.7	2169.8
1 saat	2185.6	2283.4	2301.1	1992.4	2161.4	2246.5	2142.7	2024.9	2105.5	2172.0
2 saat	2189.2	2287.5	2304.2	1994.8	2163.8	2250.4	2144.9	2029.6	2108.6	2175.9
3 saat	2191.4	2290.2	2306.4	1996.2	2165.2	2253.2	2146.5	2032.6	2110.9	2178.2
4 saat	2193.0	2292.1	2307.6	1997.3	2166.1	2254.8	2147.7	2034.7	2112.4	2179.8
5 saat	2194.2	2293.4	2308.6	1998.0	2166.7	2256.3	2148.3	2036.4	2113.5	2180.9
6 saat	2195.5	2293.8	2309.1	1998.2	2167.1	2256.9	2148.9	2037.3	2113.9	2181.2
1 gün	2212.4	2310.9	2321.4	2011.0	2174.1	2270.5	2159.3	2055.3	2129.4	2193.5
2 gün	2225.2	2323.2	2329.2	2017.8	2178.7	2277.6	2164.7	2064.6	2137.8	2199.3
3 gün	2233.9	2330.8	2333.7	2021.6	2180.9	2282.3	2167.8	2070.4	2142.9	2202.6
4 gün	2241.2	2337.5	2337.2	2024.1	2182.8	2285.7	2169.5	2075.2	2146.1	2203.4
5 gün	2247.2	2342.0	2339.8	2026.9	2184.4	2288.3	2172.4	2078.0	2149.5	2207.6
6 gün	2250.9	2345.7	2341.9	2028.7	2185.6	2290.4	2173.3	2080.6	2151.3	2209.1
7 gün	2253.3	2349.1	2343.7	2030.5	2187.0	2292.6	2174.9	2083.4	2153.5	2210.9
8 gün	2254.9	2351.6	2345.5	2031.9	2188.0	2294.5	2176.0	2085.6	2154.6	2212.3
9 gün	2256.1	2354.1	2347.1	2034.1	2189.4	2296.5	2177.4	2088.1	2156.2	2214.5
Doygun Ağırlık	2254.8	2359.3	2374.6	2079.3	2219.5	2311.2	2204.4	2096.2	2163.5	2227.4
Suda ki Ağırlık	1331.8	1385.8	1388.9	1098.3	1229.9	1329.0	1220.7	1007.6	1082.1	1247.2

Tablo 3.17. İkinci adım deney serilerine ait permeabilite deneyi sonuçları-4

Seri Adı	480-0.50-T0-MT0-UK0	480-0.50-T0-MT2.5-UK2	480-0.50-T0-MT5-UK4	480-0.50-T2-MT0-UK0	480-0.50-T2-MT2.5-UK2	480-0.50-T2-MT5-UK4	480-0.50-T2-MT5-UK0
Zaman							
Kuru Ağırlık	2117.9	2145.0	2140.3	2086.6	1978.0	1927.7	1950.3
1 dk	2119.7	2146.3	2142.0	2088.7	1980.6	1930.0	1952.8
5 dk	2121.6	21447.4	2143.1	2090.5	1982.4	1931.4	1954.5
10 dk	2122.6	2148.3	2144.0	2091.5	1983.5	1932.2	1955.6
20 dk	2123.9	2149.0	2144.9	2092.7	1984.8	1933.4	1956.9
30 dk	2126.2	2149.5	2145.9	2093.7	1986.5	1934.5	1958.4
1 saat	2129.3	2151.5	2149.2	2098.0	1991.9	1939.5	1963.5
2 saat	2132.1	2152.3	2150.5	2000.2	1995.3	1942.5	1966.4
3 saat	2134.6	2153.1	2152.3	2102.7	1997.6	1945.2	1969.7
4 saat	2137.2	2153.9	2153.7	2105.4	2000.6	1948.3	1972.7
5 saat	2138.7	2154.5	2154.9	2107.3	2002.8	1950.7	1975.1
6 saat	2139.4	2155.1	2156.2	2109.4	2004.7	1952.9	1978.2
1 gün	2150.6	2158.2	2162.5	2126.7	2022.9	1973.5	1997.2
2 gün	2154.8	2160.0	2165.0	2138.8	2035.5	1987.6	2010.3
3 gün	2157.1	2160.9	2166.7	2146.5	2043.2	1997.1	2017.8
4 gün	2158.9	2162.1	2168.6	2152.6	2049.3	2008.7	2023.5
5 gün	2160.3	2162.9	2170.1	2157.1	2051.7	2009.1	2027.3
6 gün	2161.6	2163.7	2170.4	2157.7	2052.5	2009.6	2032.1
7 gün	2162.1	2164.5	2171.5	2158.2	2053.6	2010.1	2036.2
8 gün	2162.5	2165.4	2171.9	2158.8	2054.7	2010.6	2040.0
9 gün	2162.9	2166.1	2172.4	2159.1	2055.7	2011.1	2044.1
Doygun Ağırlık	2267.9	2327.5	2358.8	2092.3	2228.9	2323.9	2218.3
Suda ki Ağırlık	1276.3	1315.2	1325.4	1108.4	1241.3	1345.5	1232.1

4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında deneyler iki temel adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda sadece mermer tozu kullanılarak çevre dostu betonlar üretilmiştir. İkinci adımda atık lastik agrega ve mermer tozu beraber kullanılarak farklı karışımlara sahip çevre dostu betonlar üretilmiştir. Her iki adımda üretilen beton serilere ait deneysel çalışmaların sonuçları aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

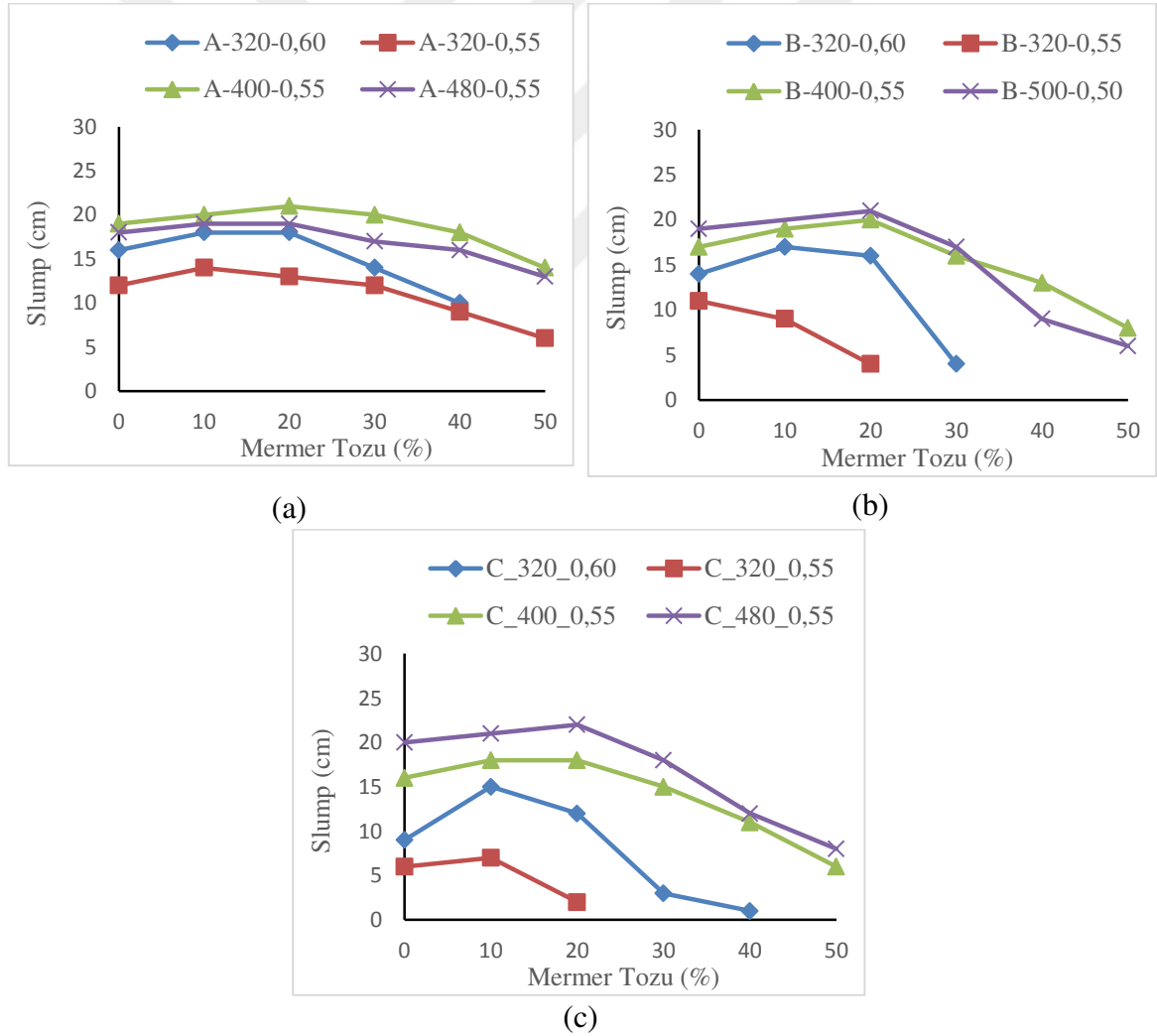
4.1. Atık Mermer Tozu ile Yapılan Deneyler

Birinci adım çalışmada atık mermer tozu ile ince agregalar %0'dan (referans) %50'ye kadar hacimce yer değiştirilerek çevre dostu beton karışımlar hazırlanmıştır. Mermer tozu ile üretilmiş çevre dostu betonlarda agrega granülometrisinin etkisini araştırmak için 3 farklı granülometri dikkate alınmıştır. Farklı granülometri ve farklı karışımlara sahip çevre dostu beton numuneler üretilmiş ve bunlar taze ve sertleşmiş beton deneylerine tabi tutulmuşlardır. Taze beton deneyi olarak çökme deneyi (slump testi) yapılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Sertleşmiş beton deneyi olarak, basınç deneyi yapılmıştır. Basınç deneyinde numunelerin 7 günlük ve 28 günlük beton basınç dayanımlarına bakılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre farklı grafikler oluşturularak sonuçlar yorumlanmıştır.

Farklı granülometrilere sahip çevre dostu betonlarda mermer tozu oranının çökme üzerine etkisi Şekil 4.1'de verilmiştir. A granülometrisine sahip çevre dostu betonların çökme değerleri Şekil 4.1a'da görülmektedir. A granülometrisine sahip beton karışımlarda beklendiği gibi S/Ç oranı arttıkça çökme değeri artmıştır. Bununla beraber çimento dozajı arttıkça çökme miktarındaki artış dikkat çekmektedir. Çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan beton karışımlar referans niteliğindeki başlangıç karışımlarıdır. Dolayısıyla çimento miktarı ve S/Ç oranı arttıkça çökme miktarları da artmıştır. Tüm serilerde mermer tozu oranı arttıkça ilk önce çökme miktarında bir artış daha sonra ise referans betona (mermer tozu kullanılmayan beton) oranla çökme miktarında bir azalma gözlemlenmektedir. Belli bir orana kadar çökme miktarının artmasının sebebi karışım içerisinde toz malzeme miktarı arttıkça kimyasal katkının etkinliğinin artması olarak yorumlanmıştır. Daha sonra azalmasının nedeni ise artan toz miktarının fazla miktarda su emmesi olarak yorumlanabilir. Şekil 4.1a'da yer alan çökme değerleri incelendiğinde kuru kıvam hariç her kıvam sınıfında çevre dostu beton üretmenin mümkün olduğu görülmektedir.

B granülometrisine sahip çevre dostu betonların çökme değerleri Şekil 4.1b'de görülmektedir. B granülometrisine sahip beton karışımlarda beklendiği gibi S/Ç oranı arttıkça çökme değeri artmıştır. Bununla beraber çimento dozajı arttıkça çökme miktarındaki artış dikkat

çekmektedir. Çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan beton karışımlar referans niteliğindeki başlangıç karışımlarıdır. Dolayısıyla çimento miktarı ve S/Ç oranı arttıkça çökme miktarları da artmıştır. Tüm serilerde mermer tozu oranı arttıkça ilk önce çökme miktarında bir artış daha sonra ise referans betona (mermer tozu kullanılmayan beton) oranla çökme miktarında bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durum sadece çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan seride görülmemektedir. Bunun nedeni granülometri etkisi olarak yorumlanmıştır. Çünkü B granülometrisi A'ya göre daha incedir. Mermer tozu miktarı B granülometrisine sahip eğrilerde çökme değeri üzerinden daha etkindir. Diğer serilerde ise belli bir orana kadar çökme miktarının artmasının sebebi karışım içerisinde toz malzeme miktarı arttıkça kimyasal katkının etkinliğinin artması olarak yorumlanmıştır. Daha sonra azalmasının nedeni ise artan toz miktarının fazla miktarda su emmesi olarak yorumlanabilir. Şekil 4.1b'de yer alan çökme değerleri incelendiğinde her kıvam sınıfında çevre dostu beton üretmenin mümkün olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Taze betonda çökme miktarı ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki a) A granülometrisine sahip karışımlar b) B granülometrisine sahip karışımlar c) C granülometrisine sahip karışımlar

C granülometrisine sahip çevre dostu betonların çökme değerleri Şekil 4.1c'de görülmektedir. C granülometrisine sahip beton karışımlarda beklendiği gibi S/Ç oranı arttıkça çökme değeri artmıştır. Bununla beraber çimento dozajı arttıkça çökme miktarındaki artış dikkat çekmektedir. Çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan beton karışımlar referans niteliğindeki başlangıç karışımlarıdır. Dolayısıyla çimento miktarı ve S/Ç oranı arttıkça çökme miktarları da artmıştır. Tüm serilerde mermer tozu oranı arttıkça ilk önce çökme miktarında bir artış daha sonra ise referans betona (mermer tozu kullanılmayan beton) oranla çökme miktarında bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durum etkin olarak çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan seride görülmemektedir. Bunun nedeni granülometri etkisi olarak yorumlanmıştır. Çünkü C granülometrisi B'ye göre daha incedir. Mermer tozu miktarı C granülometrisine sahip eğrilerde çökme değeri üzerinden daha etkindir. Diğer serilerde ise belli bir orana kadar çökme miktarının artmasının sebebi karışım içerisinde toz malzeme miktarı arttıkça kimyasal katkının etkinliğinin artması olarak yorumlanmıştır. Daha sonra azalmasının nedeni ise artan toz miktarının fazla miktarda su emmesi olarak yorumlanabilir. Şekil 4.1c'de yer alan çökme değerleri incelendiğinde her kıvam sınıfında çevre dostu beton üretmenin mümkün olduğu görülmektedir.

Agrega granülometrisi değişikçe yani granülometri A'dan C'ye gidip malzemenin inceliği arttıkça beton serilerinin çökme değerlerinin referans betona oranla daha fazla düşüş gösterdikleri tespit edilmiştir. Bununla beraber agrega granülometrisinin inceliği arttıkça efektif olarak beton içerisinde kullanılan mermer tozunda azalma olması gerekmektedir.

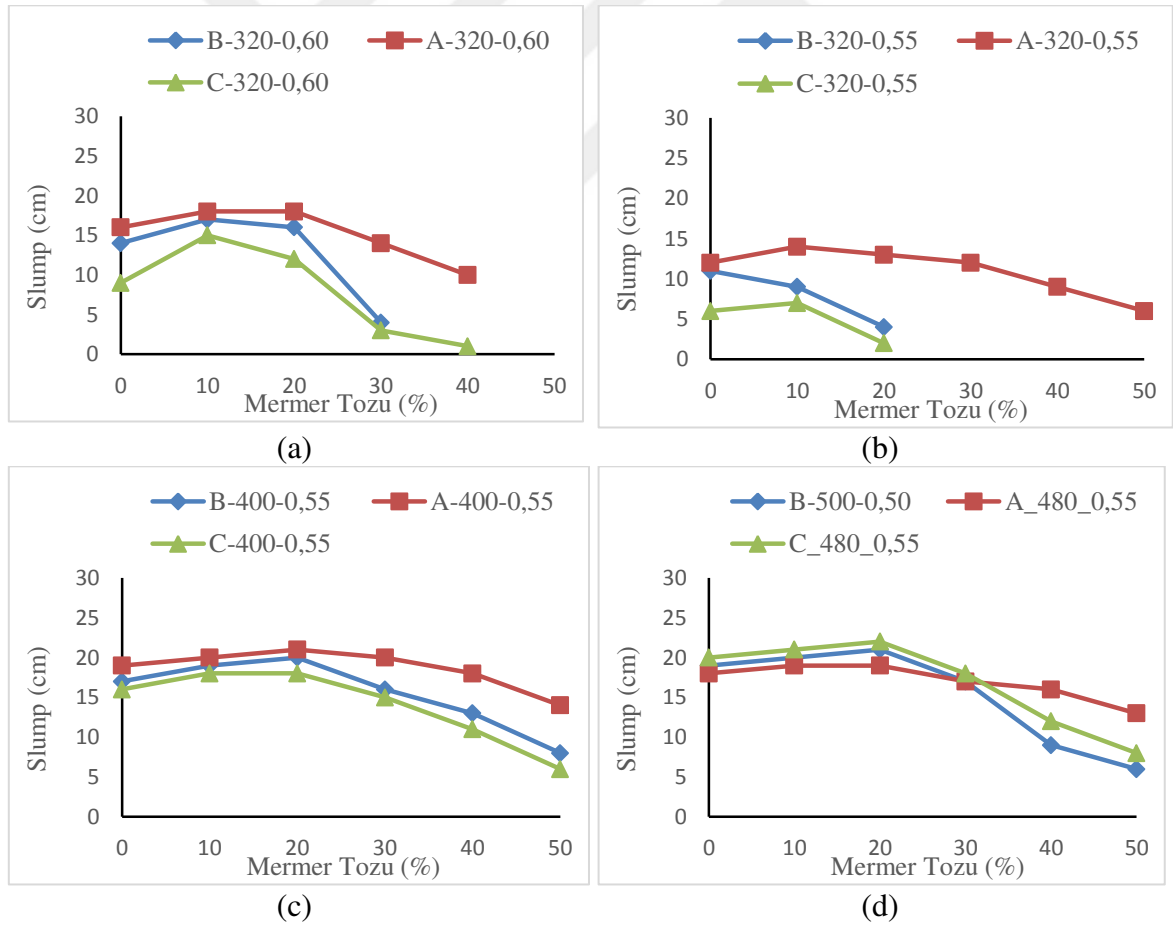
Aynı karışım oranına ancak farklı granülometrilere sahip serilerde mermer tozu oranının çökme miktarı üzerine etkisi Şekil 4.2'deki grafiklerde sunulmuştur. Çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan serilerde agrega granülometrisi değişikçe mermer tozunun çökme miktarı üzerine etkisi de değişmektedir (Şekil 4.2a). Mermer tozu, çökme miktarını en olumlu şekilde A granülometrisine sahip serilerde etkilemektedir. Bunun nedeni incelik modülü en düşük granülometri değerine A granülometrisinin sahip olmasıdır. Böylece mermer tozunun boşluk doldurma etkisinin en etkin şekilde A granülometrisinde ortaya çıktığı görülmektedir.

Çimento miktarı 320 kg/m^3 ancak S/Ç oranı 0.55 olan yani S/Ç oranı azaltılmış serilerde mermer tozu işlenebilirliği oldukça olumsuz etkilemektedir (Şekil 4.2b). Özellikle B ve C granülometrilere sahip serilerde S/Ç oranının azalması kimyasal katkısında etkinliğini azalttığından akıcı kıvamlı betonlar elde edilememektedir. A granülometrisine sahip beton serilerde bu olumsuz durum yaşanmamıştır. Bunun sebebinin karışıma giren agregaların incelik modülünün büyüklüğü olarak yorumlanmıştır.

Çimento miktarının artması işlenebilirlik üzerinde mermer tozunun etkisinin artmasını sağlamaktadır (Şekil 4.2c). Tüm serilerde mermer tozu oranı arttıkça ilk önce çökme miktarında bir artış daha sonra ise referans betona (mermer tozu kullanılmayan beton) oranla çökme

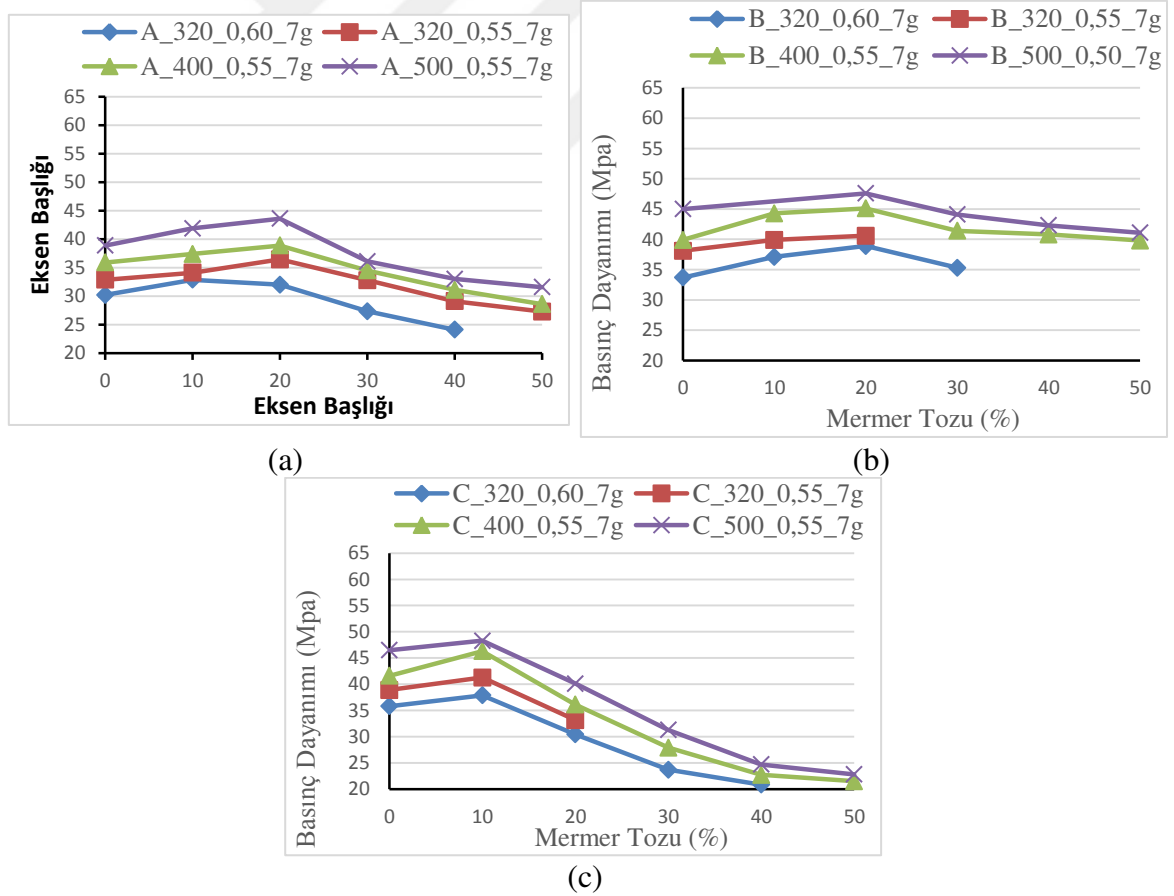
miktarında bir azalma gözlemlenmektedir. Belli bir orana kadar çökme miktarının artmasının sebebi karışım içerisinde toz malzeme miktarı arttıkça kimyasal katkının etkinliğinin artması olarak yorumlanmıştır. Daha sonra azalmasının nedeni ise artan toz miktarının fazla miktarda su emmesi olarak yorumlanabilir. Şekil 4.2c’de yer alan çökme değerleri incelendiğinde kuru kıvam hariç her kıvam sınıfında çevre dostu beton üretmenin mümkün olduğu görülmektedir.

Çimento miktarının işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bu durum 480 ve 500 dozlu seriler için Şekil 4.2d’de açıkça görülmektedir. Beton karışımlarında çimento miktarının optimum bir miktarın üzerine çıkması durumunda mermer tozunun çökme miktarı üzerinde ki etkisi granülometri eğrilerine göre değişiklik göstermektedir. Mermer tozu B ve C granülometrisine sahip karışımlar üzerinde daha etkindir. Ancak bu durum mermer tozunun %30 kullanım oranlarına kadar devam etmektedir, %30’dan sonra ise mermer tozu B ve C granülometrisine sahip karışımların çökme değerini olumsuz etkilemektedir. Fakat A granülometrisine sahip karışımların çökme değerleri 320-400-480 dozlu karışımlar için yaklaşık olarak benzer eğilimleri göstermektedirler.



Şekil 4.2. Taze betonda çökme miktarı ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki a) Çimento miktarı 320 kg/m³ olan karışımlar (S/Ç:0.60) b) Çimento miktarı 320 kg/m³ olan karışımlar (S/Ç:0.55) c) Çimento miktarı 400 kg/m³ olan karışımlar (S/Ç:0.55) d) Çimento miktarı 480-500 kg/m³ olan karışımlar (S/Ç:0.55)

Farklı granülometrilere sahip çevre dostu betonlarda mermer tozu oranının 7 günlük basınç dayanımları üzerine etkisi Şekil 4.3’de verilmiştir. A granülometrisine sahip çevre dostu betonların basınç dayanımı değerleri Şekil 4.3a’da görülmektedir. A granülometrisine sahip beton karışımlarda beklendiği gibi S/Ç oranı arttıkça basınç dayanımı değeri azalmıştır. Bununla beraber çimento dozajı arttıkça basınç dayanımındaki artış dikkat çekmektedir. Çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan beton karışımlar referans niteliğindeki başlangıç karışımlarıdır. Dolayısıyla çimento miktarı artıp, S/Ç oranı azaldıkça basınç dayanımı değerleri de artmıştır. Tüm serilerde mermer tozu oranı arttıkça ilk önce basınç dayanımında bir artış daha sonra ise referans betona (mermer tozu kullanılmayan beton) oranla basınç dayanımı değerlerinde bir azalma gözlemlenmektedir. Belli bir orana kadar basınç dayanımı değerlerinin artmasının sebebi mermer tozunun boşluk doldurma etkisidir. Daha sonra azalmasının nedenleri ise a) Artan toz miktarının fazla miktarda su emmesi, b) Agrega granülometrisinin bozulması, c) Fazla toz miktarının agrega ile çimento harcı arasında ki aderansı azaltması olarak yorumlanabilir. Şekil 4.3a’da yer alan basınç dayanımı değerleri incelendiğinde yaklaşık 20 MPa ile 50 MPa arasında çevre dostu beton üretmenin mümkün olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. 7 günlük beton basınç dayanımları ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki a) A granülometrisine sahip karışımlar b) B granülometrisine sahip karışımlar c) C granülometrisine sahip karışımlar

B granülometrisine sahip çevre dostu betonların basınç dayanımı değerleri Şekil 4.3b’de görülmektedir. B granülometrisine sahip beton karışımlarda beklendiği gibi S/Ç oranı arttıkça basınç dayanımı değeri azalmıştır. Bununla beraber çimento dozajı arttıkça basınç dayanımındaki artış dikkat çekmektedir. Çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan beton karışımlar referans niteliğindeki başlangıç karışımlarıdır. Dolayısıyla çimento miktarı artıp, S/Ç oranı azaldıkça basınç dayanımı değerleri de artmıştır. Tüm serilerde mermer tozu oranı arttıkça ilk önce basınç dayanımında bir artış daha sonra ise referans betona (mermer tozu kullanılmayan beton) oranla basınç dayanımı değerlerinde bir azalma gözlemlenmektedir. Belli bir orana kadar basınç dayanımı değerlerinin artmasının sebebi mermer tozunun boşluk doldurma etkisidir. Daha sonra azalmasının nedenleri ise aynen A granülometrisine sahip beton serilerde olduğu gibi, a) Artan toz miktarının fazla miktarda su emmesi, b) Agreg a granülometrisinin bozulması, c) Fazla toz miktarının agrega ile çimento harcı arasında ki aderansı azaltması olarak yorumlanabilir. Şekil 4.3b’da yer alan basınç dayanımı değerleri incelendiğinde yaklaşık 30 MPa ile 50 MPa arasında çevre dostu beton üretmenin mümkün olduğu görülmektedir.

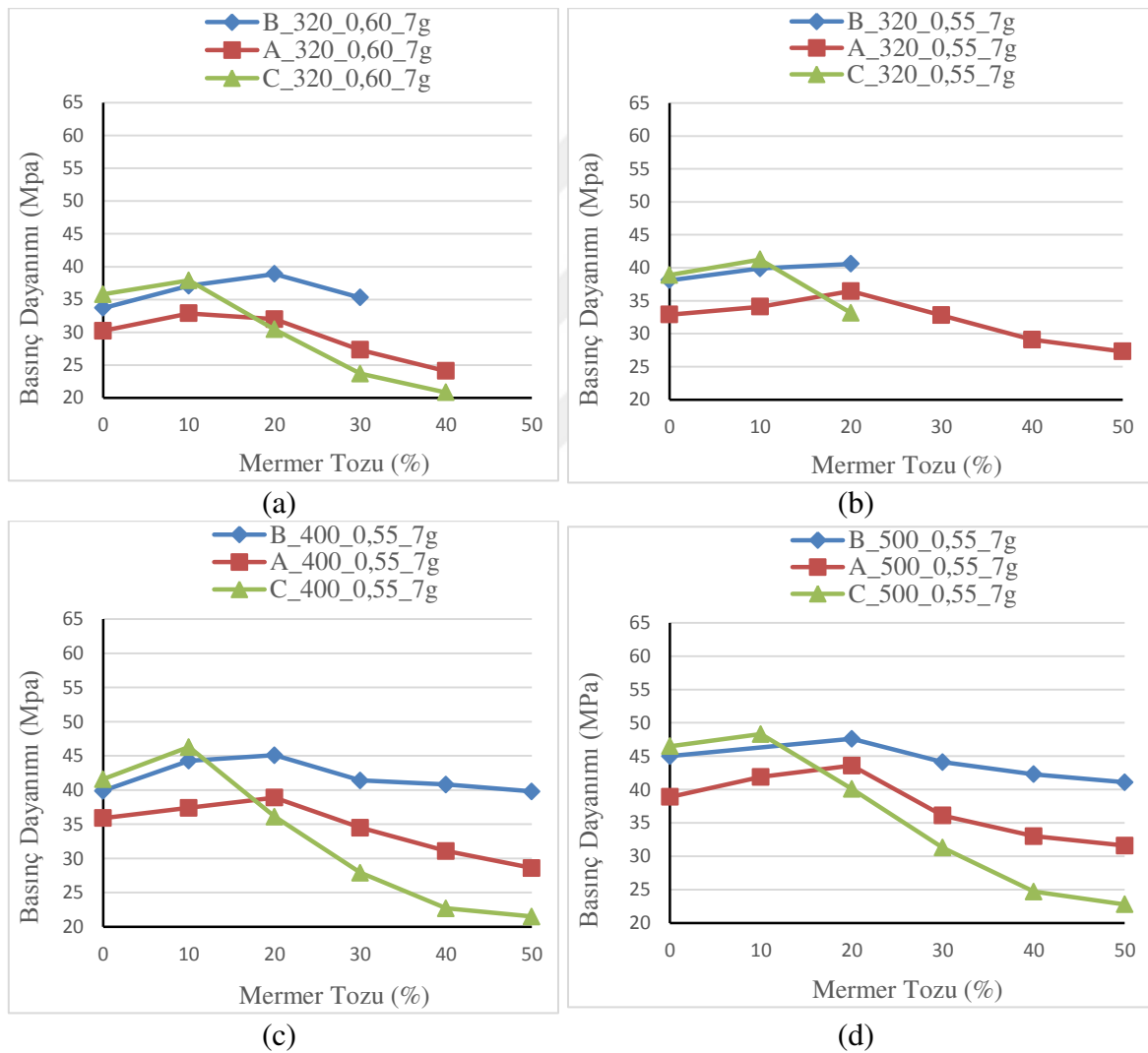
C granülometrisine sahip çevre dostu betonların basınç dayanımı değerleri Şekil 4.3c’de görülmektedir. C granülometrisine sahip beton karışımlarda beklendiği gibi S/Ç oranı arttıkça basınç dayanımı değeri azalmıştır. Bununla beraber çimento dozajı arttıkça basınç dayanımındaki artış dikkat çekmektedir. Çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan beton karışımlar referans niteliğindeki başlangıç karışımlarıdır. Dolayısıyla çimento miktarı artıp, S/Ç oranı azaldıkça basınç dayanımı değerleri de artmıştır. Tüm serilerde mermer tozu oranı arttıkça ilk önce basınç dayanımında bir artış daha sonra ise referans betona (mermer tozu kullanılmayan beton) oranla basınç dayanımı değerlerinde bir azalma gözlemlenmektedir. Belli bir orana kadar basınç dayanımı değerlerinin artmasının sebebi mermer tozunun boşluk doldurma etkisidir. Daha sonra azalmasının nedenleri ise aynen A ve B granülometrisine sahip beton serilerde olduğu gibi, a) Artan toz miktarının fazla miktarda su emmesi, b) Agreg a granülometrisinin bozulması, c) Fazla toz miktarının agrega ile çimento harcı arasında ki aderansı azaltması olarak yorumlanabilir. Şekil 4.3c’de yer alan basınç dayanımı değerleri incelendiğinde yaklaşık 20 MPa ile 50 MPa arasında çevre dostu beton üretmenin mümkün olduğu görülmektedir.

Agreg a granülometrisi değıştikçe yani granülometri A’dan C’ye gidip malzemenin inceliğı arttıkça beton serilerinin basınç dayanımı değerlerinin referans betona oranla daha fazla düşüş gösterdikleri tespit edilmiştir. Bununla beraber agrega granülometrisinin inceliğı arttıkça efektif olarak beton içerisinde kullanılan mermer tozunda azalma olması gerekmektedir.

Aynı karışım oranına ancak farklı granülometrilere sahip serilerde mermer tozu oranının basınç dayanımı üzerine etkisi Şekil 4.4’deki grafiklerde sunulmuştur. Çimento miktarı 320 kg/m^3 ve S/Ç oranı 0.55 olan serilerde agrega granülometrisi değıştikçe mermer tozunun basınç dayanımı üzerine etkisi de değışmektedir (Şekil 4.4a). Mermer tozu, basınç dayanımı değerlerini

en olumlu şekilde B granülometrisine sahip serileri etkilemektedir. Mermer tozu oranının %10 kullanımında her ne kadar en yüksek basınç dayanımı C granülometrisine sahip serilerde görülse de daha yüksek mermer tozu kullanım oranlarında en yüksek basınç dayanımına sahip serilerin B granülometrisi ile üretilen seriler olduğu görülmektedir.

Çimento miktarı 320 kg/m^3 ancak S/Ç oranı 0.55 olan yani S/Ç oranı azaltılmış serilerde mermer tozu sertleşmiş beton özelliklerini olumsuz etkilemektedir (Şekil 4.4b). Özellikle B ve C granülometrisine sahip serilerde S/Ç oranının azalması, hem betonun işlenebilirliğinin hem de basınç dayanımının azalmasına sebep olmaktadır. A granülometrisine sahip beton serilerde bu olumsuz durum yaşanmamıştır.

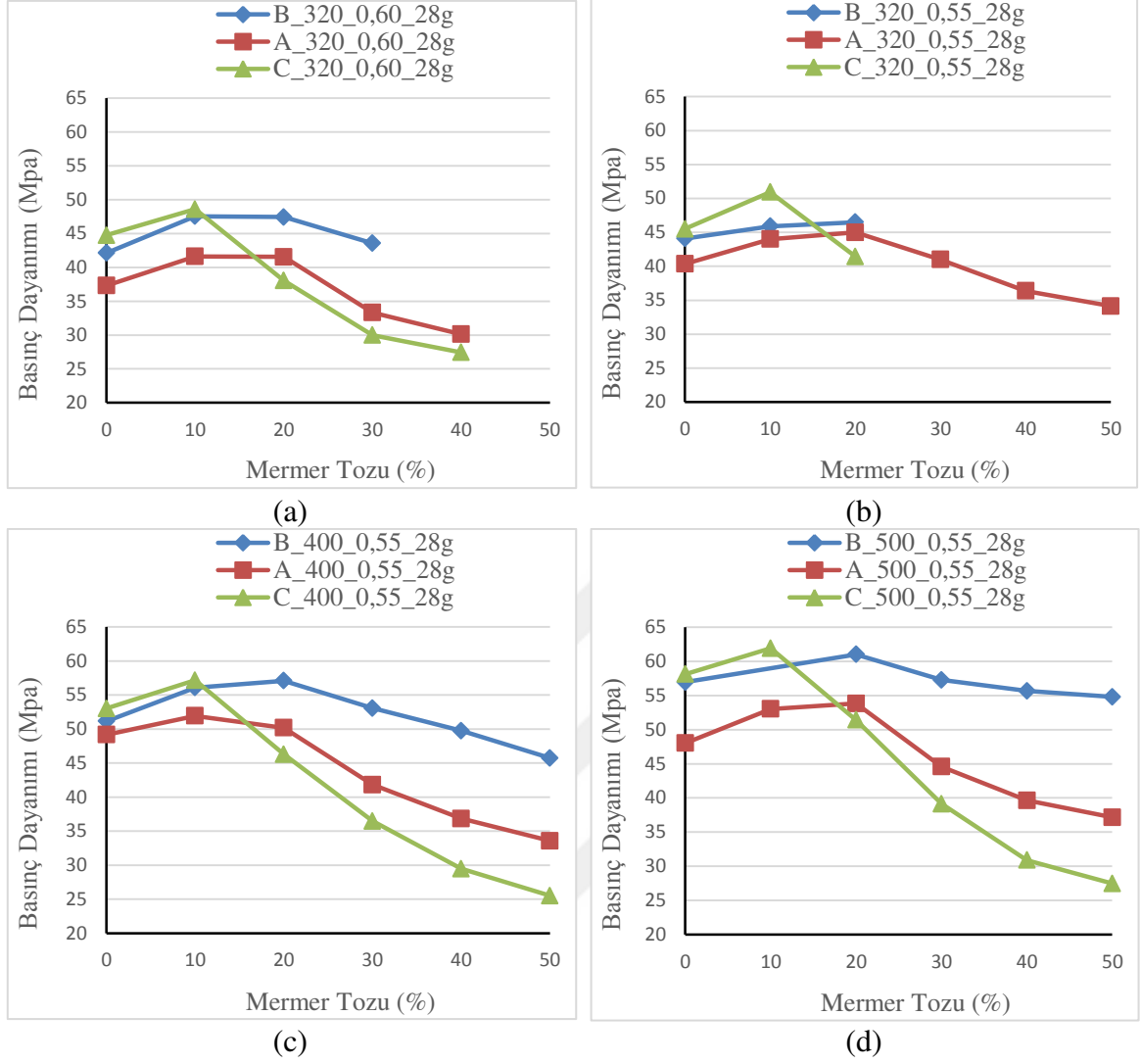


Şekil 4.4. Beton basınç dayanımları (7 günlük) ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki a) Çimento miktarı 320 kg/m^3 olan karışımlar (S/Ç:0.60) b) Çimento miktarı 320 kg/m^3 olan karışımlar (S/Ç:0.55) c) Çimento miktarı 400 kg/m^3 olan karışımlar (S/Ç:0.55) d) Çimento miktarı $480-500 \text{ kg/m}^3$ olan karışımlar (S/Ç:0.55)

Çimento miktarının artması işlenebilirlik üzerinde mermer tozunun etkisinin artmasını sağlamaktadır (Şekil 4.4c). Tüm serilerde mermer tozu oranı arttıkça ilk önce basınç dayanımı değerlerinde bir artış daha sonra ise referans betona (mermer tozu kullanılmayan beton) oranla basınç dayanımında bir azalma gözlemlenmektedir. Daha sonra azalmasının nedenleri ise, a) Artan toz miktarının fazla miktarda su emmesi, b) Agreganın granülometrisinin bozulması, c) Fazla toz miktarının agrega ile çimento harcı arasında ki aderansı azaltması olarak yorumlanabilir. Şekil 4.4c’de yer alan basınç dayanımı değerleri incelendiğinde yaklaşık 20 MPa ile 50 MPa arasında çevre dostu beton üretmenin mümkün olduğu görülmektedir.

Çimento miktarının işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bu durum 500 dozlu seriler için Şekil 4.4d’de açıkça görülmektedir. Beton karışımlarında çimento miktarının optimum bir miktarın üzerine çıkması durumunda mermer tozunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi granülometri eğrilerine göre değişiklik göstermektedir. Mermer tozu B ve C granülometrisine sahip karışımlar üzerinde daha etkindir. Ancak bu durum mermer tozunun %30 kullanım oranlarına kadar devam etmektedir, %30’dan sonra ise mermer tozu B ve C granülometrisine sahip karışımların basınç dayanımı değerini olumsuz etkilemektedir. Fakat A granülometrisine sahip karışımların basınç dayanımı değerleri farklı dozlu karışımlar için yaklaşık olarak benzer eğilimleri göstermektedirler.

Aynı karışım oranına ancak farklı granülometrilere sahip serilerde mermer tozu oranının 28 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi Şekil 4.5’deki grafiklerde sunulmuştur. Şekil 4.4’teki grafikler ile Şekil 4.5’deki grafikler karşılaştırıldığında beton serilerin 7 günlük dayanımları ile 28 günlük dayanımlarının benzer davranış gösterdiği görülmektedir. 28 günlük dayanımlar, 7 günlük dayanımlara göre artış göstermektedirler.

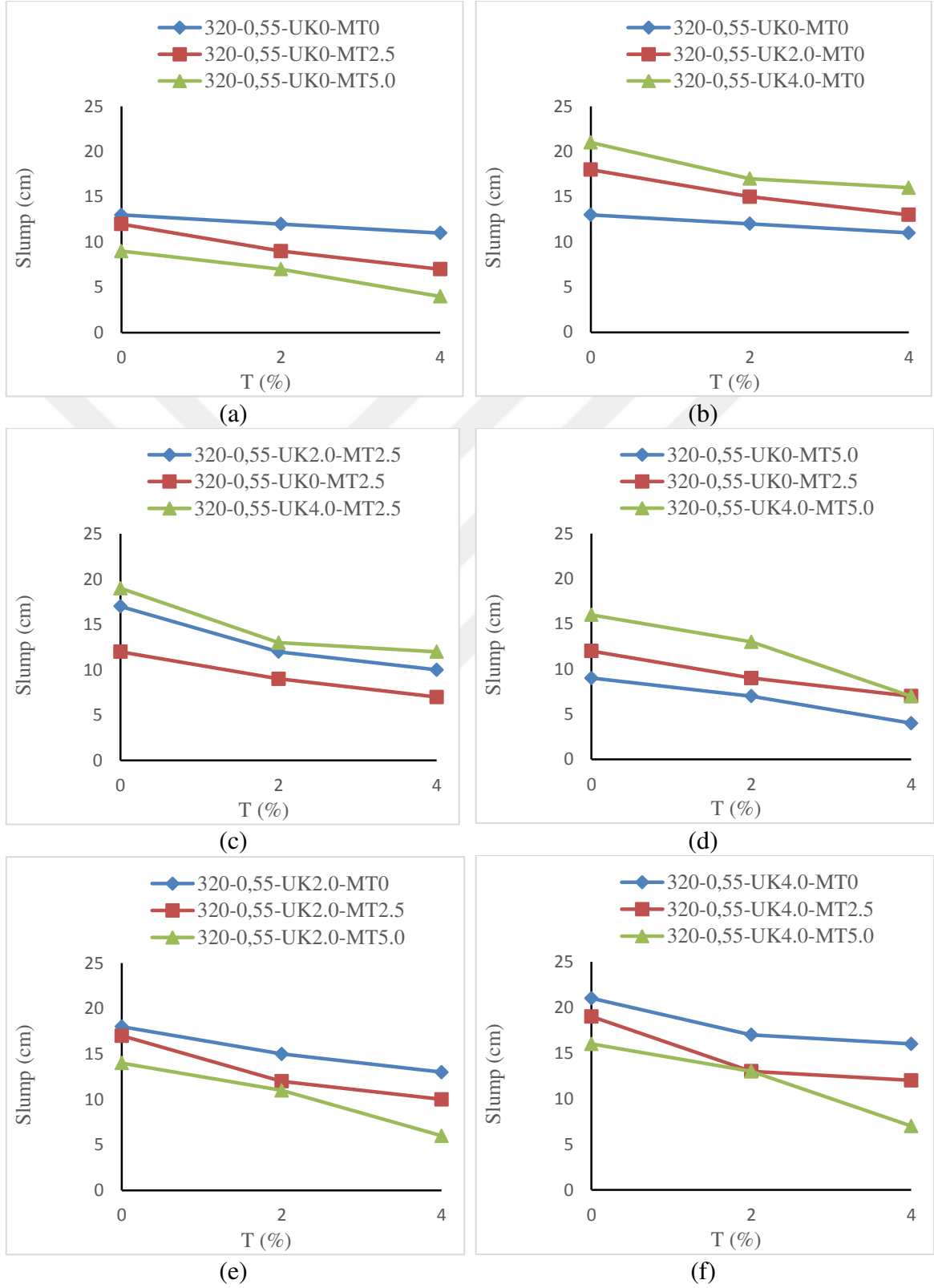


Şekil 4.5. Beton basınç dayanımları (28 günlük) ile mermer tozu oranı arasındaki ilişki a) Çimento miktarı 320 kg/m³ olan karışımlar (S/Ç:0.60) b) Çimento miktarı 320 kg/m³ olan karışımlar (S/Ç:0.55) c) Çimento miktarı 400 kg/m³ olan karışımlar (S/Ç:0.55) d) Çimento miktarı 500 kg/m³ olan karışımlar (S/Ç:0.55)

4.2. Atık Lastik Agrega ve Mermer Tozu ile Yapılan Deneyler

Bu bölümde mermer tozu, atık lastik agregası ve uçucu kül kullanılarak elde edilen çevre dostu betonların taze ve sertleşmiş beton özellikleri grafikler halinde sunulmuştur. Bu bölümdeki beton serileri üretilirken agregası granülometrisi B eğrisi olarak seçilmiştir. Atık mermer tozu (MT), atık lastik agregası (T) ve uçucu kül (UK) gibi üç farklı atık malzeme ile oluşturulan çevre dostu betonların çökme değerleri Şekil 4.6'da görülmektedir. Bu seriler hazırlanırken karışım hesapları farklı oranlarda mermer tozu, lastik agregası ve uçucu kül eklenerek hazırlanmıştır. Çimento miktarı 320 kg/m³, S/Ç oranı 0.55, MT oranı %0, T oranı %0 ve UK oranı %0 olan beton karışımları referans niteliğindeki başlangıç karışımlarıdır. Sırasıyla MT oranı %2.5 ve %5, T oranı

%2 ve %4 ve UK oranı %2 ve %4 olarak alınmış ve farklı varvasyonlar ile hazırlanan bu karışımların çökme değerleri incelenmiştir.



Şekil 4.6. Atık lastik agrega oranı ile betonun çökme değeri arasındaki ilişki

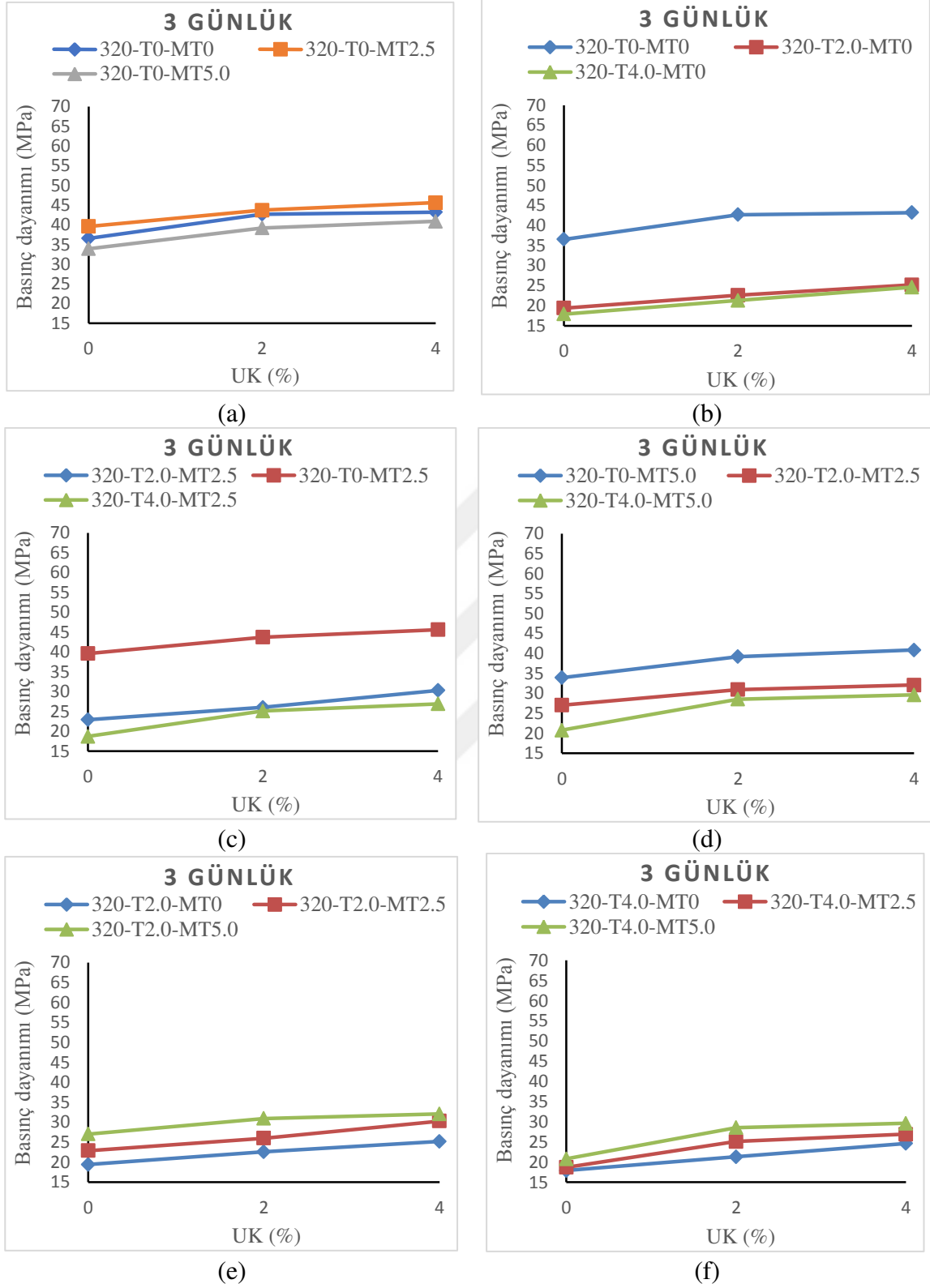
Çevre dostu beton serilerde çimento miktarı ve S/Ç oranı ne olursa olsun, lastik agregası miktarı arttıkça betonun işlenebilirliği azalmaktadır. Çevre dostu beton serilerde her lastik agregası oranında mermer tozu miktarı da arttıkça yine betonun işlenebilirliği azalmaktadır (Şekil 4.6a). Uçucu kül miktarının artışı nispeten betonun işlenebilirliğini daha olumlu etkilemektedir (Şekil 4.6b). Hem mermer tozunu hem uçucu külü hem de atık lastik agregasının değişim miktarları betonun çökme değerini önemli miktarda etkilemektedirler (Şekil 4.6c, 4.6d, 4.6e ve 4.6f).

Çevre dostu beton elde etmek için mermer tozu (MT), lastik agregası (T) ve uçucu kül (UK) olmak üzere üç farklı atık malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler içerisinde miktarı arttıkça beton basınç dayanımını artıran malzeme uçucu küldür. Bu nedenle ve atık malzemelerin basınç dayanımı üzerine etkilerinin daha rahat tespit edilebilmesi için grafiklerde basınç dayanımının uçucu kül tabanlı değişimleri grafiklerde sunulmuştur (Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10).

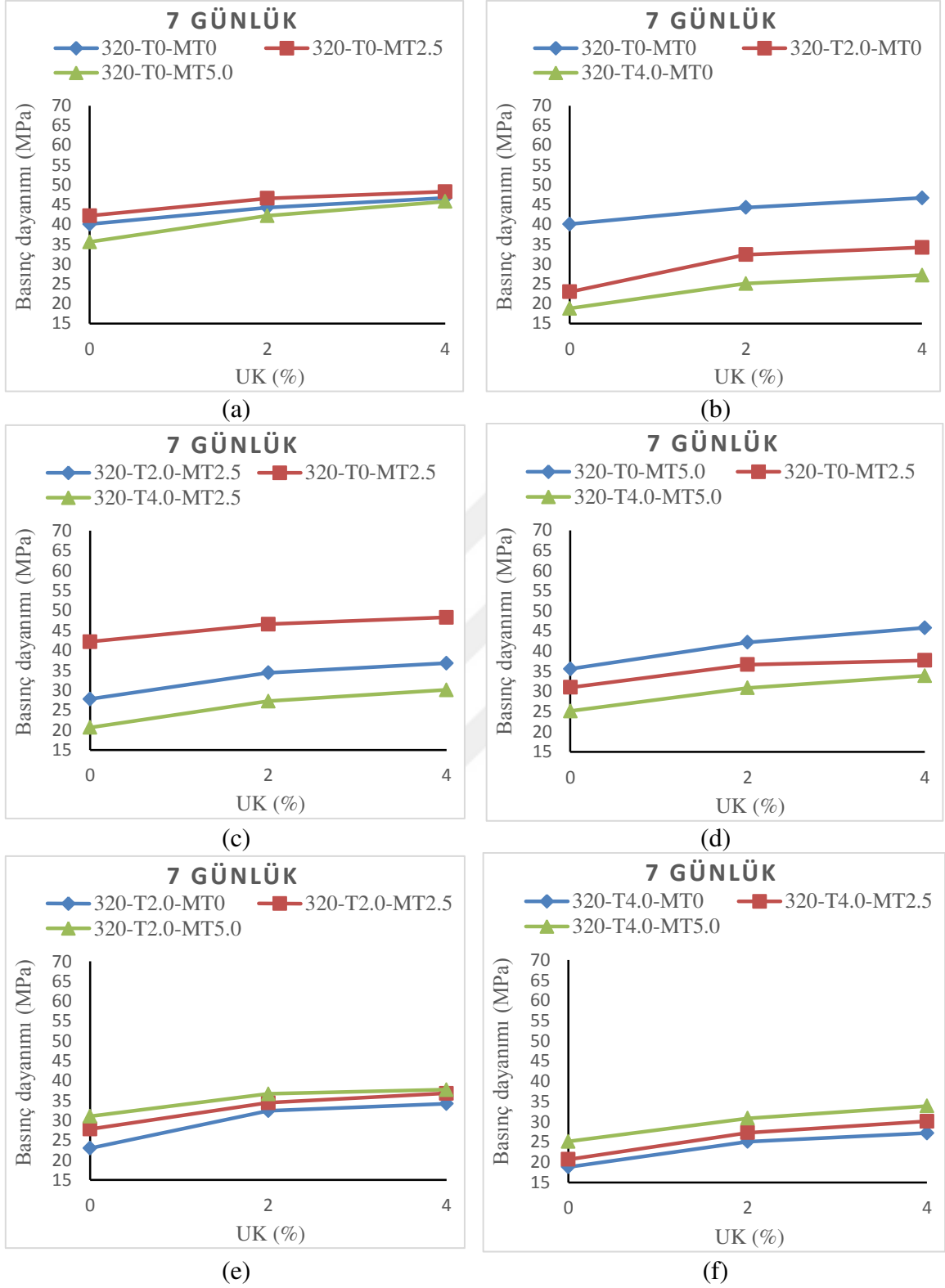
3, 7, 28 ve 90 günlük beton basınç dayanımlarına ait sırasıyla Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 grafikleri incelendiğinde basınç dayanımlarının yaş ilerledikçe arttıkları görülmektedir. Uçucu kül miktarı arttıkça basınç dayanım değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu artış 90 günlük serilerde daha büyük bir orana ulaşmıştır. Bunun sebebi ileri yaş dayanımına uçucu külün pozolanik etkisinin katkısı olarak yorumlanmıştır (Şekil 4.10). Benzer şekilde her yaş grubu beton serilerinde mermer tozu miktarı arttıkça yine beton basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebinin boşluk doldurma etkisi olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.7a, Şekil 4.8a, Şekil 4.9a ve Şekil 4.10a).

Lastik agregası miktarı arttıkça beton basınç dayanımında önemli miktarda azalmalar gözlenmiştir (Şekil 4.7b, Şekil 4.8b, Şekil 4.9b ve Şekil 4.10b). Bu azalmaların oranı 90 günlük dayanımlarda düşüş göstermiştir. Bunun nedeninin uçucu külün ileri yaş dayanımına yaptığı olumlu katkı olduğu düşünülmektedir. Elde edilen mevcut grafikler ile atık malzemelerin beton basınç dayanımı üzerine kombine etkisinin belirlenmesi oldukça zaman alıcıdır. Bu nedenle Bölüm 5'te istatistiksel bir metot yardımıyla bu kombine etki incelenmiş ve matematiksel bir model geliştirilmiştir.

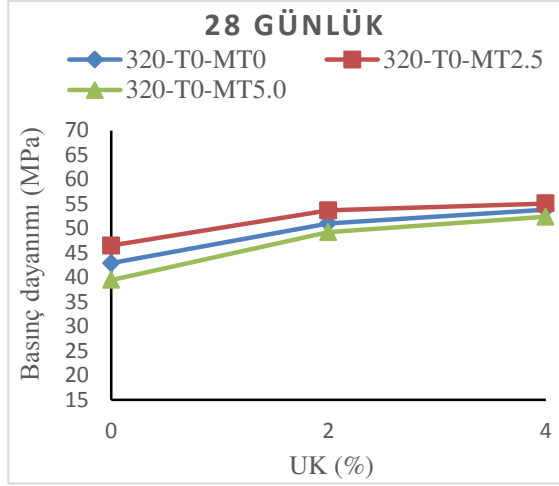
Farklı beton karışımlarına sahip serilerde lastik agregası beton basınç dayanımı üzerinde hep aynı etkiyi göstermiştir. Lastik agregası oranı arttıkça basınç dayanımı oranı azalmıştır. Ancak bu azalma oranı çimento miktarı ve S/Ç oranı değiştikçe farklılık göstermektedir (Şekil 4.11). Şekil 4.11'deki grafikler ile beton bileşiminde yer alan ana maddelerin ve atık malzemelerin ayrı ayrı beton basınç dayanımı üzerindeki etkilerini tahmin etmek oldukça zordur. Bölüm 5'te geliştirilen matematiksel model sonucunda elde edilen grafikler bu ilişkileri daha net bir şekilde açıklamaktadır.



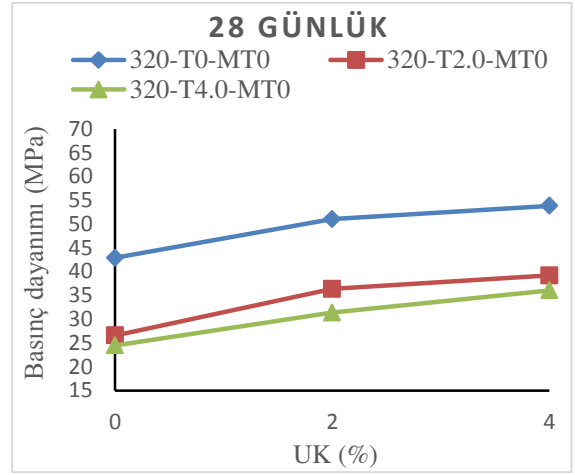
Şekil 4.7. Uçucu kül oranı ile betonun 3 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki



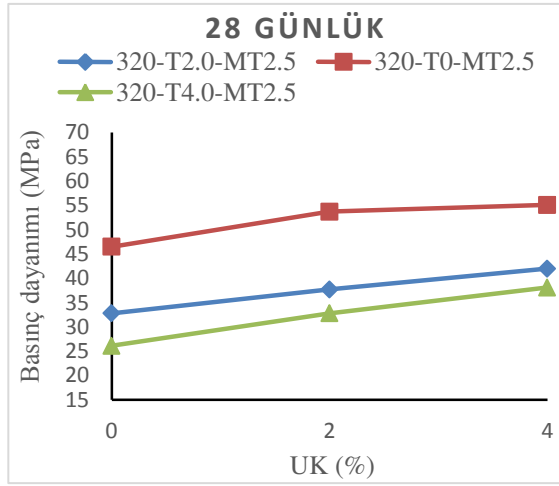
Şekil 4.8. Uçucu kül oranı ile betonun 7 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki



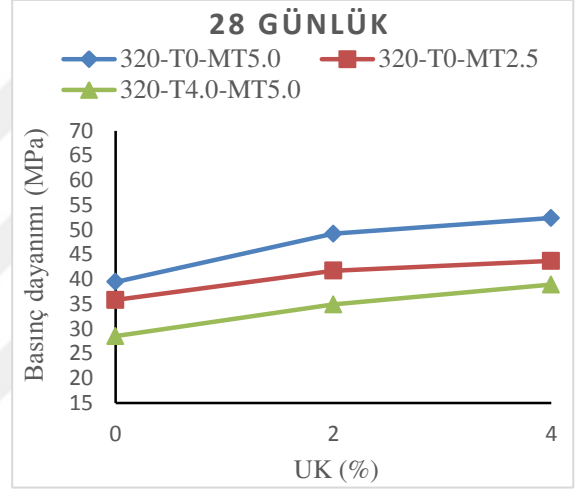
(a)



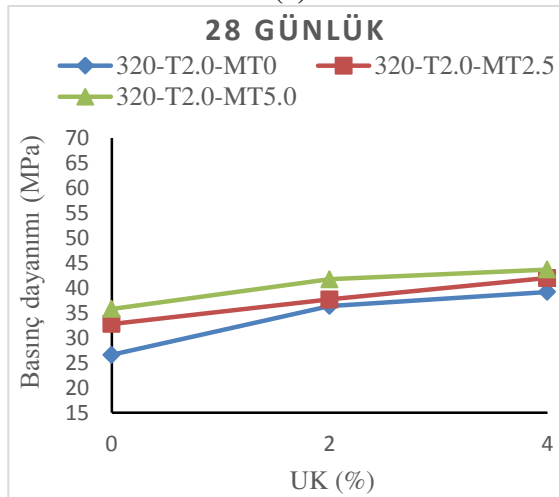
(b)



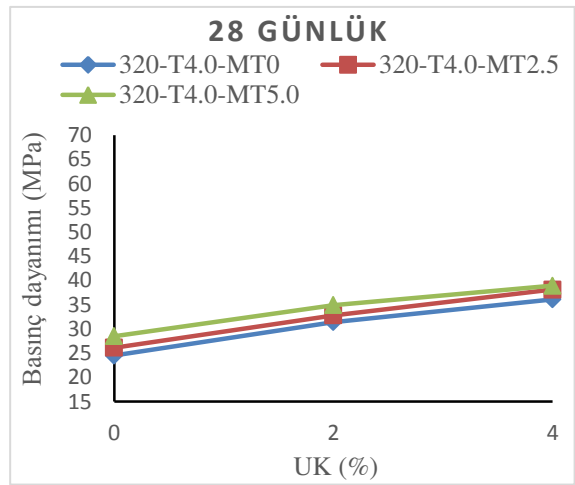
(c)



(d)

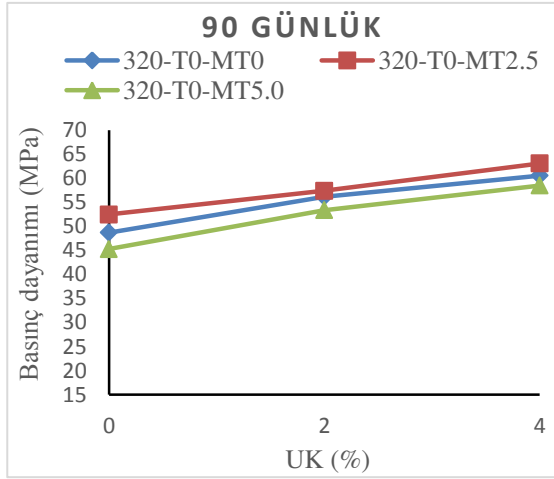


(e)

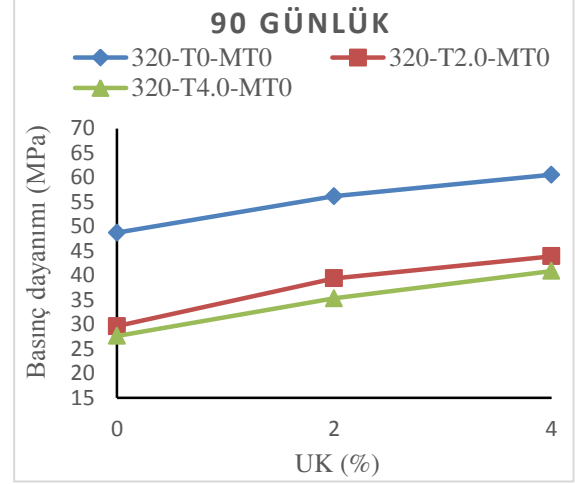


(f)

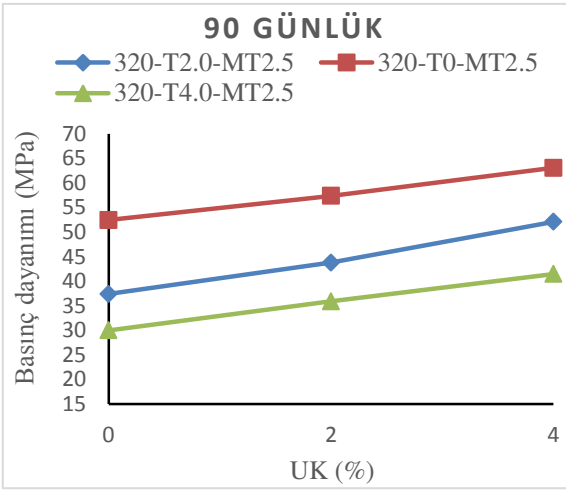
Şekil 4.9. Uçucu kül oranı ile betonun 28 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki



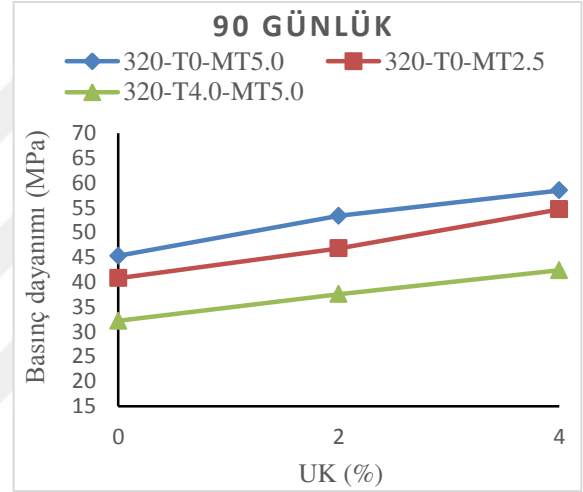
(a)



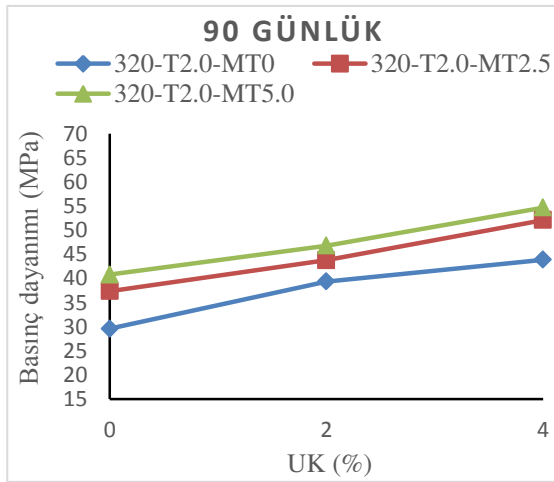
(b)



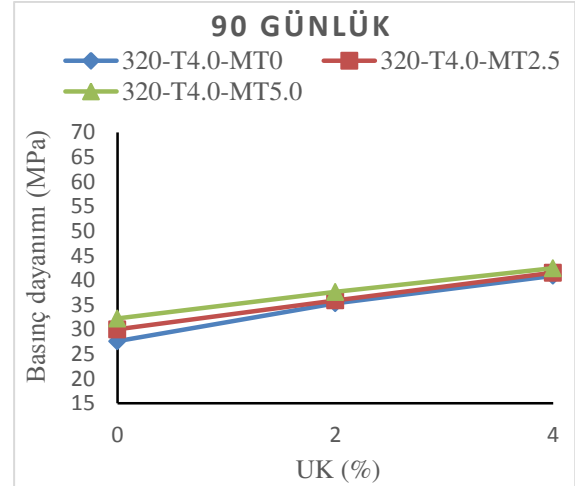
(c)



(d)

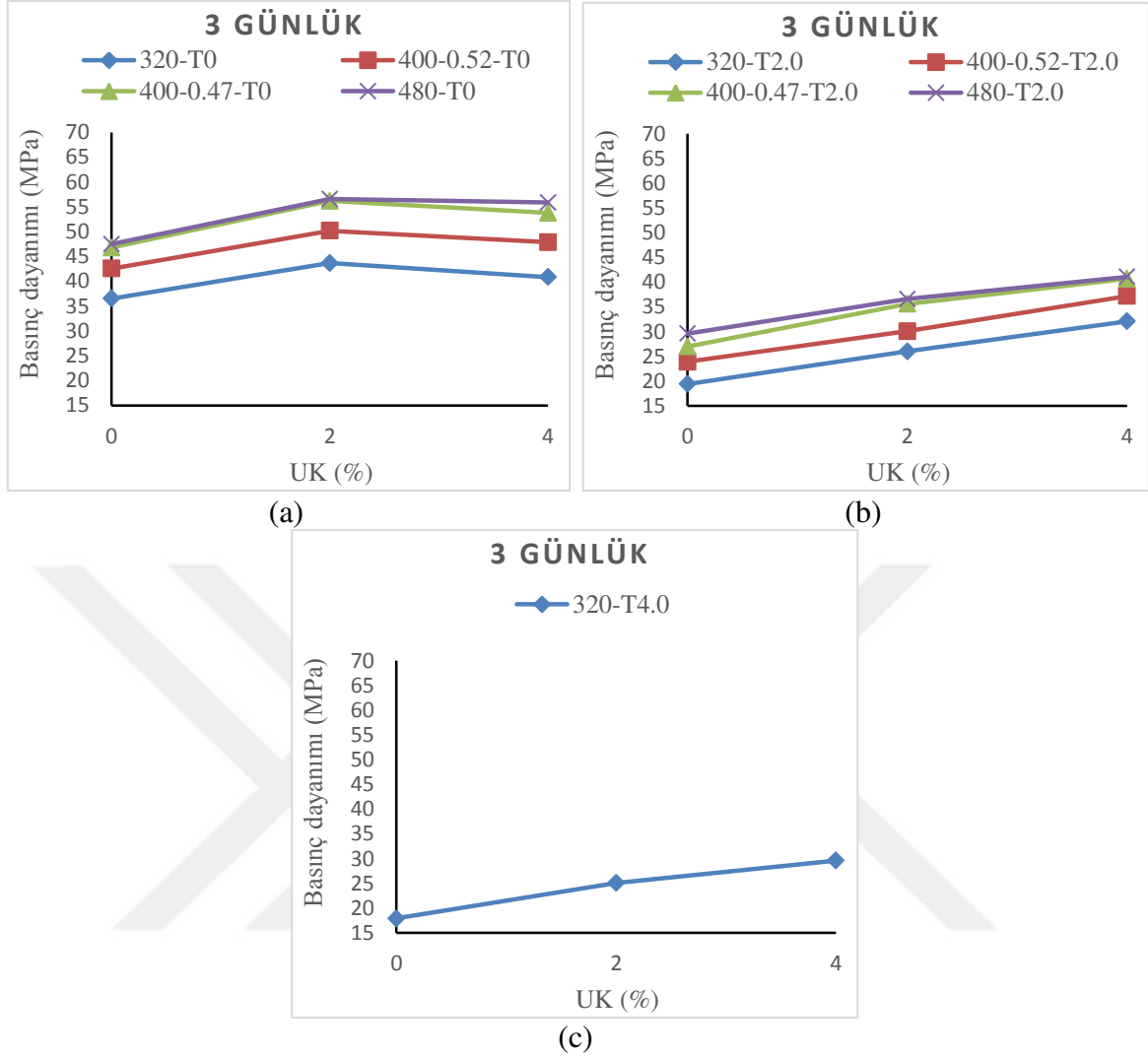


(e)



(f)

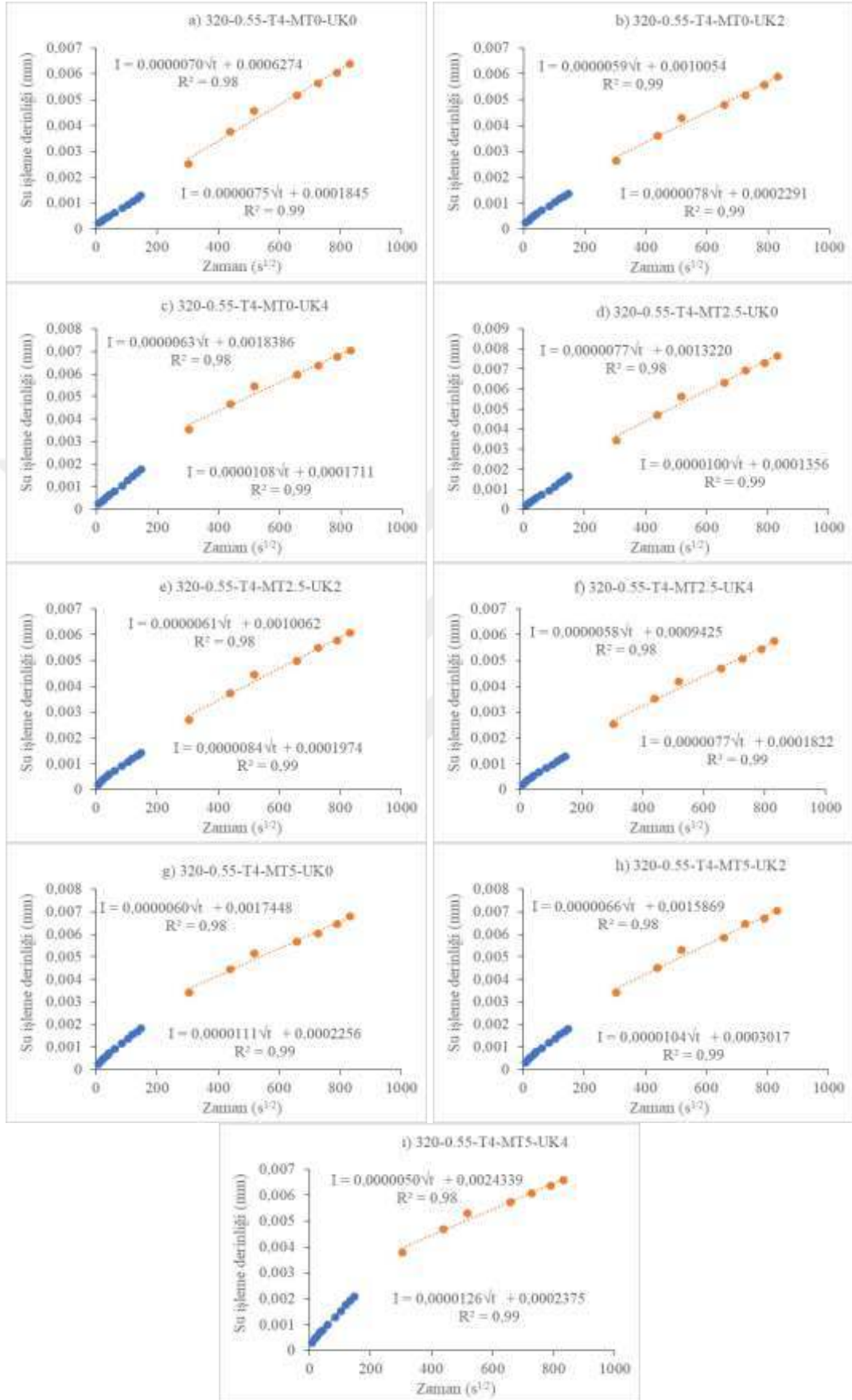
Şekil 4.10. Uçucu kül oranı ile betonun 90 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki



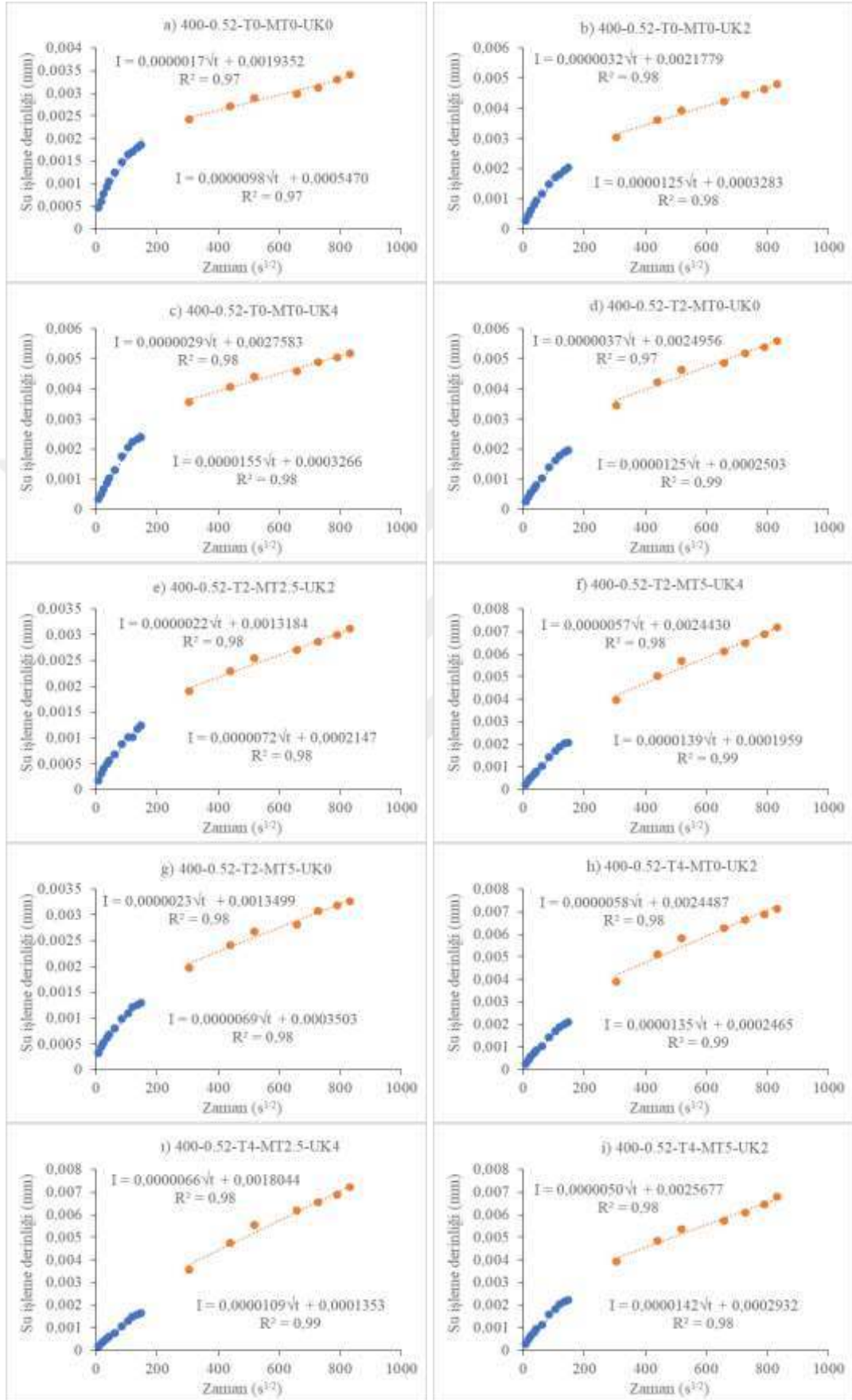
Şekil 4.11 Uçucu kül oranı ile farklı beton karışım oranlarına sahip betonların 3 günlük basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

4.3. Atık Lastik Agrega ve Mermer Tozu ile Yapılan Permeabilite Deneyleri

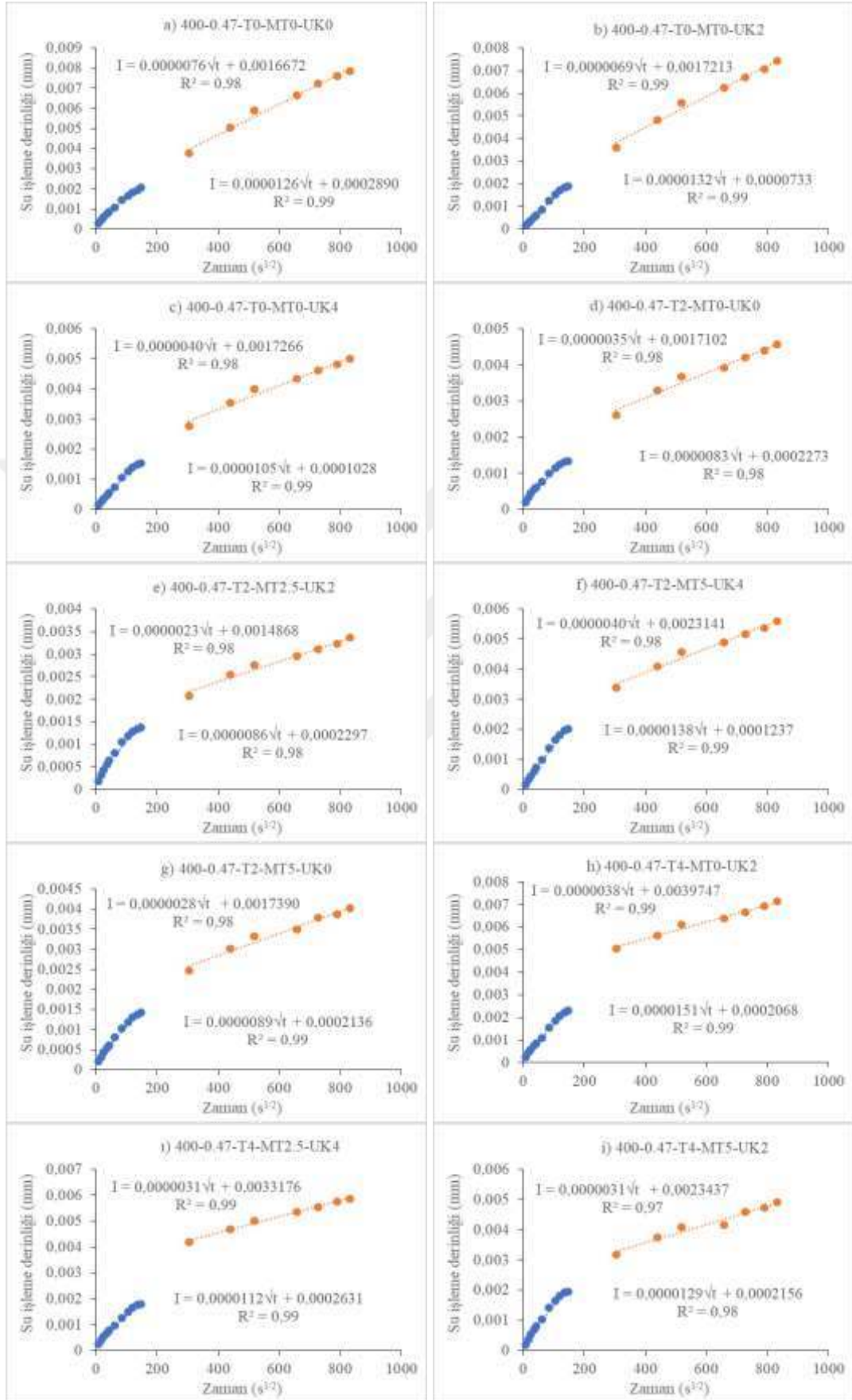
Bu bölümde atık lastik ve mermer tozu ile yapılan permeabilite deneylerinin grafiksel olarak yorumlamaları yapılmıştır. 320 kg/m³ ve 0.55 S/Ç, 400 kg/m³ ve 0.52 S/Ç, 400 kg/m³ ve 0.47 S/Ç, 480 kg/m³ ve 0.50 S/Ç oranlarına sahip beton numunlerin permeabilite deneyleri sonuçları aşağıda sırasıyla ilgili Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 numaralı grafikler de paylaşılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre genellikle $R^2=0.99$ (belirlilik katsayısı) olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarının kontrolü yapılmıştır ve uygunluğu tespit edilmiştir. Tablo 4.1’de ise başlangıç ve nihai permeabilite hesaplamaları yapılmış ve tablo olarak sonuçlar paylaşılmıştır.



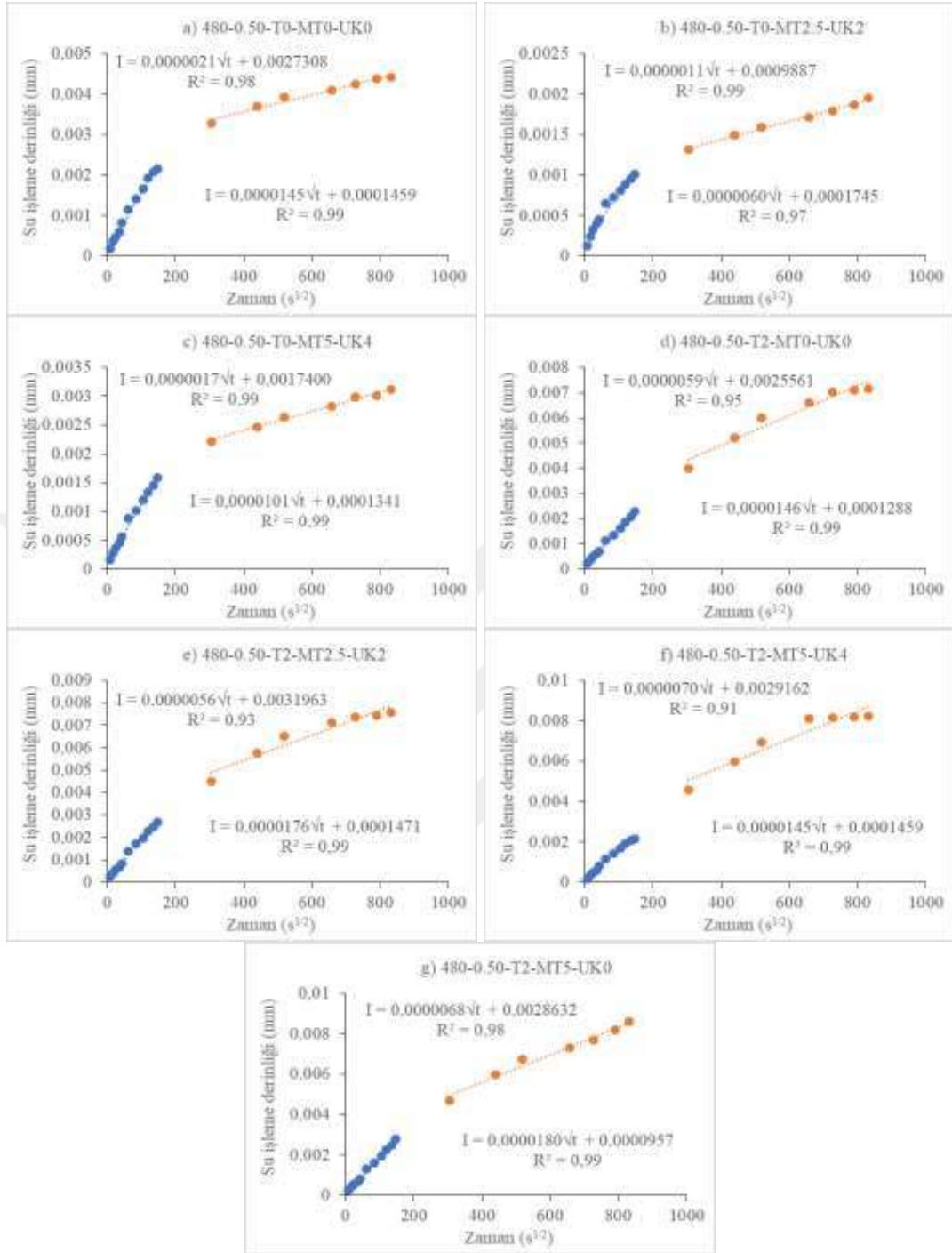
Şekil 4.12. 320 kg/m³ ve 0.55 S/Ç için su işleme derinliği ve zaman grafiği



Şekil 4.13. 400 kg/m³ ve 0.52 S/Ç için su işleme derinliği ve zaman grafiği



Şekil 4.14. 400 kg/m³ ve 0.47 S/Ç için su işleme derinliği ve zaman grafiği



Şekil 4.15. 480 kg/m³ ve 0.50 S/Ç için su işleme derinliği ve zaman grafiği

Tablo 4.1. Başlangıç ve nihai permeabilite hesaplamaları

	Seri Adı	Başlangıç Permeabilitesi	R ²	Nihai Permeabilitesi	R ²
1.	320-0.55-T4-MT0-UK0	$I = 0.0000075\sqrt{t} + 0.0001845$	0.99	$I = 0.0000070\sqrt{t} + 0.0006274$	0.98
2.	320-0.55-T4-MT0-UK2	$I = 0.0000078\sqrt{t} + 0.0002291$	0.99	$I = 0.0000059\sqrt{t} + 0.0010054$	0.99
3.	320-0.55-T4-MT0-UK4	$I = 0.0000108\sqrt{t} + 0.0001711$	0.99	$I = 0.0000063\sqrt{t} + 0.0018386$	0.98
4.	320-0.55-T4-MT2.5-UK0	$I = 0.0000100\sqrt{t} + 0.0001356$	0.99	$I = 0.0000077\sqrt{t} + 0.0013220$	0.98
5.	320-0.55-T4-MT2.5-UK2	$I = 0.0000084\sqrt{t} + 0.0001974$	0.99	$I = 0.0000061\sqrt{t} + 0.0010062$	0.98
6.	320-0.55-T4-MT2.5-UK4	$I = 0.0000077\sqrt{t} + 0.0001822$	0.99	$I = 0.0000058\sqrt{t} + 0.0009425$	0.98
7.	320-0.55-T4-MT5-UK0	$I = 0.0000111\sqrt{t} + 0.0002256$	0.99	$I = 0.0000060\sqrt{t} + 0.0017448$	0.98
8.	320-0.55-T4-MT5-UK2	$I = 0.0000104\sqrt{t} + 0.0003017$	0.99	$I = 0.0000066\sqrt{t} + 0.0015869$	0.98
9.	320-0.55-T4-MT5-UK4	$I = 0.0000126\sqrt{t} + 0.0002375$	0.99	$I = 0.0000050\sqrt{t} + 0.0024339$	0.98
10.	400-0.52-T0-MT0-UK0	$I = 0.0000098\sqrt{t} + 0.0005470$	0.97	$I = 0.0000017\sqrt{t} + 0.0019352$	0.97
11.	400-0.52-T0-MT0-UK2	$I = 0.0000125\sqrt{t} + 0.0003283$	0.98	$I = 0.0000032\sqrt{t} + 0.0021779$	0.98
12.	400-0.52-T0-MT0-UK4	$I = 0.0000155\sqrt{t} + 0.0003266$	0.98	$I = 0.0000029\sqrt{t} + 0.0027583$	0.98
13.	400-0.52-T2-MT0-UK0	$I = 0.0000125\sqrt{t} + 0.0002503$	0.99	$I = 0.0000037\sqrt{t} + 0.0024956$	0.97
14.	400-0.52-T2-MT2.5-UK2	$I = 0.0000072\sqrt{t} + 0.0002147$	0.98	$I = 0.0000022\sqrt{t} + 0.0013184$	0.98
15.	400-0.52-T2-MT5-UK4	$I = 0.0000139\sqrt{t} + 0.0001959$	0.99	$I = 0.0000057\sqrt{t} + 0.0024430$	0.98
16.	400-0.52-T2-MT5-UK0	$I = 0.0000069\sqrt{t} + 0.0003503$	0.98	$I = 0.0000023\sqrt{t} + 0.0013499$	0.98
17.	400-0.52-T4-MT0-UK2	$I = 0.0000135\sqrt{t} + 0.0002465$	0.99	$I = 0.0000058\sqrt{t} + 0.0024487$	0.98
18.	400-0.52-T4-MT2.5-UK4	$I = 0.0000109\sqrt{t} + 0.0001353$	0.99	$I = 0.0000066\sqrt{t} + 0.0018044$	0.98
19.	400-0.52-T4-MT5-UK2	$I = 0.0000142\sqrt{t} + 0.0002932$	0.98	$I = 0.0000050\sqrt{t} + 0.0025677$	0.98
20.	400-0.47-T0-MT0-UK0	$I = 0.0000126\sqrt{t} + 0.0002890$	0.99	$I = 0.0000076\sqrt{t} + 0.0016672$	0.98
21.	400-0.47-T0-MT0-UK2	$I = 0.0000132\sqrt{t} + 0.0000733$	0.99	$I = 0.0000069\sqrt{t} + 0.0017213$	0.99
22.	400-0.47-T0-MT0-UK4	$I = 0.0000105\sqrt{t} + 0.0001028$	0.99	$I = 0.0000040\sqrt{t} + 0.0017266$	0.98
23.	400-0.47-T2-MT0-UK0	$I = 0.0000083\sqrt{t} + 0.0002273$	0.98	$I = 0.0000035\sqrt{t} + 0.0017102$	0.98
24.	400-0.47-T2-MT2.5-UK2	$I = 0.0000086\sqrt{t} + 0.0002297$	0.98	$I = 0.0000023\sqrt{t} + 0.0014868$	0.98
25.	400-0.47-T2-MT5-UK4	$I = 0.0000138\sqrt{t} + 0.0001237$	0.99	$I = 0.0000040\sqrt{t} + 0.0023141$	0.98
26.	400-0.47-T2-MT5-UK0	$I = 0.0000089\sqrt{t} + 0.0002136$	0.99	$I = 0.0000028\sqrt{t} + 0.0017390$	0.98
27.	400-0.47-T4-MT0-UK2	$I = 0.0000151\sqrt{t} + 0.0002068$	0.99	$I = 0.0000038\sqrt{t} + 0.0039747$	0.99
28.	400-0.47-T4-MT2.5-UK4	$I = 0.0000112\sqrt{t} + 0.0002631$	0.99	$I = 0.0000031\sqrt{t} + 0.0033176$	0.99
29.	400-0.47-T4-MT5-UK2	$I = 0.0000129\sqrt{t} + 0.0002156$	0.98	$I = 0.0000031\sqrt{t} + 0.0023437$	0.97
30.	480-0.50-T0-MT0-UK0	$I = 0.0000145\sqrt{t} + 0.0001459$	0.99	$I = 0.0000021\sqrt{t} + 0.0027308$	0.98
31.	480-0.50-T0-MT2.5-UK2	$I = 0.0000060\sqrt{t} + 0.0001745$	0.97	$I = 0.0000011\sqrt{t} + 0.0009887$	0.99
32.	480-0.50-T0-MT5-UK4	$I = 0.0000101\sqrt{t} + 0.0001341$	0.99	$I = 0.0000017\sqrt{t} + 0.0017400$	0.99
33.	480-0.50-T2-MT0-UK0	$I = 0.0000146\sqrt{t} + 0.0001288$	0.99	$I = 0.0000059\sqrt{t} + 0.0025561$	0.95
34.	480-0.50-T2-MT2.5-UK2	$I = 0.0000176\sqrt{t} + 0.0001471$	0.99	$I = 0.0000056\sqrt{t} + 0.0031963$	0.93
35.	480-0.50-T2-MT5-UK4	$I = 0.0000145\sqrt{t} + 0.0001459$	0.99	$I = 0.0000070\sqrt{t} + 0.0029162$	0.91
36.	480-0.50-T2-MT5-UK0	$I = 0.0000180\sqrt{t} + 0.0000957$	0.99	$I = 0.0000068\sqrt{t} + 0.0028632$	0.98

Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de farklı karışım oranlarına sahip seriler için su işleme derinliği ve zaman grafikleri çizilmiştir. Her bir grafikte, iki ayrı veri grubu için lineer eğriler uydurulmuştur. Birinci eğrinin eğimi başlangıç kılcallık katsayısını, ikinci eğrinin eğimi ise nihai kılcallık katsayısını vermektedir. Eğrilerin tamamının R^2 değerleri 0.90’ın üzerindedir. Bu sonuç, elde edilen katsayı değerlerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu grafikler yardımıyla farklı karışımlara ait serilerin kılcallık katsayıları rahatça tespit edilebilirler.

Tablo 4.1’de kılcallık deneyi yapılan tüm serilere ait katsayı ve R^2 değerleri verilmiştir. Bu tabloda bulunan denklemler kullanılarak, herhangi bir zaman dilimine ait su işleme derinlikleri yüksek doğrulukla ve pratik bir şekilde hesaplanabilirler.



5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çevre dostu betonların uygulamada yaygınlaşmasının önündeki en önemli engellerden biri de literatürde pratik karışım hesap metodlarının olmamasıdır. Çevre dostu beton üretiminde kullanılan atık malzemelerin her birinin taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkileri farklı olmaktadır. Dolayısıyla bu etkilerin tahmin edilerek uygun karışım oranlarının hesaplanması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında iki ana adımda gerçekleştirilen deneysel çalışmaların verileri kullanılarak, çevre dostu betonlar için karışım hesap metodları geliştirilmiştir. Bu metodlar geliştirilirken, istatistiksel yöntemlerden tepki yüzeyi metodu kullanılmıştır.

5.1. Tepki Yüzeyi Metodu (TYM)

Betonla ilgili birçok deney metodu uygulanmaktadır. Mevcut yöntemler dışında birçok yöntem geliştirilmekte ve geliştirilmesi için yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Burada ki amaç her durum ve koşul için betonun davranışını çözmek ve böylece bu davranışa göre ihtiyacı karşılayabilecek şekilde doğru beton tipini seçmek ve üretebilmektir. Betonun işlenebilirliğini ölçmek için çökme deneyi, yayılma ve ayrışma deneyleri yapılırken, sertleşmiş beton özellikleri için ise basınç, eğilme ve yarma vb. deneyler yapılmaktadır [163]. Betonun davranışı etkileyen faktörler betonun karışımı içerisinde yer alan malzemelerdir. Bu malzemelerin çeşitlerine ve karışım oranlarına göre oluşan beton çeşidi değişmektedir. Ayrıca betona dışarıdan katılan katkı malzemeleri ile bu davranış şekli değiştirilebilmektedir. Bunlar kimyasal katkılar, mineral katkılar gibi malzemelerdir [164]. Beton üretiminde ve kontrol amaçlı yapılan tüm test sonuçlarında birçok giriş ve çıkış parametresi karşımıza çıkmaktadır. Tüm bu parametrelerden oluşan fonksiyonun belirlenip ve yorumlanabilmesi için istatistik yöntemler kullanılarak analiz yapılması zorunludur [165].

Tepki yüzeyi metodu, bir veya daha fazla seçilmiş kritere göre, kontrollü deneysel faktörler grubu ile ölçülen tepkiler arasında var olan ilişkilerin değerlendirilmesini sağlayan ayrılmış bir grup ampirik teknikten oluşmaktadır [166]. Yapılan çalışmalar ile beton araştırmaları üzerinde tepki yüzeyi yönteminin kullanılmasının uygulanabilir olduğu ve ortaya çıkan sonuçların başarılı olduğu gözlemlenmiştir [167]. Bayramov v.d., yapmış oldukları bir çalışmada betondan daha sünek bir davranış elde etmek için çelik elyaf takviyeli betonların kırılma parametrelerini optimize etmişlerdir. Yöntem olarak tepki yüzeyi metodunu seçmişler ve bu yöntem ile liflerin en üst düzeyde optimizasyonlarını sağlayarak bir karakteristik uzunluk ve en az çelik lif hacim oranlı ile sağlanacak eğilme dayanımı araştırılmıştır. Bu amaçla istatistiksel bir TYM kullanılmıştır. TYM'ler, bir veya daha fazla ölçülen yanıtın çeşitli faktörlerden etkilendiği ve karakteristik

uzunluğun tespitinde önemli rol oynamışlardır. TYM, problem geliştirme, iyileştirme ve optimizasyona faydalı yaklaşımlar sağlamak için istatistiksel ve matematiksel deney tasarımı, regresyon analizi ve optimizasyon yöntemlerini birleştirir. Üretilcek serilerin planlanması, yürütülmesi ve değerlendirilmesi için kapsamlı, istatistiksel temelli bir prosedür sağlamaktadır. Deney sonucunda, TYM ile çıkan sonuçlar incelendiğinde minimum gevreklik gibi çeşitli performans kriterlerini karşılayacak şekilde optimize edildiği görülmüştür. Sonuçlar modelin öngörülebilirliğinin tatmin edici olduğunu göstermektedir [168]. Tüm bunlardan dolayı bu tez çalışmasında elde edilen deneysel sonuçların TYM ile analiz edilerek değerlendirilmesine karar verilmiştir.

TYM, Box ve Wilson tarafından 1951 yılında kimya endüstrisi için üretim işlemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamak için geliştirilmiştir. Yöntem geliştirilirken, düşük sıcaklık değerlerinde verimin artırılması ve kaliteli ürün üretebilmek amacıyla gerçekleştirilen kimyasal reaksiyonların optimize edilmesi hedeflenmiştir. Sıcaklık, reaksiyon süresi, basınç ve reaksiyona giren reaktiflerin oranı gibi faktörleri içeren sıralı deney sistemlerinin uygulanması ile başarı elde edilmiştir [169].

TYM’de elde bulunan faktörlerin tamamının etkisiyle oluşan bir yanıt aranmaktadır. Bu yanıt, tepki olarak da isimlendirilebilir. Mesala, bir beton numunenin basınç dayanımı araştırılırken elde ki veriler S/Ç, A/Ç ve Kk/Çimento olarak bulunuyor ise TYM’ye göre bu veriler üç ayrı fonksiyon olarak alınır. Betonun basınç dayanımı ise sonuçtur, TYM’ye göre bu da tepki (yanıt) olarak alınır. Burada amaç TYM kullanılarak elde ki üç faktör ile tepkinin araştırılması için kullanılabilecek uygun bir metot geliştirilmesidir [165].

TYM süreçleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için uygun ve yararlı bir yöntemdir. Bu yöntem istatistiksel ve matematiksel bir mantık içerir. Bir deneyde bir tepki ile sadece tek bir faktörün bağlantısı inceleniyor ise aralarında ki bu ilişki yalnız matematiksel bir bağlantı ile sağlanıp, denklem haline getirilebilmektedir. Ama faktör sayısı birden çok ise bu faktörler ile tepki arasında ki bağlantıyı gösterebilmek için matematiksel bir yöntem kullanıldığı zaman sonuçta bir denklem değil, yüzey oluşmaktadır. Bu yüzeyin oluşturulmasında ve yorumlanmasında kullanılabilecek en iyi yöntemlerden birisi TYM’dir [169].

Tepki yüzeyi metodolojisinin temeli, herhangi bir fiziksel sisteme ait n sayıdaki bağımsız değişkene (x) bağlı olarak meydana gelen tepki ölçümüne dayanır. Bu durum matematiksel olarak Denklem 5.1’de şöyle ifade edilebilir:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte; y tepki ve x_n ise fonksiyonlardır.

Yapılan bir çalışmada, gözlenen y' değeri ile beklenen y değeri arasında bir uyumsuzluk var ise bu fark sistemin hatası olarak isimlendirilir ve ε ile gösterilir. Bu durumda ortaya çıkan matematiksel ifade Denklem 5.2 ile şu şekilde yazılabilir:

$$y' = f(x) + \varepsilon \quad (5.2)$$

Tepki yüzeyleri modelleri, değişkenler ve değişkenlerin interaksiyonlarını içeren çoğunlukla kuadratik (2.derece) veya kübik (3.derece) polinom şeklindedir. Böylesi bir polinomiyal denklem teorik olarak Denklem 5.3 ile şu şekilde ifade edilir [170]:

$$y' = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i^1 + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon_0 \quad (5.3)$$

Bu eşitlikte; y' tepki, β_0 model sabiti, β_i β_{ii} β_{ij} değişken katsayıları, x_i x_j kodlanmış bağımsız değişkenler ve ε_0 ise deneysel hatadır.

TYM işlem sıralaması şöyle sıralanabilir:

- Faktörlerin seçilmesi
- Faktörler ve tepki arasındaki ilk ilişkinin belirlenmesi
- Tepki formunun belirlenmesi (kodlu veya gerçek)
- Tepki ölçüm yönteminin seçilmesi
- Modele ait denklemin belirlenmesi
- Modelin denkleminin uygunluğunun test edilmesi ve hata oranlarının belirlenmesi
- Sonuçların grafik haline getirilmesi

Bu tez çalışmasında, tepki (yanıt) değerleri çökme ve farklı yaşlardaki basınç dayanımlarıdır. Tepkilerin tahmin edilmesi için kullanılacak faktörler ise S/Ç oranı, agrega/çimento oranı, iri/ince agrega oranı ve atık malzeme/çimento oranı değerleridir. Tepki yüzey metodunda ikiden fazla faktörün (en az iki olmak üzere) tepki üzerine etkisi başarı ile belirlenebilir. Ancak grafiklerde en fazla iki faktörün etkisi gösterilebilir. Tüm faktörlerin etkisi ancak ayrı ayrı pertürbasyon eğrilerinde görülmektedir.

Geliştirilen denklemin kullanım şekli tepki formunun kodlu (0-1 aralığında) veya gerçek olması ile ilgilidir. Tepki formunun gerçek değerler ile oluşturulması, geliştirilen denklemin anlaşılabilirliğini ve kullanılabilirliğini artırmaktadır [169].

TYM, 1951'den beri geliştirilerek metot ile ilgili farklı problemlerin çözümü için alternatif alt yöntemler oluşturulmuştur. Deney serilerinin tekrar sayılarına ve birbirinden farklı kaç deney serisi olduğuna göre uygun yöntem belirlenmelidir. Çoğunlukla deneme-yanılma yöntemi uygulanarak en doğru alt yöntem seçimi yapılmaktadır. Uygun alt yönteme karar verildikten sonra yapılacak analizler, matematiksel denklemler oluşturmaya yönelik iteratif hesaplardır. Burada ilgili formüller yardımıyla MATLAB (Matematiksel bir programlama yazılımı) gibi bir

program ile gerekli yazılım hazırlanarak hesaplamalar yapılabilmektedir. Ayrıca bu işlemlerin tamamının detaylı bir şekilde yapılabilmesi için hali hazırda kullanılmakta olan yazılım programları vardır. Bu hazır yazılımlardan birisi Design Expert paket programıdır. Design Expert programı, bu tezin analiz edilmesinde kullanılmıştır.

Yapılan bu analiz ile birçok farklı fonksiyon geliştirmektedir. Bu fonksiyonlardan anlamlılık değeri (R^2) en yüksek olan tercih edilmektedir. Ardından varyans analizi de olarak bilinen ANOVA (Varyans analizi) testi yapılarak incelenmektedir. Bu analiz yöntemi, iki ya da daha fazla grubun ortalama değerleri arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı ile ilgili hipotezleri test etmek için kullanılmaktadır. Geliştirilen bu fonksiyon yani matematiksel model ve modelin içindeki terimler anlamlı ise geliştirilen fonksiyonun uygun ve kullanılabilir olduğuna karar verilmektedir.

ANOVA testi ile yapılan çalışmaların, sonuçlarından p ve F değerleri oldukça önemlidir. Design Expert programı için veri aralığı uygunluğunu F değeri göstermektedir. Bu değer ayrıca veri grubuna göre değişiklik göstermektedir. p değeri ise daha genel anlamları ifade etmektedir. Bu değer 0.0001'den küçük olması anlamlılığın mükemmel olduğunu ifade ederken, 0.05'ten küçük olması ise modelin önemli olduğu ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını ifade etmektedir [167].

Analiz sonuçları üç farklı grafik ile değerlendirilir. Bu grafiklerin ilki, iki boyutlu tepki yüzeyi grafiğidir. Bu grafiğin x ve y eksenleri faktörleri, grafiğin üzerindeki kontür çizgileri ise tepki (yanıt) değerlerini ifade ederler. Bu grafik yardımıyla, faktörlere değer verilerek, tepki değeri kolayca elde edilebilir. İkinci grafik ise üç boyutlu tepki yüzeyi grafiğidir. Bu grafiğin x ve y eksenleri faktörleri, z ekseni ise tepki değerlerini göstermektedir. Bu grafik yardımıyla, faktörlerin tepki üzerindeki genel etkisi görülebilir ve sayısal değer belirlenebilir. Üçüncü grafik ise pertürbasyon eğrisidir. Bu grafiğin y ekseni tepki değerlerini, x ekseni ise faktörlerin kodlanmış değerlerini ifade ederler. Yani, x ekseni -1 ile 1 arasında değişmektedir. Her bir faktör için en düşük değer; -1, en yüksek değer ise +1 ile temsil edilmiştir. Pertürbasyon eğrilerinin her biri başka bir faktörü ifade etmektedir. Bu eğriler yardımıyla, faktörün sayısal değerindeki değişimlerin, tepkiyi nasıl etkilediği açıkça görülmektedir. Böylece faktörlerin, tepki üzerindeki etkileri yorumlanabilir ve gerekli düzenleme ve optimizasyon çalışmaları yapılabilir.

5.2. Geliştirilen Modeller

Bu tez çalışması kapsamında çevre dostu betonların karışım hesapları için iki ana model geliştirilmiştir. Her model için varyans analizi (ANOVA) yapılmış, p ve F değerleri modelin doğruluğunu ispatlamak için tespit edilmiştir. Modeller oluşturulurken Design Expert paket bilgisayar programından faydalanılmıştır.

MODEL-1: Bu model, sadece mermer tozu ile üretilmiş ancak agrega granülometrisinin etkisi dikkate alınmış ilk adım deney sonuçları kullanılarak elde edilmiştir. Model-1a; çökme değerini, Model-1b; 7 günlük beton basınç dayanımını ve Model-1c ise 28 günlük beton dayanımını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Bu modellerde, çökme ve basınç değerleri tepki (yanıt) değerleridir. Agrega/Çimento oranı (A/Ç), iri agrega/ince agrega oranı (iri/ince), mermer tozu/çimento oranı (MT/Ç) ve su/çimento oranı (S/Ç) ise faktörler olarak belirlenmiştir. Bu faktörlerin seçilmelerinin nedeni; tepkiler üzerinde bu faktörlerin önemli etkilere sahip olmalarıdır.

Model-1a, Model-1b ve Model-1c için belirlenen faktörler aynıdır ve Tablo 5.1’de tanımlanmıştır. Su/çimento oranı (S/Ç); A, Agrega/Çimento oranı (A/Ç); B, iri agrega/ince agrega oranı (iri/ince); C ve mermer tozu/çimento oranı (MT/Ç); D olarak sembolize edilmiştir. Bu değişkenlerin sayısal değerlerinin aralıkları da Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Modelin ANOVA sonuçları ise Tablo 5.2’de verilmiştir. p-değerinin 0.0001’den küçük olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu göstermektedir. İlâveten, R^2 değerleri, modelin doğruluğu hakkında fikir vermektedirler. Tablo 5.3’de matematiksel modellere ait katsayılar verilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak, modelin tahmin ettiği tepki değerlerine rahatça ulaşılabilir. Model terimlerinin p-değerleri aynen modelin kendisinde olduğu gibi terimin anlam ve değerini ifade eder. p-değerlerinden model terimlerinin anlamlı ve kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de sırasıyla faktörlerin çökme değeri üzerindeki etkisi iki ve üç boyutlu grafiklerde görülmektedir. Şekil 5.2’de yüzey tepkisi açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.3’de pertürbasyon grafiği yardımıyla çökme değeri ile Agrega/Çimento oranı (A/Ç), iri agrega/ince agrega oranı (iri/ince), mermer tozu/çimento oranı (MT/Ç) ve su/çimento oranı (S/Ç) arasındaki ilişki rahatlıkla anlaşılmaktadır. Ayrıca Model-1b’ye ait grafikler Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da paylaşılmıştır. Yine Model-1c’ye ait analizlerin grafikleri ise Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.1. Değişkenler ve değişim aralıkları

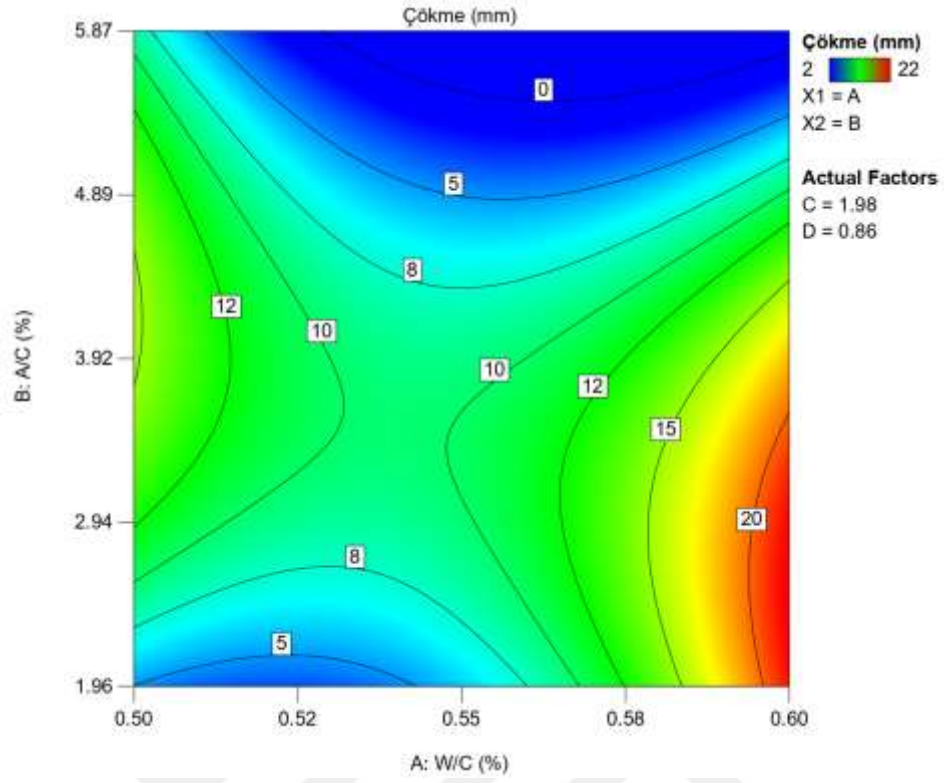
Semboller		Değişim aralığı		
Gerçek	Kod	-1	0	+1
S/Ç	A	0.50	0.55	0.60
A/Ç	B	1.96	3.915	5.87
İri/ince	C	0.35	1.98	3.61
MT/C	D	0	0.585	1.17

Tablo 5.2. Varyans analizlerinin (ANOVA) sonuçları

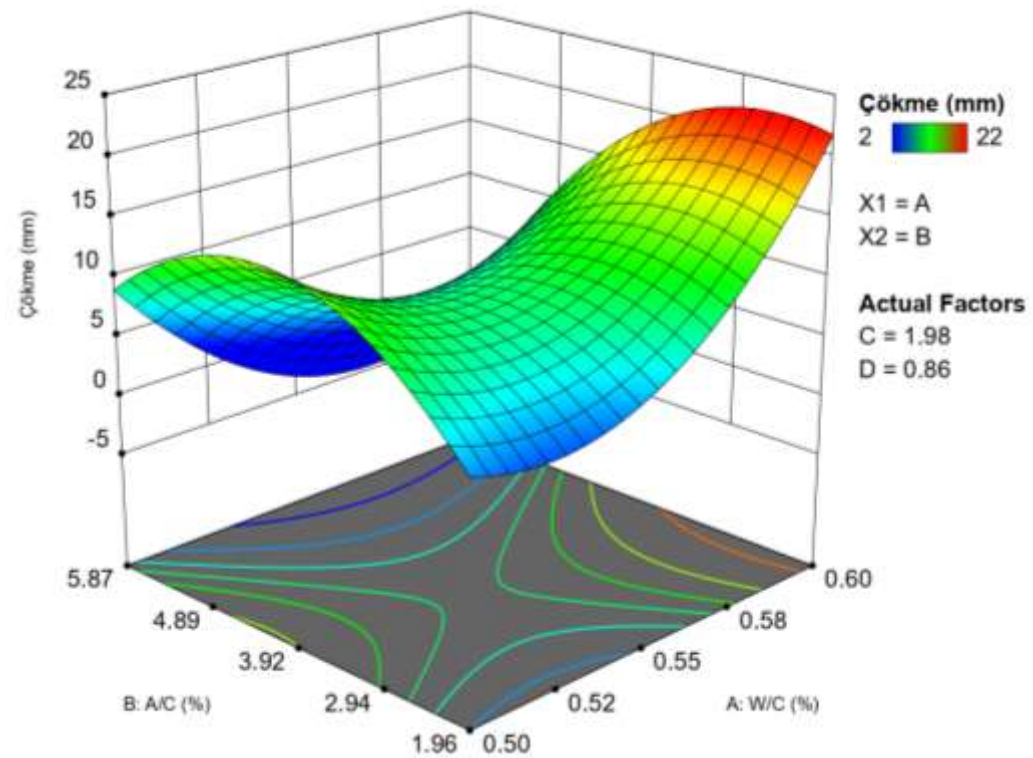
Modelin yanıtı	R ²	F-değeri	Modelin p-değeri
Çökme değeri (mm)	0.91	40.13	<0.0001
7 günlük basınç dayanımı (MPa)	0.96	42.05	<0.0001
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	0.94	33.97	<0.0001

Tablo 5.3. Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları

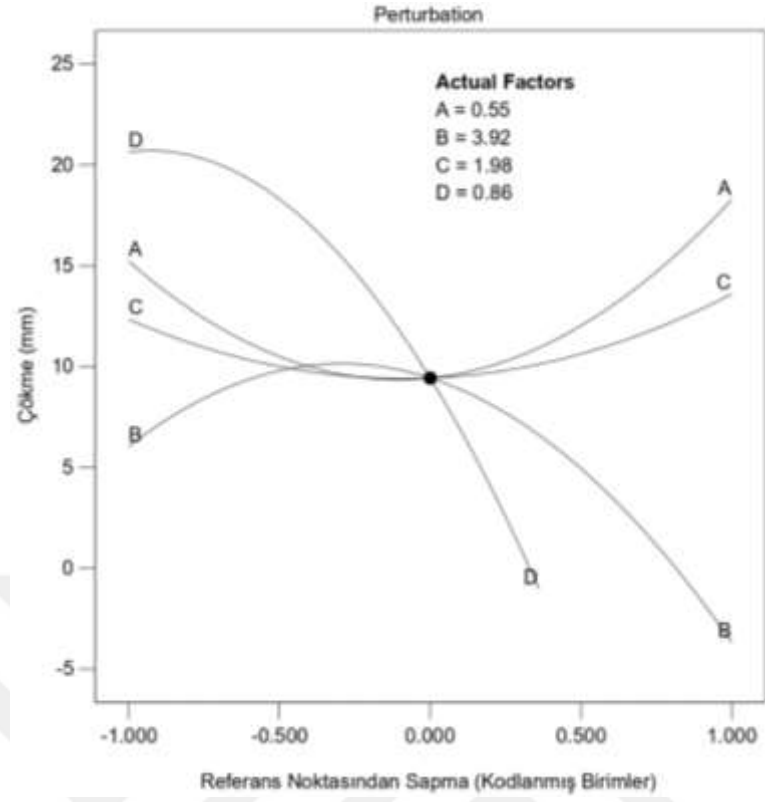
Modelin terimleri	Model-1a (Çökme değeri)		Model-1b 7 günlük Basınç dayanımı		Model-1c 28 günlük Basınç dayanımı	
	Katsayı	p-değeri	Katsayı	p-değeri	Katsayı	p-değeri
A-S/Ç	-2869.29	0.5505	-92.21	0.1217	-73.00	0.4588
B-A/Ç	+51.64	< 0.0001	+10.07	< 0.0001	+30.97	< 0.0001
C-iri/ince	+9.06	0.2659	-74.81	< 0.0001	-95.01	0.0016
D-MT/Ç	+6.50	< 0.0001	+5146.57	0.5639	+3337.67	0.6901
AB	-70.49	0.4532	-0.08	0.8891	-0.57	0.3547
AC	-38.35	0.0159	+3.10	0.0151	+6.45	0.0023
AD	+34.02	0.7393	+151.58	0.1757	+130.94	0.4630
BC	+2.59	< 0.0001	+6.90	0.0002	+7.57	0.0093
BD	-4.13424	< 0.0001	-11.62	0.3955	-33.62	0.1375
CD	-3.47	0.0089	+125.27	0.2653	+121.07	0.5053
A ²	+2929.55	0.2644	+0.67	0.1347	-0.35	0.5347
B ²	-2.16	< 0.0001	-3.36	0.0004	-5.67	0.0006
C ²	+1.33	0.0061	-22.14	< 0.0001	-15.84	0.0002
D ²	-17.65	< 0.0001	-5267.68	0.0882	-3569.24	0.4899
sabit	693.84		-1170.88		-695.90	



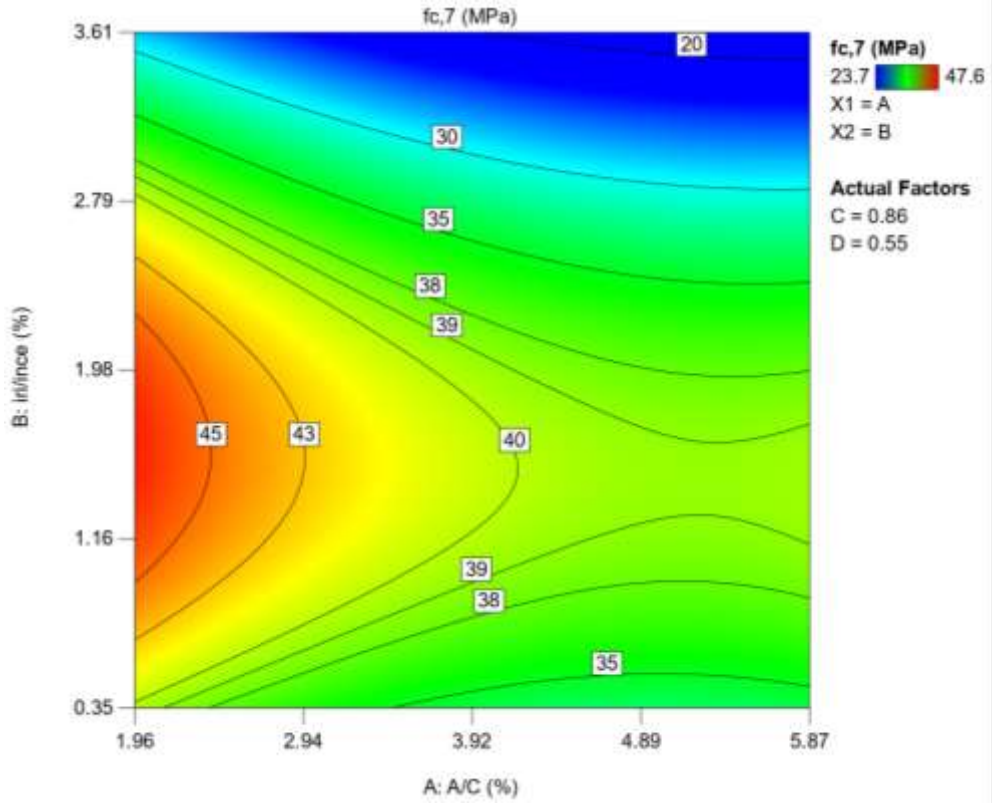
Şekil 5.1. Model-1a'ya ait iki boyutlu etki grafiği



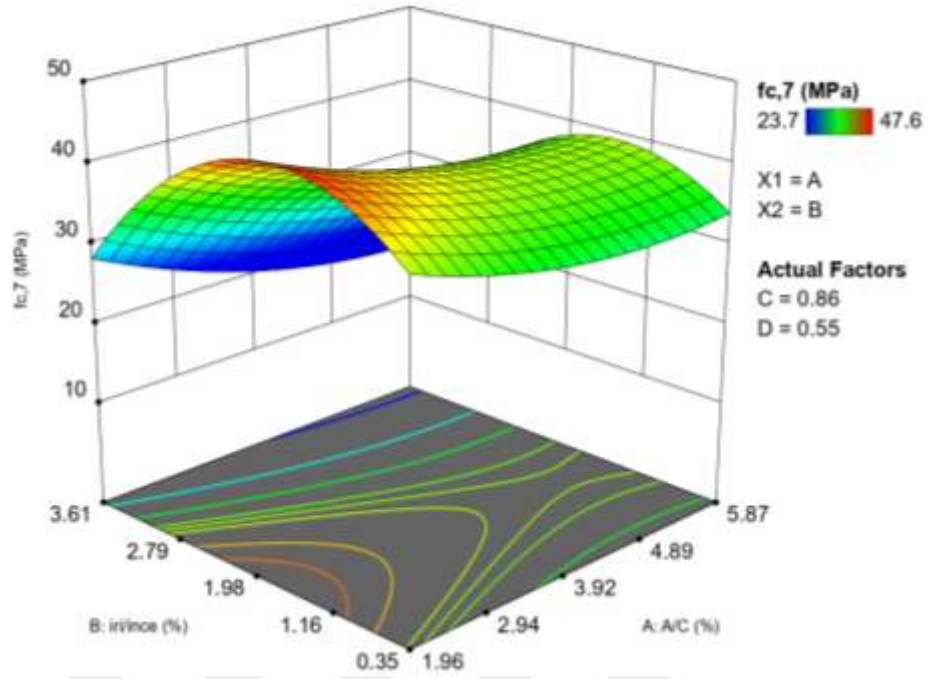
Şekil 5.2. Model-1a'ya ait üç boyutlu yüzey tepkisi



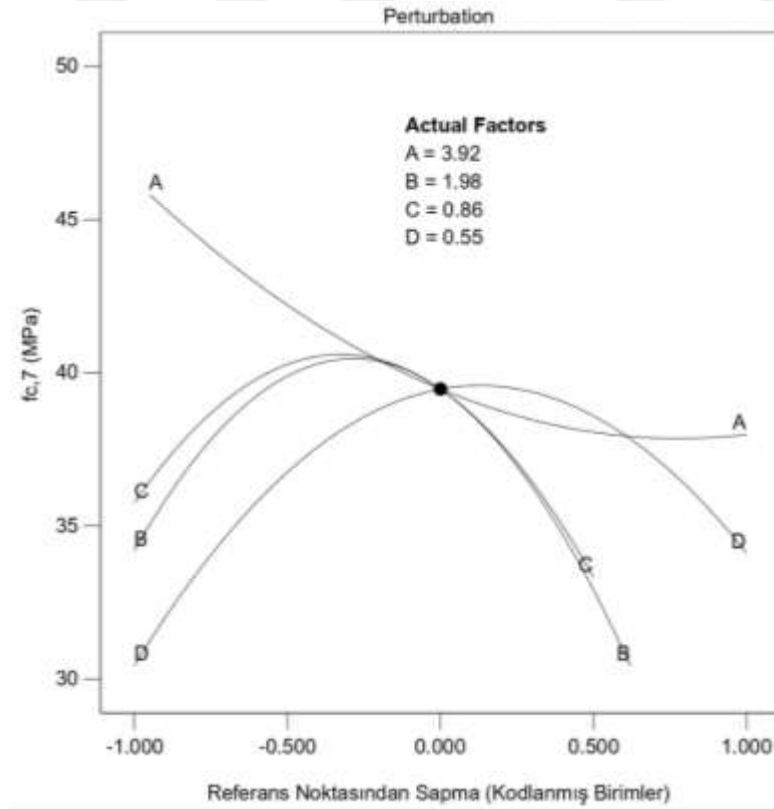
Şekil 5.3. Model-1a'ya ait pertürbasyon grafiği



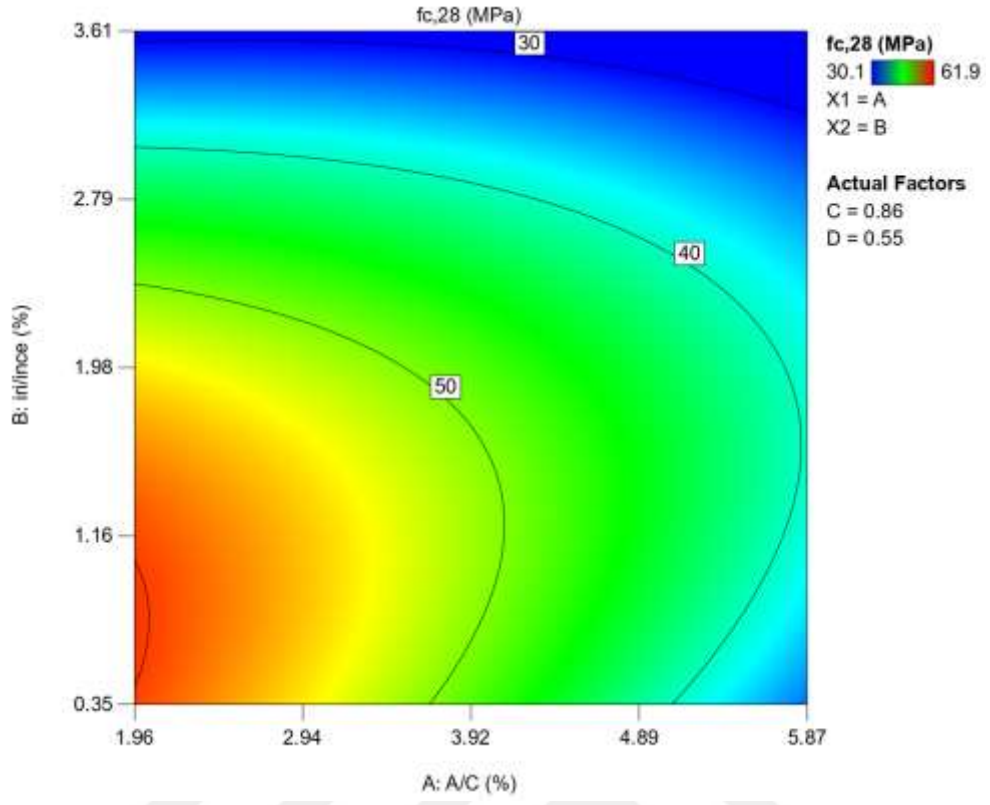
Şekil 5.4. Model-1b'ye ait iki boyutlu etki grafiği



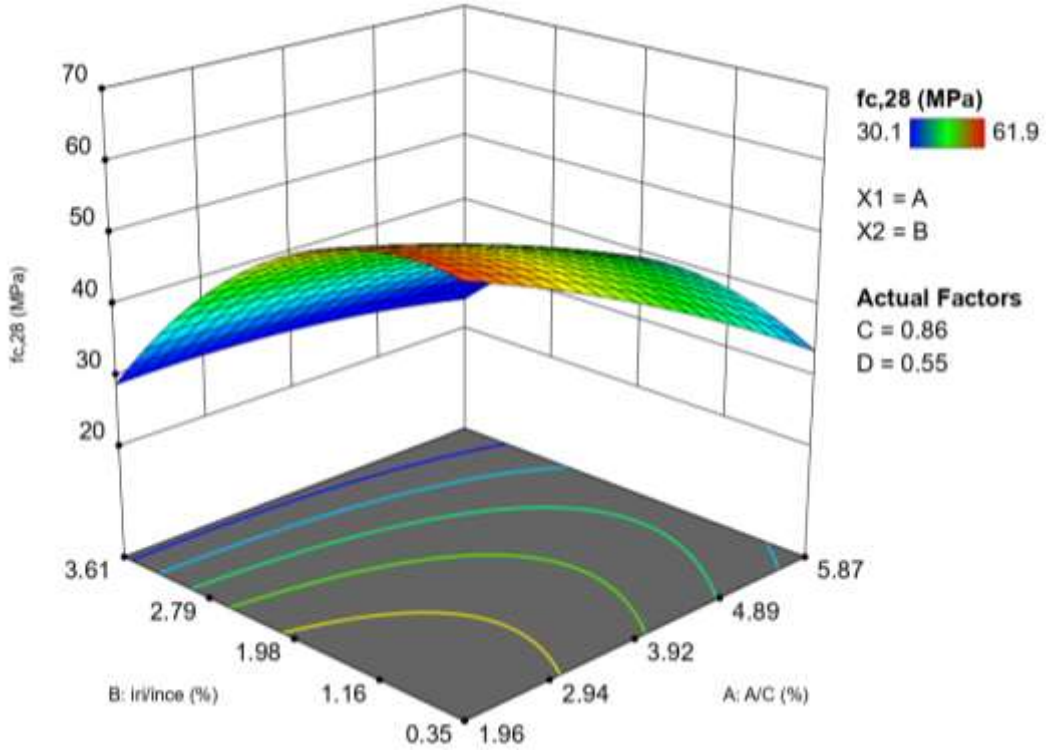
Şekil 5.5. Model-1b'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi



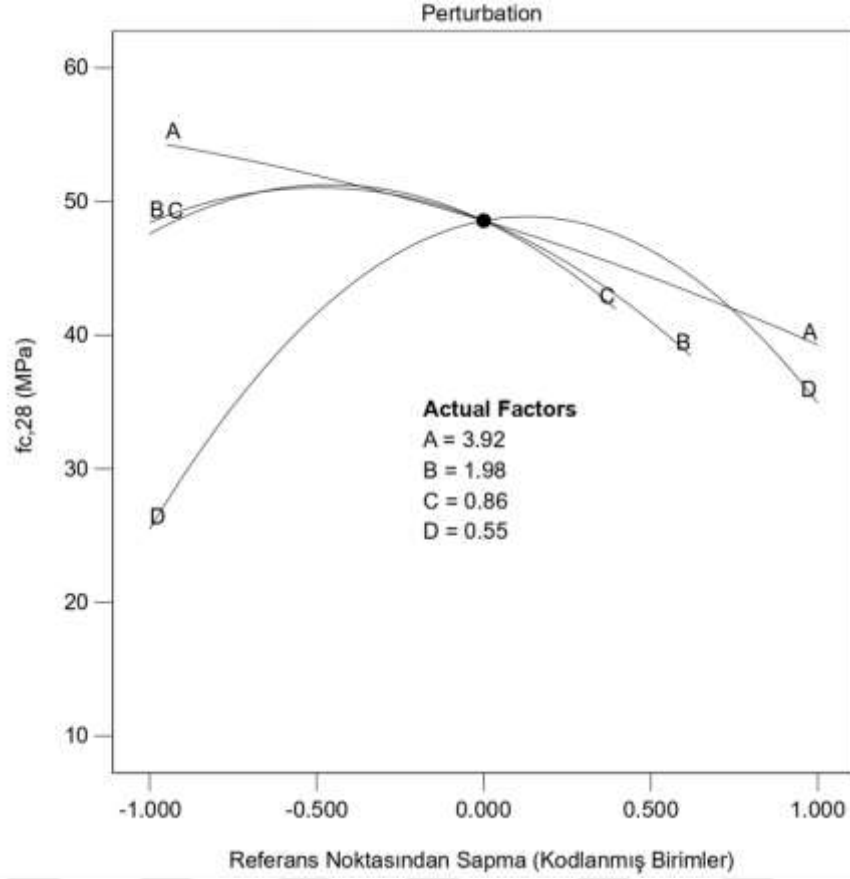
Şekil 5.6. Model-1b'ye ait pertürbasyon grafiği



Şekil 5.7 Model-1c'ye ait iki boyutlu etki grafiği



Şekil 5.8. Model-1c'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi



Şekil 5.9. Model-1c'ye ait pertürbasyon grafiği

MODEL-2: Bu model, sadece mermer tozu ile üretilmiş ancak agrega granülometrisinin etkisi dikkate alınmış ilk adım deney sonuçları kullanılarak elde edilmiştir. Model-1a; çökme değerini, Model-1b; 7 günlük beton basınç dayanımını ve Model-1c ise 28 günlük beton dayanımını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Bu modellerde, çökme ve basınç değerleri tepki (yanıt) değerleridir. Agrega/Çimento oranı (A/Ç), iri agrega/ince agrega oranı (iri/ince), mermer tozu/çimento oranı (MT/Ç) ve su/çimento oranı (S/Ç) ise faktörler olarak belirlenmiştir. Bu faktörlerin seçilmelerinin nedeni; tepkiler üzerinde bu faktörlerin önemli etkilere sahip olmalarıdır.

Model-1a, Model-1b ve Model-1c için belirlenen faktörler aynıdır ve Tablo 5.1'de tanımlanmıştır. Su/çimento oranı (S/Ç); A, Agrega/Çimento oranı (A/Ç); B, iri agrega/ince agrega oranı (iri/ince); C ve mermer tozu/çimento oranı (MT/Ç); D olarak sembolize edilmiştir. Bu değişkenlerin sayısal değerlerinin aralıkları da Tablo 5.4'de sunulmuştur.

Modelin ANOVA sonuçları ise Tablo 5.5'de verilmiştir. p-değerinin 0.0001'den küçük olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu göstermektedir. İlaveten, R^2 değerleri, modelin doğruluğu hakkında fikir vermektedirler. Tablo 5.6'de matematiksel modellere ait katsayılar verilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak, modelin tahmin ettiği tepki değerlerine rahatça ulaşılabilir.

Model terimlerinin p-değerleri aynen modelin kendisinde olduğu gibi terimin anlam ve değerini ifade eder. p-değerlerinden model terimlerinin anlamlı ve kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de sırasıyla faktörlerin çökme değeri üzerindeki etkisi iki ve üç boyutlu grafiklerde görülmektedir. Şekil 5.11’de yüzey tepkisi açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.12’de pertürbasyon grafiği yardımıyla çökme değeri ile Agregat/Çimento oranı (A/Ç), iri agregat/ince agregat oranı (iri/ince), mermer tozu/çimento oranı (MT/Ç) ve su/çimento oranı (S/Ç) arasındaki ilişki rahatlıkla anlaşılmaktadır. Ayrıca Model-2b’ye ait grafikler Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de paylaşılmıştır. Ayrıca Model-2c’ye ait analizlerin grafikleri ise Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Değişkenler ve değişim aralıkları

Semboller		Değişim aralığı		
Gerçek	Kod	-1	0	+1
S/Ç	A	0.47	0.51	0.55
A/Ç	B	3.50	4.60	5.70
T/Ç	C	0.00	0.075	0.15
MT/Ç	D	0.00	0.21	0.42
UK/Ç	E	0.00	0.15	0.30

Tablo 5.5. Varyans analizlerinin (ANOVA) sonuçları

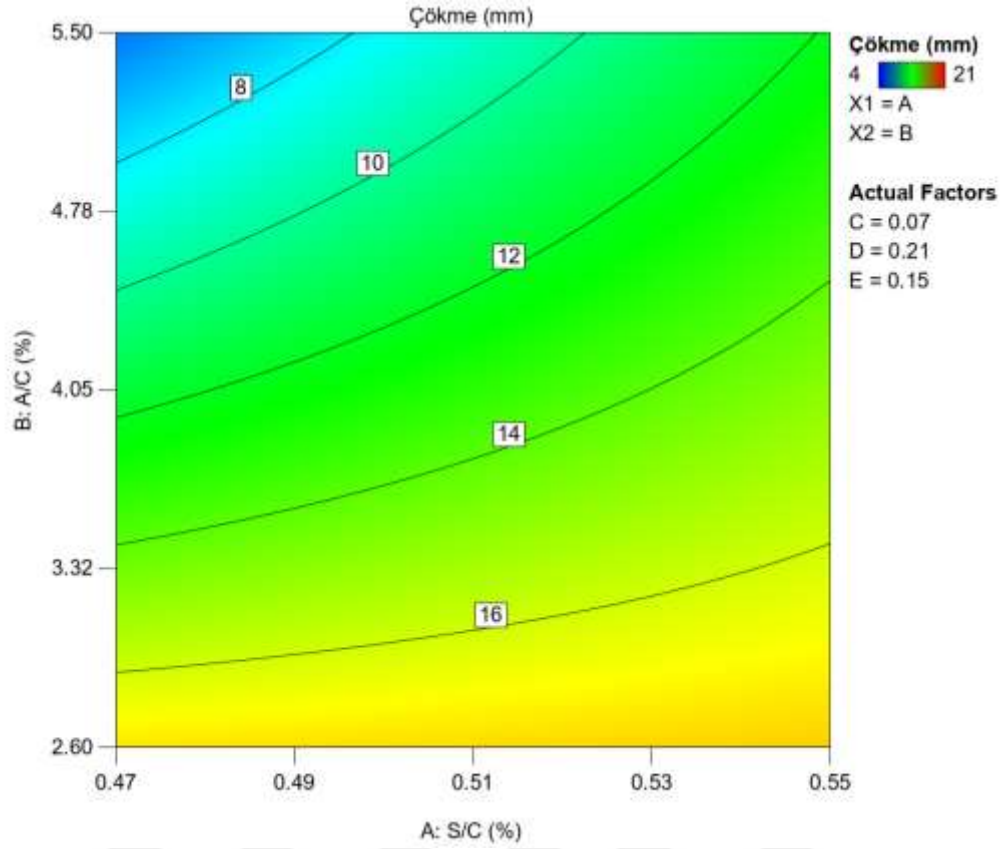
Modelin yanıtı	R ²	F-değeri	Modelin p-değeri
Çökme değeri (mm)	0.97	90.28	<0.0001
3 günlük basınç dayanımı (MPa)	0.97	81.66	<0.0001
7 günlük basınç dayanımı (MPa)	0.99	252.92	<0.0001
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	0.99	45.44	<0.0001
90 günlük basınç dayanımı (MPa)	0.98	101.62	<0.0001

Tablo 5.6. Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları

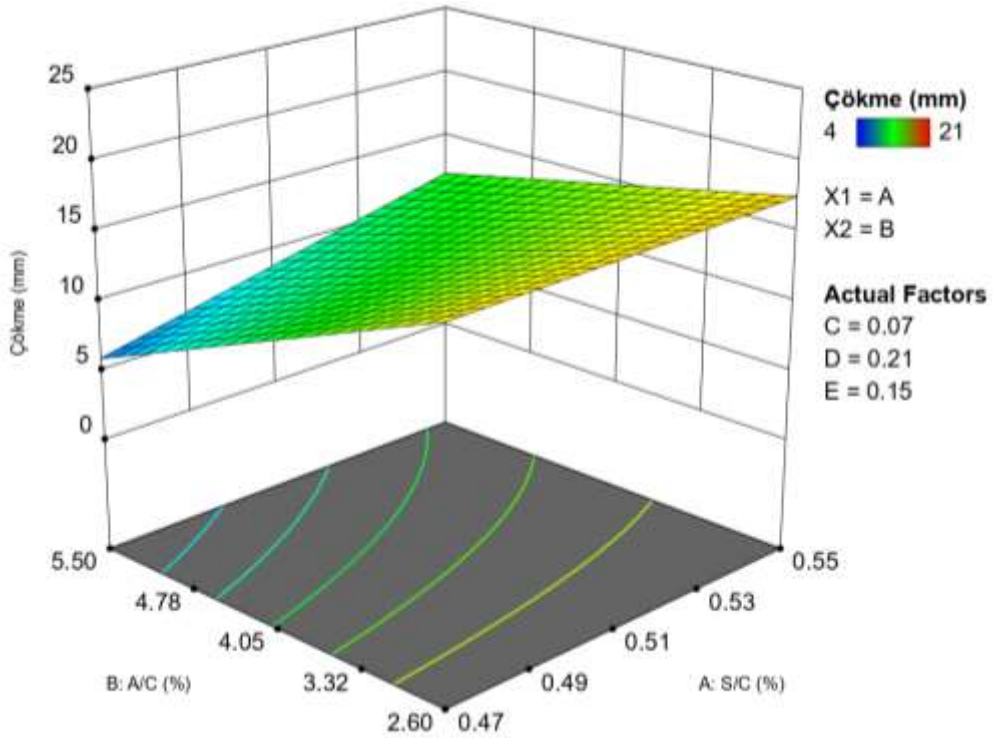
Modelin terimleri	Model-2a (Çökme değeri)		Model-2b 3 günlük Basınç dayanımı		Model-2c 7 günlük Basınç dayanımı	
	Katsayı	p-değeri	Katsayı	p-değeri	Katsayı	p-değeri
A-S/C	-73.98	0.91	2236.36	0.31	1647.29	0.1637
B-A/Ç	-16.25	0.97	-128.44	0.012	250.05	0.0351
C-T/Ç	-194.58	0.66	-351.14	<0.0001	-1346.71	<0.0001
D-MT/Ç	-109.21	0.63	-99.48	0.25	-477.60	0.0005
E-UK/Ç	175.49	0.85	-154.55	0.16	1324.46	<0.0001
AB	24.91	0.99	341.65	0.0019	-735.86	0.3052
AC	383.96	0.91	834.31	0.0007	1204.31	0.3496
AD	194.17	0.87	281.99	0.0034	483.61	0.3554
AE	-371.08	0.90	405.63	0.0026	-2413.36	0.0515
BC	-7.19	0.64	-25.67	0.0009	86.27	0.0402
BD	-1.05	0.83	-9.63	0.0020	42.55	0.0168
BE	9.61	0.17	-11.26	0.0047	12.41	0.7235
CD	-81.03	0.007	-6.85	0.3404	188.51	0.0002
CE	-55.98	0.028	-15.21	0.1676	201.44	0.0144
DE	2.29	0.76	-12.34	0.0029	2.75	0.9248
A ²	-	-	-3747.78	0.0076	1288.94	0.8916
B ²	-	-	-5.37	0.0020	15.40	0.1618
C ²	-	-	82.79	0.0002	597.08	<0.0001
D ²	-	-	-10.37	<0.0001	23.18	0.0965
E ²	-	-	-17.91	<0.0001	-86.78	0.0170
sabit	68.49	-	-260.88	-	-874.29	-

Tablo 5.7. Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları

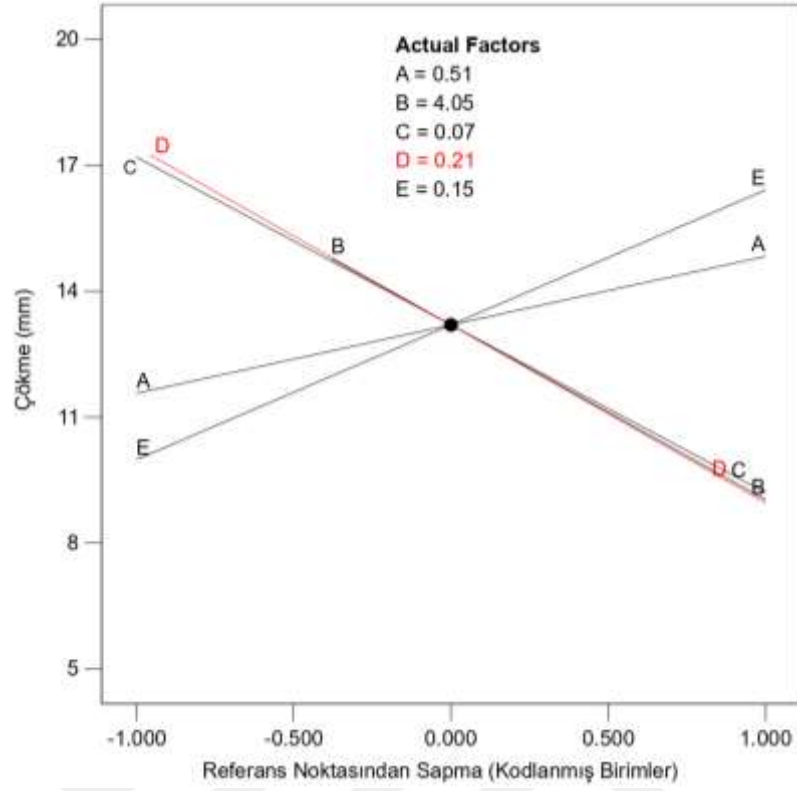
Modelin terimleri	Model-2d 28 günlük Basınç dayanımı		Model-2e 90 günlük Basınç dayanımı	
	Katsayı	p-değeri	Katsayı	p-değeri
A-S/Ç	2831.50	0.3359	1687.28	0.2513
B-A/C	104.35	0.4451	37.58	0.4493
C-T/C	-677.34	0.3109	710.41	<0.0001
D-MT/Ç	4.89	0.7845	204.25	0.2074
E-UK/Ç	547.99	0.3878	278.23	0.0009
AB	-358.86	0.7696	-151.68	0.8737
AC	46.20	0.9958	-3103.59	0.1569
AD	-104.58	0.9731	-571.63	0.5121
AE	-1210.10	0.7915	-586.62	0.6263
BC	73.20	0.6912	138.67	0.0401
BD	13.79	0.8349	22.18	0.4113
BE	30.99	0.7508	13.03	0.7066
CD	99.79	0.7382	223.15	0.0020
CE	256.38	0.0775	256.42	0.0190
DE	-11.52	0.8195	-8.08	0.8276
A ²	-1414.36	0.9307	-872.83	0.9506
B ²	9.59	0.6204	3.91	0.7875
C ²	920.73	0.0223	590.9	0.0017
D ²	5.08	0.9335	-9.08	0.6627
E ²	-20.17	0.8359	37.19	0.3045
sabit	-865.96	-	-480.13	-



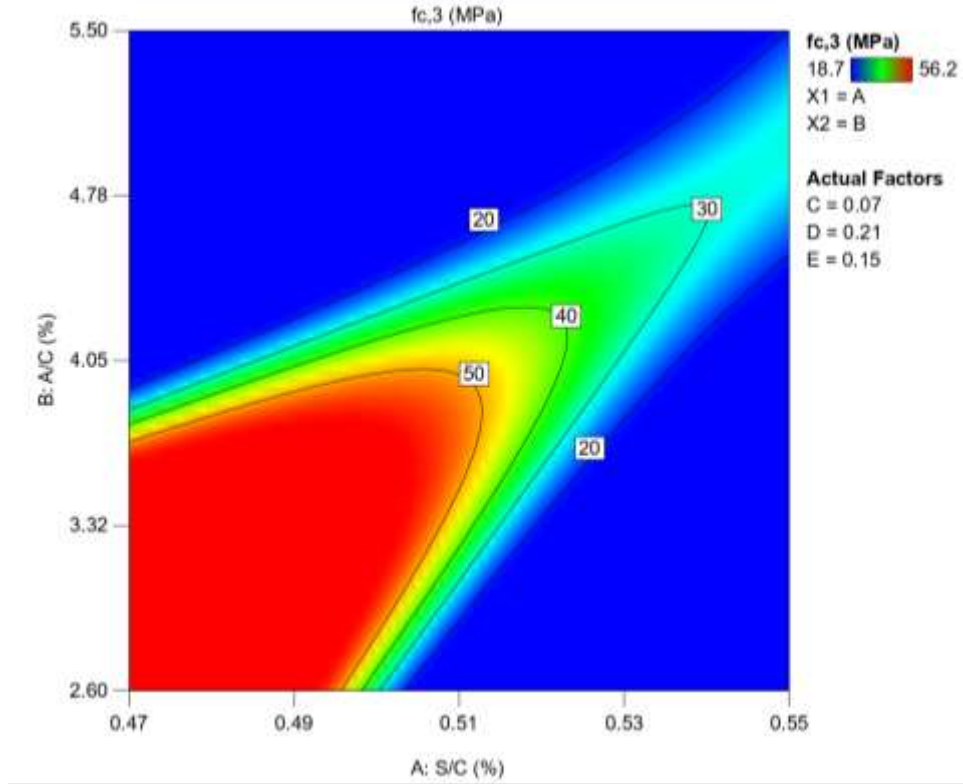
Şekil 5.10. Model-2a'ya ait iki boyutlu etki grafiği



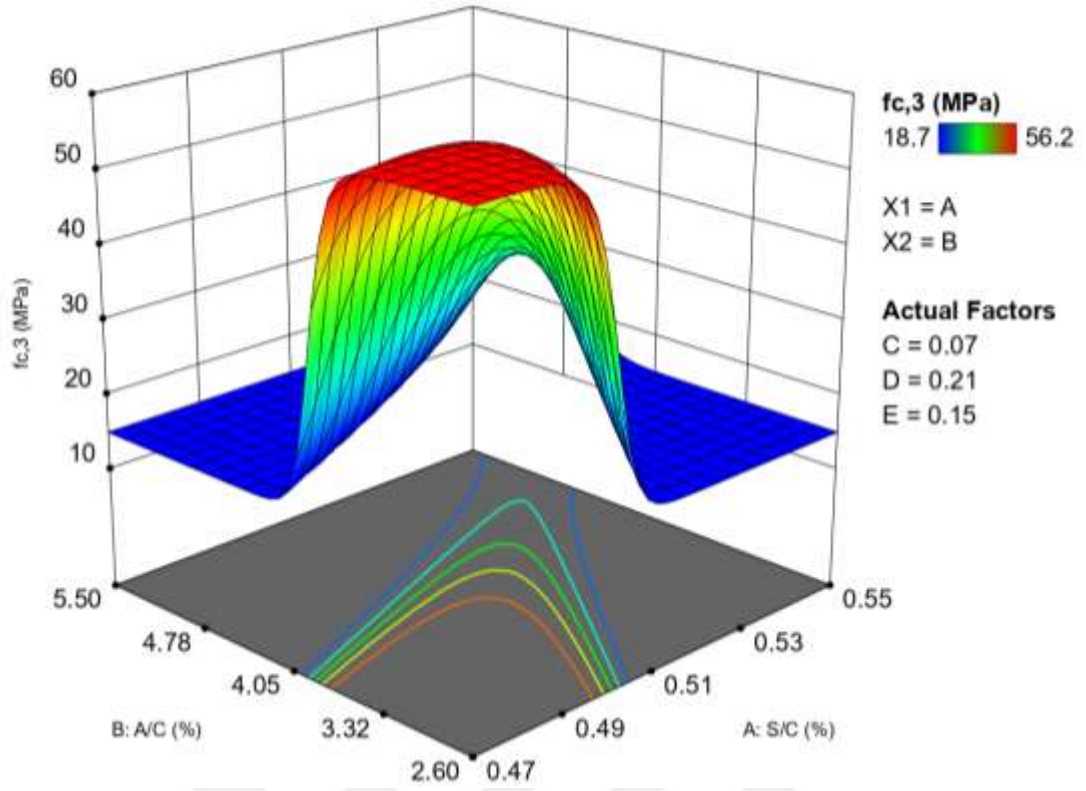
Şekil 5.11. Model-2a'ya ait üç boyutlu yüzey tepkisi



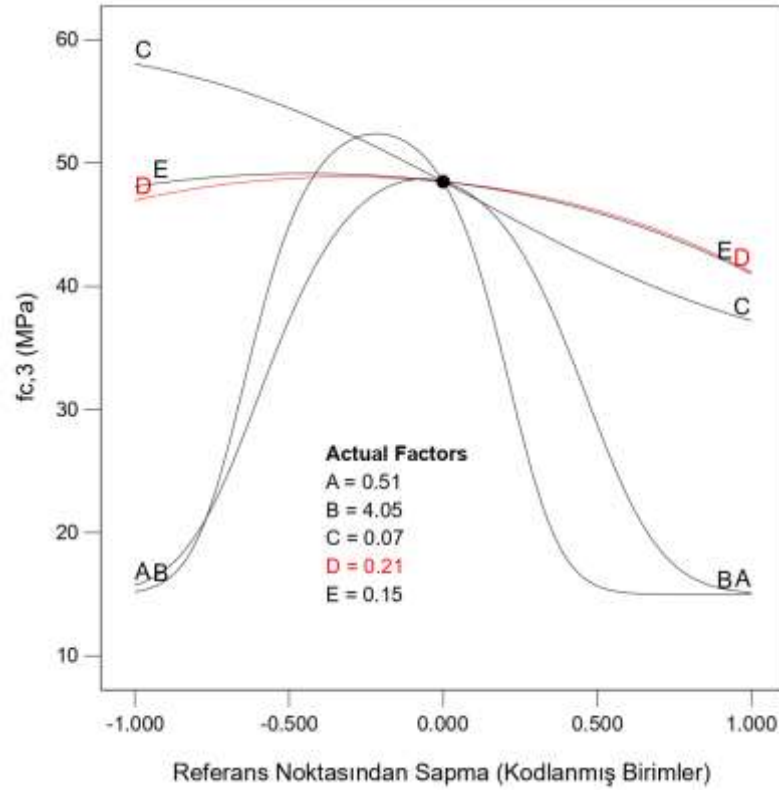
Şekil 5.12. Model-2a'ya ait pertürbasyon grafiği



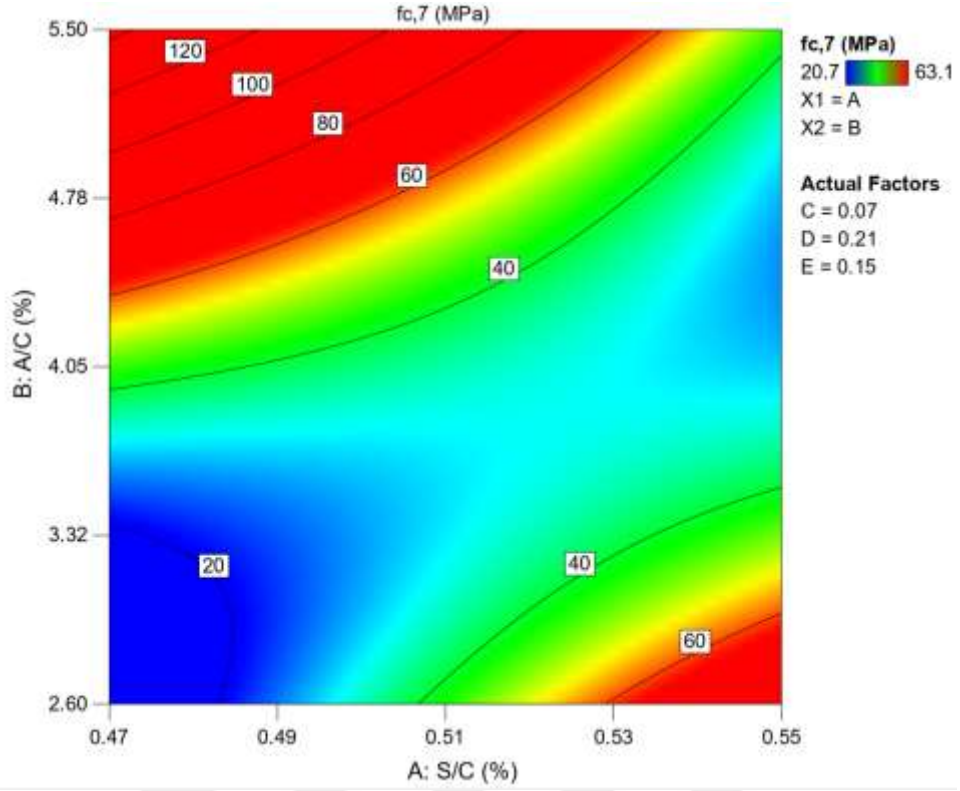
Şekil 5.13. Model-2b'ye ait iki boyutlu etki grafiği



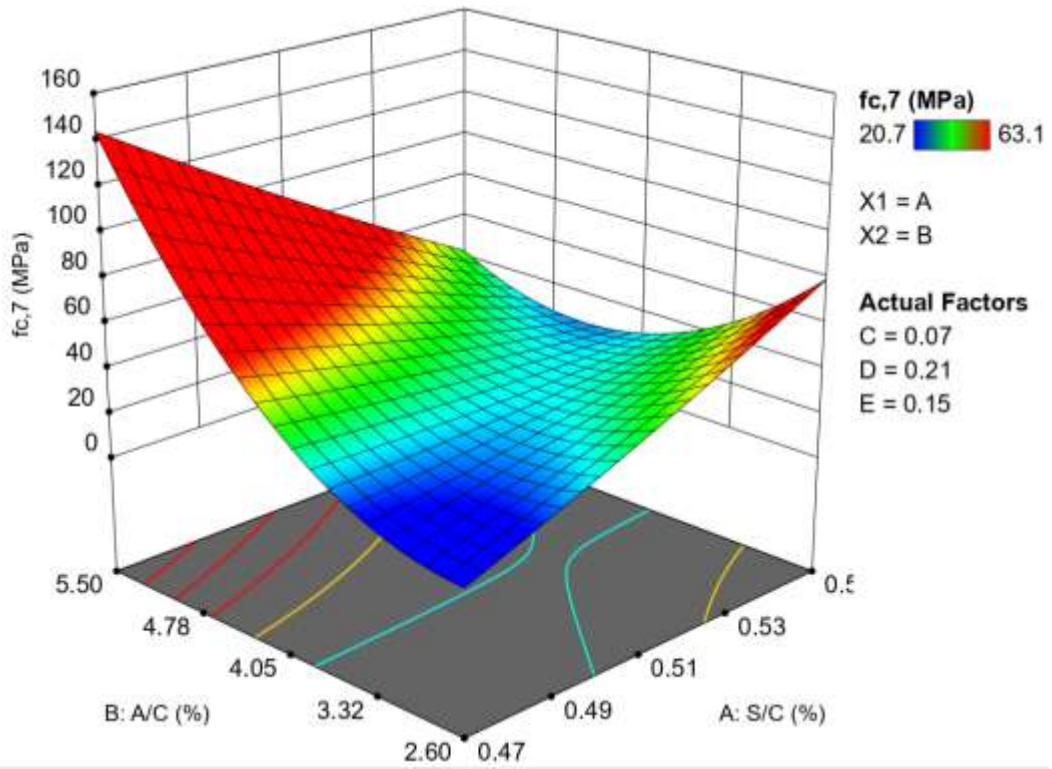
Şekil 5.14. Model-2b'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi



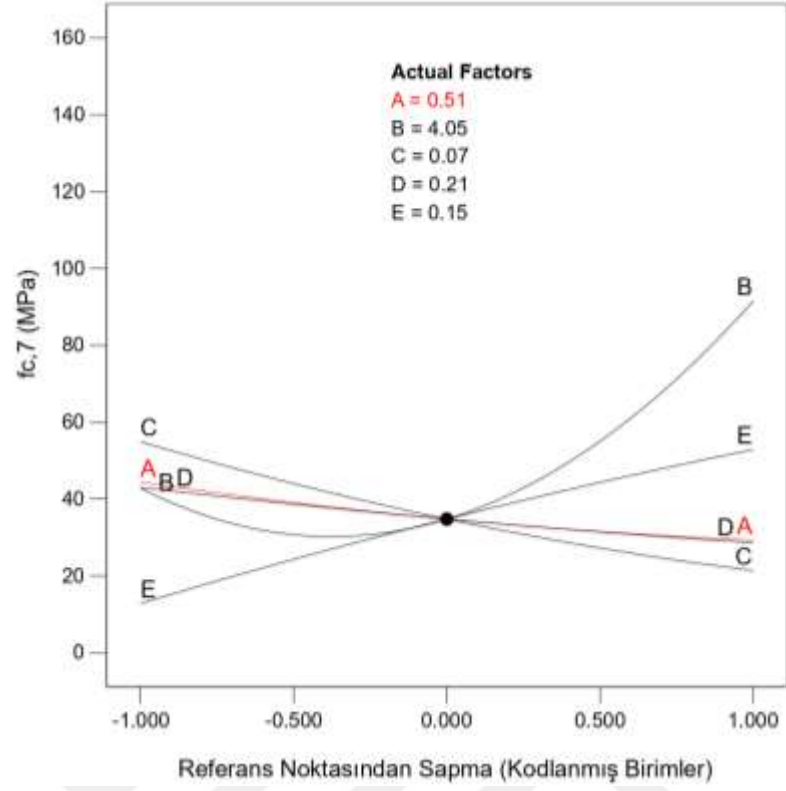
Şekil 5.15. Model-2b'ye ait pertürbasyon grafiği



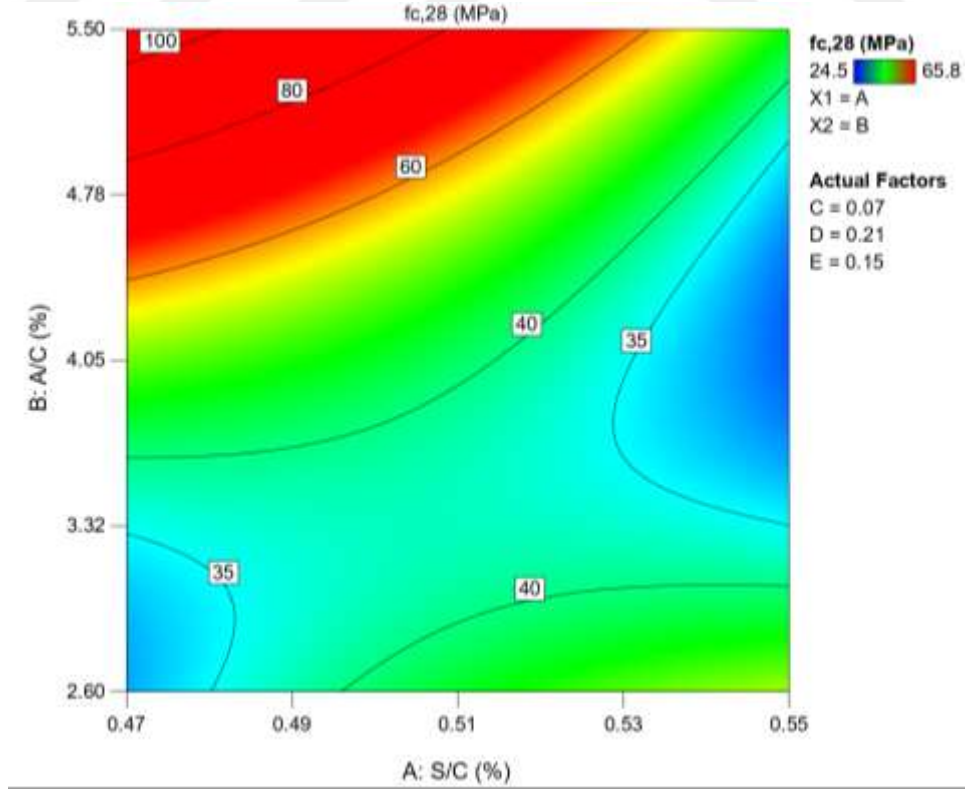
Şekil 5.16. Model-2c'ye ait iki boyutlu etki grafiği



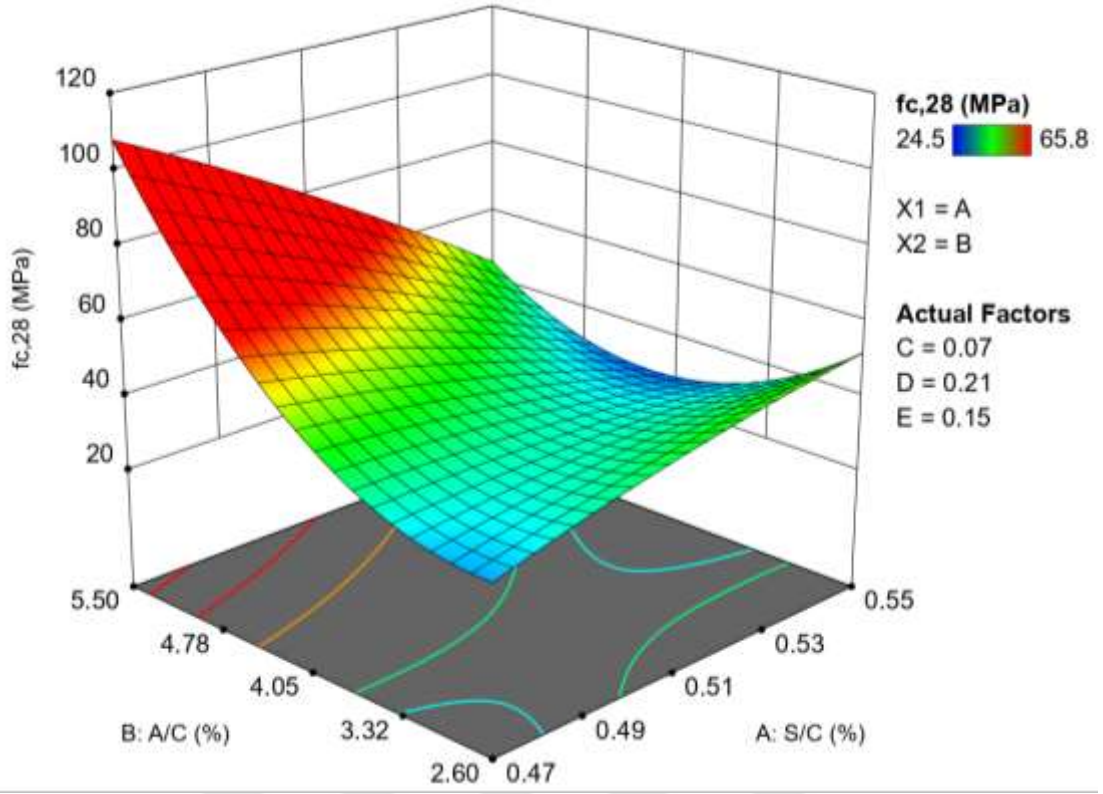
Şekil 5.17. Model-2c'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi



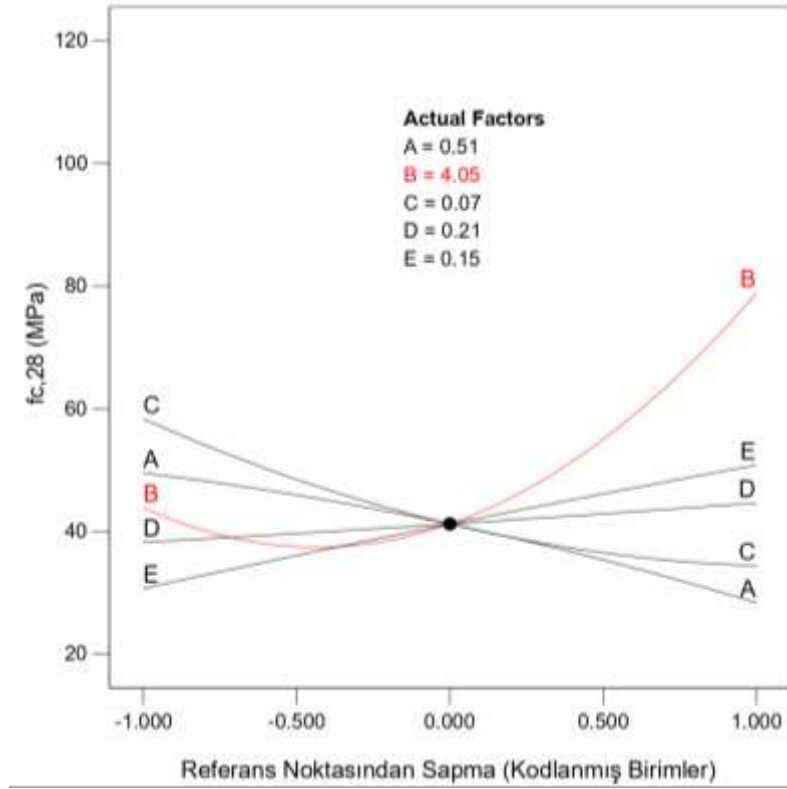
Şekil 5.18 Model-2c'ye ait pertürbasyon grafiği



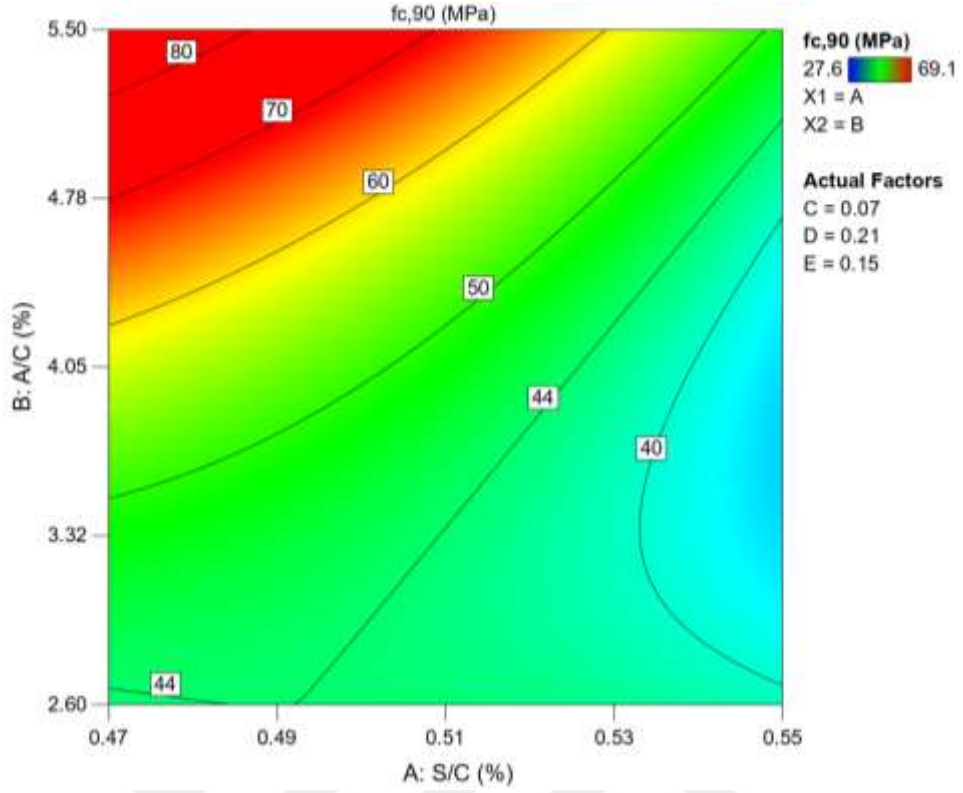
Şekil 5.19 Model-2d'ye ait iki boyutlu etki grafiği



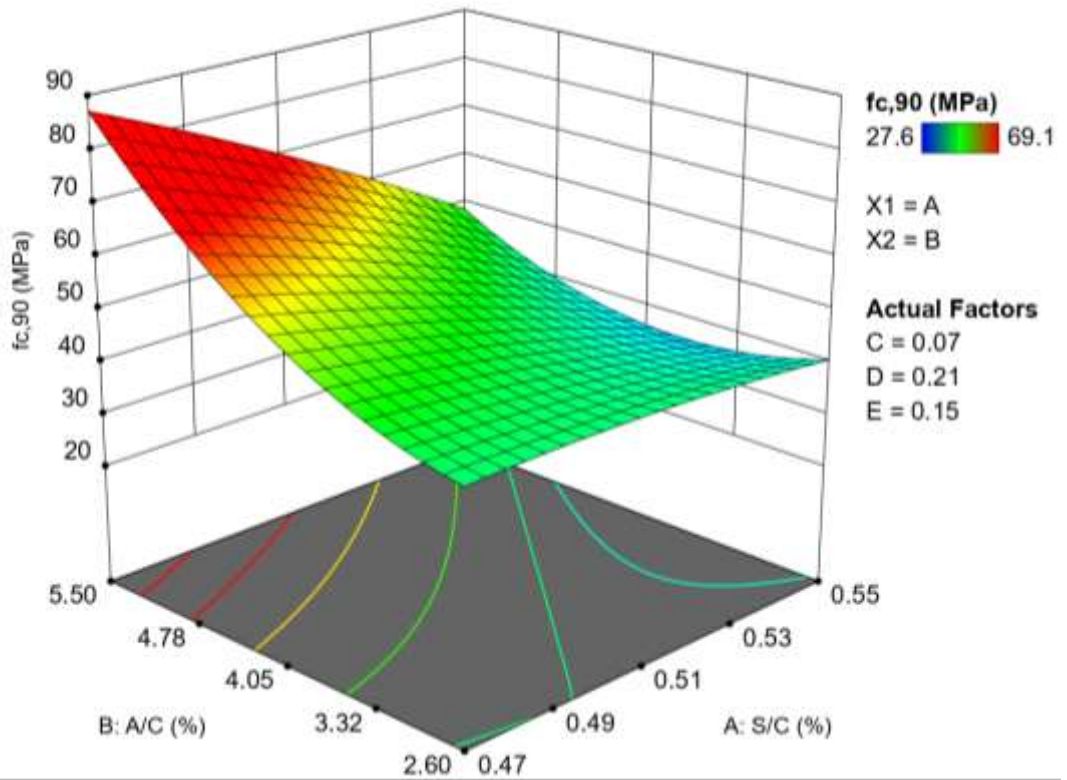
Şekil 5.20 Model-2d'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi



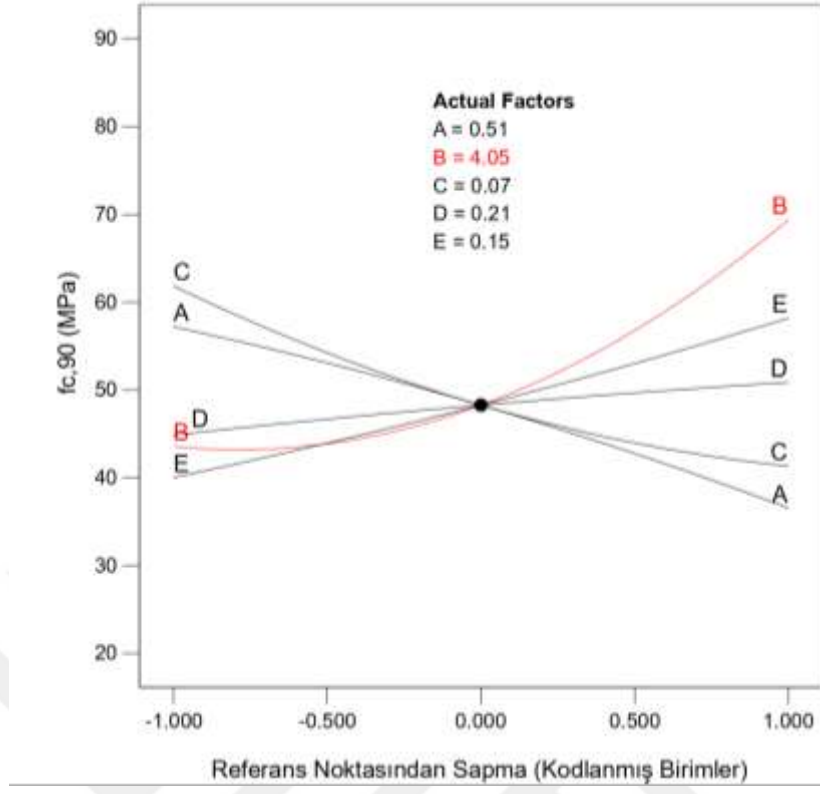
Şekil 5.21 Model-2d'ye ait pertürbasyon grafiği



Şekil 5.22 Model-2e'ye ait iki boyutlu etki grafiği



Şekil 5.23 Model-2e'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi



Şekil 5.24 Model-2e'ye ait pertürbasyon grafiği

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında farklı karışımlara sahip ve farklı atık malzemeler ile çevre dostu betonların üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla iki ana adımda deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Birinci adımda, sadece atık mermer tozu kullanılarak farklı granülometrilere sahip beton karışımlar üretilmiştir. İkinci adımda ise mermer tozu, atık lastik agregası ve uçucu kül kullanılarak çevre dostu betonlar üretilmiştir. Tüm deneylere ait sonuçlar tepki yüzeyi metodu kullanılarak analiz edilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Birinci adım deneyler sonucunda çevre dostu beton üretiminde agregası granülometrisinin oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Agregası granülometrisinin doğru seçilmesi betonda maksimum atık malzeme kullanım miktarının tespit edilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır.

İkinci adım deneyler sonucunda hem mermer tozu hem de lastik agregası kullanılarak çevre dostu beton üretiminin mümkün olduğu belirlenmiştir. Hatta bu betona uçucu kül ilavesi de yapılarak üç tip atık malzeme kullanılarak da çevre dostu beton üretiminin mümkün olduğu tespit edilmiştir.

Birinci adım deneylerde çevre dostu betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerine birçok parametrenin etkili olduğu görülmüştür. Bu parametreler S/Ç oranı, agregası/çimento oranı iri/ince agregası oranı ve atık malzeme/çimento oranı değerleridir. Bu parametrelerin çoklu etkisinin hesabı tepki yüzeyi metodu ile yapılmış ve çevre dostu betonun karışım hesaplarının yapılabilmesi için Model-1 isimli matematiksel model geliştirilmiştir.

Model-1 başlığı altında geliştirilen, Model-1a, Model-1b ve Model-1c'ye ait denklemler kullanılarak sırasıyla çökme değeri, 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri başarı ile tahmin edilebilmektedir.

Benzer şekilde ikinci adım deneylerde de çevre dostu betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerine birçok parametrenin etkili olduğu görülmüştür. Bu parametreler S/Ç oranı, agregası/çimento oranı iri/ince agregası oranı ve atık malzeme/çimento oranı değerleridir. Bu parametrelerin çoklu etkisinin hesabı tepki yüzeyi metodu ile yapılmış ve çevre dostu betonun karışım hesaplarının yapılabilmesi için Model-2 isimli matematiksel model geliştirilmiştir.

Model-2 başlığı altında geliştirilen, Model-2a, Model-2b, Model-2c, Model-2d ve Model-2e'ye ait denklemler kullanılarak sırasıyla çökme değeri, 3 günlük, 7 günlük, 28 günlük ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri başarı ile tahmin edilebilmektedir.

Bu tez çalışmasının en önemli sonuçlarından biride çevre dostu beton teknolojisinin yaygınlaşmasına sunacağı katkıdır. Çevre dostu beton teknolojisinin yaygınlaşmasının önündeki en önemli engellerden biride literatürde pratik ve yüksek doğruluklu karışım hesap metodlarının olmamasıdır. Model-1 ve Model-2'de geliştirilen denklemler yardımıyla farklı karışım oranlarına

sahip çevre dostu betonların bileşiminde yer alan malzemelerin miktarları rahatça ve hızlı bir şekilde hesaplanabilecektir.

Model-1 ve Model-2 çökme ve basınç dayanımı değerlerinin tahmininin yanında atık malzeme kullanım miktarının pratik bir şekilde optimize edilmesini de sağlayacaklardır. Böylece hedeflenen taze ve sertleşmiş özelliklere sahip çevre dostu betonlarda kullanılabilecek maksimum atık malzeme miktarı doğru bir şekilde belirlenecektir.

Bu çalışmada geliştirilen ve önerilen modeller en büyük agrega çapı 16 mm, çimento dozajı ise 300-500 kg/m³ beton karışımları için geçerlidir. İlerleyen çalışmalarda farklı en büyük agrega çapı ve farklı çimento miktarları için yeni modellerin geliştirilmesi literatür için önemli bir katkı olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] Müdürü, Y. İ.; Erginbay, Z.; Göksoy, A. (n.d.). 8 15 Nisan 2003 TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Adına Sahibi Taner YÜZGEÇ
- [2] Marinković, S.; Dragaš, J.; Ignjatović, I.; Tošić, N. (2017). Environmental assessment of green concretes for structural use, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 154, 633–649. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.015
- [3] Sivakrishna, A.; Adesina, A.; Awoyera, P. O.; Rajesh Kumar, K. (2019). Green concrete: A review of recent developments, *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2019.08.202
- [4] Karimaei, M.; Dabbaghi, F.; Sadeghi-Nik, A.; Dehestani, M. (2020). Mechanical performance of green concrete produced with untreated coal waste aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol. 233. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117264
- [5] Wang, Y.; Tan, Y.; Wang, Y.; Liu, C. (2020). Mechanical properties and chloride permeability of green concrete mixed with fly ash and coal gangue, *Construction and Building Materials*, Vol. 233. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117166
- [6] Baikerikar, A. (2014). *A Review on Green Concrete* (Vol. 1)
- [7] Sagoe-Crentsil, K. K.; Brown, T.; Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 5, 707–712. doi:10.1016/S0008-8846(00)00476-2
- [8] Assi, L.; Carter, K.; Deaver, E. (Eddie); Anay, R.; Ziehl, P. (2018). Sustainable concrete: Building a greener future, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 198, 1641–1651. doi:10.1016/j.jclepro.2018.07.123
- [9] Kırgız, M. S. (2016). Fresh and hardened properties of green binder concrete containing marble powder and brick powder, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 20, No. sup1, s64–s101. doi:10.1080/19648189.2016.1246692
- [10] Alyamac, K. E.; Ghafari, E.; Ince, R. (2017). Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 144, 192–202. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.156
- [11] Mashaly, A. O.; El-Kaliouby, B. A.; Shalaby, B. N.; El-Gohary, A. M.; Rashwan, M. A. (2016). Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, 731–741. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.023
- [12] Alyamaç, K. E.; Aydın, A. B. (2015). Concrete properties containing fine aggregate marble powder, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 7, 2208–2216. doi:10.1007/s12205-015-0327-y
- [13] Galetakis, M.; Soultana, A. (2016, January 15). A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 769–781. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.204
- [14] Rodriguez de Sensale, G.; Rodriguez Viacava, I.; Aguado, A. (2016). Simple and Rational Methodology for the Formulation of Self-Compacting Concrete Mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 2, 04015116. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001375
- [15] Rashad, A. M. (2016). A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Elsevier B.V., 46–82. doi:10.1016/j.ijsbe.2015.11.003
- [16] Emiroğlu, M.; Yıldız, S.; Özgan, E. (2009). Lastik agregalı betonlarda elastisite modülünün deneysel ve teorik olarak incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. doi:10.17341/gummfd.76777
- [17] Koçak, Y.; Alpaslan, L. (2015). Yüksek Fırın Cürufu ve Atık Lastik Tozu İkameli Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri
- [18] Topçu, B.; Demmr, A. (2007). Atık lastik ve uçucu küllü harçların özellikleri, *Eng&Arch.Fac.*

- [19] Li, N.; Long, G.; Ma, C.; Fu, Q.; Zeng, X.; Ma, K.; Xie, Y.; Luo, B. (2019). Properties of self-compacting concrete (SCC) with recycled tire rubber aggregate: A comprehensive study, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 236. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117707
- [20] (PDF) Green Concrete – An Emerging Trend in India. (n.d.), from https://www.researchgate.net/publication/316432326_Green_Concrete_-_An_Emerging_Trend_in_India, accessed 18-12-2019
- [21] Hameed, M. S.; Sekar, A. S. S. (2009). Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate, Vol. 4, No. 4
- [22] Błaszczynski, T.; Król, M. (2015). Usage of Green Concrete Technology in Civil Engineering, *Procedia Engineering*, Vol. 122, 296–301. doi:10.1016/j.proeng.2015.10.039
- [23] Düşük maliyetli ve çevre dostu çimento üretmek mümkün mü? | Euronews. (n.d.), from <https://tr.euronews.com/2018/10/08/dusuk-maliyetli-ve-cevre-dostu-cimento-uretmek-mumkun-mu>, accessed 20-6-2019
- [24] Vishwakarma, V.; Ramachandran, D. (2018, February 20). Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A review, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 96–103. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.174
- [25] (PDF) A Review on Green Concrete. (n.d.), from https://www.researchgate.net/publication/281774385_A_Review_on_Green_Concrete, accessed 18-12-2019
- [26] Imbabi, M. S.; Carrigan, C.; McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Elsevier B.V., 194–216. doi:10.1016/j.ijse.2013.05.001
- [27] Liew, K. M.; Sojobi, A. O.; Zhang, L. W. (2017). Green concrete: Prospects and challenges, *Construction and Building Materials*, Vol. 156, 1063–1095. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.008
- [28] Marinković, S.; Radonjanin, V.; Malešev, M.; Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, *Waste Management*, Vol. 30, No. 11, 2255–2264. doi:10.1016/j.wasman.2010.04.012
- [29] Singh, N.; Mithulraj, M.; Arya, S. (2018, November 1). Influence of coal bottom ash as fine aggregates replacement on various properties of concretes: A review, *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier B.V., 257–271. doi:10.1016/j.resconrec.2018.07.025
- [30] Domingo-Cabo, A.; Lázaro, C.; López-Gayarre, F.; Serrano-López, M. A.; Serna, P.; Castaño-Tabares, J. O. (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 7, 2545–2553. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018
- [31] Radonjanin, V.; Malešev, M.; Marinković, S.; Al Malt, A. E. S. (2013). Green recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.076
- [32] Demirel, S.; Bölüm, Ç.; Fakültesi, M.; Ömer Halisdemir Üniversitesi, N.; Mühendisliği Bölümü, İ.; Geliş, T. (2019). Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, Vol. 8, No. 1, 1–8. doi:10.28948/ngumuh.516780
- [33] Bilimleri Enstitüsü, Fen; Danışman, T.; Aygül Yeprem, D. H. (2010). *Yıldız Teknik Üniversitesi Mermer tozu atıklarının yapı malzemesi üretiminde kullanımı Metalurji ve Malzeme Müh. Nursev Bilgin FBE Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı Malzeme Programında Hazırlanan Yüksek Lisans Tezi*
- [34] Xue, J.; Shinozuka, M. (2013). Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability, *Construction and Building Materials*, Vol. 42, 196–204. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.01.005
- [35] Venkatarama Reddy, B. V.; Jagadish, K. S. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies, *Energy and Buildings*, Vol. 35, No. 2, 129–137. doi:10.1016/S0378-7788(01)00141-4

- [36] Damtoft, J. S.; Lukasik, J.; Herfort, D.; Sorrentino, D.; Gartner, E. M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 2, 115–127. doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.008
- [37] Noushini, A.; Aslani, F.; Castel, A.; Gilbert, R. I.; Uy, B.; Foster, S. (2016). Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 73, 136–146. doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.07.004
- [38] Bilodeau, A.; Mohan Malhotra, V. (2000). High-volume fly ash system: Concrete solution for sustainable development, *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 1, 41–48. doi:10.14359/804
- [39] Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, A. (2011). Long-term behaviour of reinforced-concrete beams and columns made of recycled aggregate concrete, *Fib Symposium Prague 2011: Concrete Engineering for Excellence and Efficiency, Proceedings* (Vol. 1), Czech Concrete Society, 479–482
- [40] García-Segura, T.; Yepes, V.; Alcalá, J. (2014). Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 19, No. 1, 3–12. doi:10.1007/s11367-013-0614-0
- [41] Coşgun, N.; Esin, T. (n.d.). Hazır Beton Üretiminin “Çevresel Etkiler” Açısından Değerlendirilmesi
- [42] Çetin, T. (n.d.). Türkiye Mermer Potansiyeli, Üretimi ve İhracatı Marble Potential, Production and Export of Turkey
- [43] Yavuz, M. (2003). *Dekoratif Doğal Yapı Taşlarının Kullanım Alanları Ve Çeşitleri Types and Usage Areas of the Decorative Natural Building Stones*, Cilt (Vol. 42)
- [44] Ulubeyli, G. C.; Artir, R. (2015). Properties of Hardened Concrete Produced by Waste Marble Powder, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 195, 2181–2190. doi:10.1016/j.sbspro.2015.06.294
- [45] Bilgin, M.; Çakır, E. (1998). Marble Research
- [46] Prof. Dr. Taşlıgil, N.; Şahin, G. (n.d.). Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Türkiye Doğal Taşlarının İktisadi Coğrafya Odağında Analizi, Vol. 33, 607–640
- [47] Çevre, M.; Bakanlığı, Ş. (n.d.). Prof. Dr. Mustafa Öztürk Mermer Kesiminden Kaynaklanan Çevre Kirliliği Ve Önlemleri
- [48] Adigüzel, M.; Üyesi, Ö.; Üniversitesi, T.; Fakültesi, İ.; Bölümü, İ.; Ticaret, İ.; Dte, Ü.; Ticaret, U.; Lisans Programı, Y. (n.d.). Türkiye Mermer Sektörünün ve Rekabet Gücünün İncelenmesi Investigation of Turkish Marble Sector and its Competitive Power, *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi Third Sector Social Economic Review*, Vol. 54, No. 3, 1530–1546. doi:10.15659/3.sektor-sosyal-ekonomi.19.09.1202
- [49] Eğitim Fakültesi, G.; Bölümü, İ.; Bilgiler Eğitimi Ana Bilim Dalı Ankara-Türkiye, S. (2003). *Türkiye Mermer Potansiyeli, Üretimi ve İhracatı Marble Potential, Production and Export of Turkey Turhan Çetin, Cilt* (Vol. 23)
- [50] Ünal, O.; Kibici Katü Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü, aşar A. (2001). *Mersem '2001) Bildiriler Kitabı 3-5 MAYIS*
- [51] Uygarlığın köklerinden, geleceğin dünyasına: Mermer. (n.d.), from <http://www.hurriyet.com.tr/paylas/uygarligin-koklerinden-gelecegin-dunyasina-mermer-2188>, accessed 18-12-2019
- [52] Taki GÜLER Arş Gör Ercan POLAT Muğla Büyükşehir Belediyesi, E. (n.d.). *Mermer Madencilğinde Çevresel Yaklaşımlar*
- [53] Alyamaç, K. E. (n.d.). Mermer sektörüne farklı bir bakış, from <http://www.kealyamac.com/mermer-sektorune-farkli-bir-bakis/>, accessed 18-12-2019
- [54] Alyamaç, K. E. (n.d.). Mermer Madencilğinde Çevresel Etkiler, from https://www.researchgate.net/publication/289202150_Mermer_Madenciliginde_Cevresel_Etkiler, accessed 18-12-2019
- [55] Yalçın, S.; Uyanık, T. (2001). *Mersem 2001 Bildiriler Kitabı 3-5 MAYIS*
- [56] *Hindistan Doğal Taş Sektörü Yerinde Pazar Araştırması Hazırlayanlar.* (n.d.)

- [57] Torres, P.; Fernandes, H. R.; Agathopoulos, S.; Tulyaganov, D. U.; Ferreira, J. M. F. (2004). Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, Nos. 10–11, 3177–3185. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2003.10.039
- [58] Ganesh Prabhu, G.; Hyun, J. H.; Kim, Y. Y. (2014). Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production, *Construction and Building Materials*, Vol. 70, 514–521. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.070
- [59] Marras, G.; Careddu, N.; Internicola, C.; Siotto, G. (n.d.). *Recovery And Reuse Of Marble Powder By-Product*
- [60] Ulrik Nilsen, A.; Monteiro, P. J. M. (1993). Concrete: A three phase material, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 1, 147–151. doi:10.1016/0008-8846(93)90145-Y
- [61] Alley, R.; Berntsen, T.; Bindoff, N. L.; Chen, Z.; Chidthaisong, A.; Friedlingstein, P.; Gregory, J.; Hegerl, G.; Heimann, M.; Hewitson, B.; Hoskins, B.; Joos, F.; Jouzel, J.; Kattsov, V.; Lohmann, U.; Manning, M.; Matsuno, T.; Molina, M.; Nicholls, N.; Overpeck, J.; Qin, D.; Raga, G.; Ramaswamy, V.; Ren, J.; Rusticucci, M.; Solomon, S.; Somerville, R.; Stocker, T. F.; Stott, P.; Stouffer, R. J.; Whetton, P.; Wood, R. A.; Wratt, D.; Arblaster, J.; Brasseur, G.; Christensen, J. H.; Denman, K.; Fahey, D. W.; Forster, P.; Jansen, E.; Jones, P. D.; Knutti, R.; Le Treut, H.; Lemke, P.; Meehl, G.; Mote, P.; Randall, D.; Stone, D. A.; Trenberth, K. E.; Willebrand, J.; Zwiers, F. (2007). *Intergovernmental Panel On Climate Change Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers IPCC WGI Fourth Assessment Report*
- [62] Houghton, J. T.; Jenkins, G. J.; Ephraums, J. J. (n.d.). Climate Change
- [63] Klöpffer, W. (1997). Life Cycle Assessment: From the beginning to the current state, *Environmental Science and Pollution Research*, Springer Verlag, 223–228. doi:10.1007/BF02986351
- [64] Yavuz Çelik, M.; Sabah, E. (2008). Geological and technical characterisation of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution, *Journal of Environmental Management*, Vol. 87, No. 1, 106–116. doi:10.1016/j.jenvman.2007.01.004
- [65] Alyamaç, K. E.; Ince, R. (2009). A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 3, 1201–1210. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012
- [66] Soliman, N. M. (2013). *Effect of using Marble Powder in Concrete Mixes on the Behavior and Strength of R.C. Slabs*, *Research Article International Journal of Current Engineering and Technology*
- [67] Corinaldesi, V.; Moriconi, G. (2003). The Influence of Mineral Additions on the Rheology of Self-Compacting Concrete, *Special Publication*, Vol. 217, 227–240. doi:10.14359/12916
- [68] Topçu, I. B.; Bilir, T.; Uygunoğlu, T. (2009). Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 5, 1947–1953. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.007
- [69] Corinaldesi, V.; Moriconi, G.; Naik, T. R. (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 1, 113–117. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013
- [70] Dietrich R.V.; Skinner B.J.; Chichester. (2007). Rocks and rock minerals , *Geological Journal*, Vol. 15, No. 1, 78–78. doi:10.1002/gj.3350150110
- [71] Guru, M. (2005). Effects of Filler Ratio on Mechanical Properties at Marble Powder/Polyester Composites, *JOURNAL OF POLYTECHNIC*, 271–274. doi:10.2339/y2005.v8.n3.p271-274
- [72] Karakuş, A. (2011). Investigating on possible use of Diyarbakir basalt waste in Stone Mastic Asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 8, 3502–3507. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.043
- [73] Akbulut, H.; Güner, C. (2007). Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt

- pavements, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 5, 1921–1930. doi:10.1016/j.buildenv.2006.03.012
- [74] Binici, H.; Shah, T.; Aksogan, O.; Kaplan, H. (2008). Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 208, Nos. 1–3, 299–308. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.12.120
- [75] Hebhoub, H.; Aoun, H.; Belachia, M.; Houari, H.; Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 3, 1167–1171. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037
- [76] Bilgin, N.; Yeprem, H. A.; Arslan, S.; Bilgin, A.; Günay, E.; Maroglu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry, *Construction and Building Materials*, Vol. 29, 449–457. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011
- [77] (PDF) Mermer Madenciliginde Çevresel Etkiler. (n.d.), from https://www.researchgate.net/publication/289202150_Mermer_Madenciliginde_Cevresel_Etkiler, accessed 19-12-2019
- [78] Saboya, F.; Xavier, G. C.; Alexandre, J. (2007). The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 10, 1950–1960. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.029
- [79] Abdel-Shafy, H. I.; Mansour, M. S. M. (2018, December 1). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization, *Egyptian Journal of Petroleum*, Egyptian Petroleum Research Institute, 1275–1290. doi:10.1016/j.ejpe.2018.07.003
- [80] E, A. M.; S, B. E.; L, G. G. (2014). Re-Use Of Granite Sludge In Producing Green Concrete, Vol. 9, No. 12
- [81] Shirule, A.; Rahman, A.; Gupta, R. D. (n.d.). *Partial Replacement Of Cement With Marble Dust Powder*, *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies E-ISSN2249-8974 IJAERS*
- [82] El-Maghraby, A.; El-Kady, M. F. M.; Taha, N. A.; El-Hamied, M. A. A.; Hung, Y. T. (2013). Beneficial reuse of waste products, *Handbook of Environment and Waste Management: Volume 2: Land and Groundwater Pollution Control*, World Scientific Publishing Co., 425–490. doi:10.1142/9789814449175_0006
- [83] Ceylan, H.; Mança, S. (2013). -, *Teknik Bilimler Dergisi*, Vol. 3, No. 2, 21–25
- [84] Eldin, N. N.; Senouci, A. B. (1993). Rubber Tire Particles as Concrete Aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, No. 4, 478–496. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:4(478)
- [85] (PDF) The Use of Scrap Tires in the Construction Sector. (n.d.), from https://www.researchgate.net/publication/337339360_The_Use_of_Scrap_Tires_in_the_Construction_Sector, accessed 19-12-2019
- [86] Epps, J. A.; Quinn, W. J.; Schroeder, R. L.; Admistratioll, H.; Scofield, L. A.; Smith, L. A.; Stuart, K.; Administration, H. (n.d.). *Uses of Recycled Rubber Tires in Highways*
- [87] Huang, Y.; Bird, R. N.; Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52, No. 1, 58–73. doi:10.1016/j.resconrec.2007.02.002
- [88] Li, G.; Stubblefield, M. A.; Garrick, G.; Eggers, J.; Abadie, C.; Huang, B. (2004). Development of waste tire modified concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 12, 2283–2289. doi:10.1016/j.cemconres.2004.04.013
- [89] Raffoul, S.; Garcia, R.; Escolano-Margarit, D.; Guadagnini, M.; Hajirasouliha, I.; Pilakoutas, K. (2017). Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberised concrete in axial compression, *Construction and Building Materials*, Vol. 147, 388–397. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.175
- [90] Thomas, B. S.; Chandra Gupta, R. (2016). Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 113, 86–92. doi:10.1016/j.jclepro.2015.11.019
- [91] Kaewunruen, S.; Li, D.; Chen, Y.; Xiang, Z. (2018). Enhancement of Dynamic Damping in Eco-

- Friendly Railway Concrete Sleepers Using Waste-Tyre Crumb Rubber, *Materials*, Vol. 11, No. 7, 1169. doi:10.3390/ma11071169
- [92] Global Tire Recycling Market Share, Size, Trends Analysis | Forecast 2024. (n.d.), from <https://www.goldsteinresearch.com/report/global-tire-recycling-industry-market-trends-analysis>, accessed 19-12-2019
- [93] U.S. Tire Manufacturers Association | The national trade association for tire manufacturers that make tires in the U.S. (n.d.), from <https://www.ustires.org/>, accessed 19-12-2019
- [94] Interesting statistics on the destination of old tyres in Australia. (n.d.), from <https://www.gdtc6.com/statistics-old-tyres-in-australia/>, accessed 19-12-2019
- [95] Azevedo, F.; Pacheco-Torgal, F.; Jesus, C.; Barroso De Aguiar, J. L.; Camões, A. F. (2012). Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes, *Construction and Building Materials*, Vol. 34, 186–191. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.062
- [96] Siddika, A.; Mamun, M. A. Al; Alyousef, R.; Amran, Y. H. M.; Aslani, F.; Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, Vol. 224, 711–731. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108
- [97] *Ministry of Natural Resources State of the Aggregate Resource in Ontario Study Consolidated Report*. (2010)
- [98] Rebalancing the Load | Publications | Pembina Institute. (n.d.), from <https://www.pembina.org/pub/rebalancing-load>, accessed 19-12-2019
- [99] Chiu, C. Te. (2008). Use of ground tire rubber in asphalt pavements: Field trial and evaluation in Taiwan, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52, No. 3, 522–532. doi:10.1016/j.resconrec.2007.06.006
- [100] Jalal, M.; Nassir, N.; Jalal, H. (2019). Waste tire rubber and pozzolans in concrete: A trade-off between cleaner production and mechanical properties in a greener concrete, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 238, 117882. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117882
- [101] Khaloo, A. R.; Dehestani, M.; Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles, *Waste Management*, Vol. 28, No. 12, 2472–2482. doi:10.1016/j.wasman.2008.01.015
- [102] Home - ETRMA. (n.d.), from <https://www.etrma.org/>, accessed 19-12-2019
- [103] *About the U.S. Tire Manufacturers Association*. (n.d.)
- [104] Danon, B.; Görgens, J. (2015). Determining rubber composition of waste tyres using devolatilisation kinetics, *Thermochimica Acta*, Vol. 621, 56–60. doi:10.1016/j.tca.2015.10.008
- [105] Di Mundo, R.; Petrella, A.; Notarnicola, M. (2018). Surface and bulk hydrophobic cement composites by tyre rubber addition, *Construction and Building Materials*, Vol. 172, 176–184. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.233
- [106] Shu, X.; Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview, *Construction and Building Materials*, Vol. 67, No. PART B, 217–224. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027
- [107] Girskas, G.; Nagrockienė, D. (2017). Crushed rubber waste impact of concrete basic properties, *Construction and Building Materials*, Vol. 140, 36–42. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.107
- [108] Snelson, D. G.; Kinuthia, J. M.; Davies, P. A.; Chang, S. R. (2009). Sustainable construction: Composite use of tyres and ash in concrete, *Waste Management*, Vol. 29, No. 1, 360–367. doi:10.1016/j.wasman.2008.06.007
- [109] Pacheco-Torgal, F.; Ding, Y.; Jalali, S. (2012, May). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview, *Construction and Building Materials*, 714–724. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047
- [110] Raffoul, S.; Garcia, R.; Pilakoutas, K.; Guadagnini, M.; Medina, N. F. (2016). Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation, *Construction and Building Materials*, Vol. 124, 391–404. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.054

- [111] Reda Taha, M. M.; El-Dieb, A. S.; Abd El-Wahab, M. A.; Abdel-Hameed, M. E. (2008). Mechanical, Fracture, and Microstructural Investigations of Rubber Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 10, 640–649. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:10(640)
- [112] Záleská, M.; Pavlík, Z.; Čítek, D.; Jankovský, O.; Pavlíková, M. (2019). Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate – Properties and thermal stability, *Construction and Building Materials*, Vol. 225, 709–722. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.168
- [113] Thomas, B. S.; Gupta, R. C.; Panicker, V. J. (2016). Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: Durability-related performance, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, 504–513. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.046
- [114] Park, Y.; Abolmaali, A.; Mohammadagha, M.; Lee, S. (2015). Structural performance of dry-cast rubberized concrete pipes with steel and synthetic fibers, *Construction and Building Materials*, Vol. 77, 218–226. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.061
- [115] Gheni, A. A.; Alghazali, H. H.; ElGawady, M. A.; Myers, J. J.; Feys, D. (2019). Durability properties of cleaner cement mortar with by-products of tire recycling, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 213, 1135–1146. doi:10.1016/j.jclepro.2018.12.260
- [116] Medina, N. F.; Medina, D. F.; Hernández-Olivares, F.; Navacerrada, M. A. (2017). Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling, *Construction and Building Materials*, Vol. 144, 563–573. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196
- [117] Li, Y.; Zhang, S.; Wang, R.; Dang, F. (2019). Potential use of waste tire rubber as aggregate in cement concrete – A comprehensive review, *Construction and Building Materials*, Vol. 225, 1183–1201. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.198
- [118] Rashad, A. M. (2015). A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Elsevier B.V., 278–306. doi:10.1016/j.ijjsbe.2015.10.002
- [119] Yao, Z. T.; Ji, X. S.; Sarker, P. K.; Tang, J. H.; Ge, L. Q.; Xia, M. S.; Xi, Y. Q. (2015, February 1). A comprehensive review on the applications of coal fly ash, *Earth-Science Reviews*, Elsevier, 105–121. doi:10.1016/j.earscirev.2014.11.016
- [120] Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A.; Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 6, 1204–1209. doi:10.1016/j.cemconres.2004.08.021
- [121] Tang, S. W.; Cai, X. H.; He, Z.; Shao, H. Y.; Li, Z. J.; Chen, E. (2016). Hydration process of fly ash blended cement pastes by impedance measurement, *Construction and Building Materials*, Vol. 113, 939–950. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.141
- [122] Anand, S.; Vrat, P.; Dahiya, R. P. (2006). Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO₂ emissions from the cement industry, *Journal of Environmental Management*, Vol. 79, No. 4, 383–398. doi:10.1016/j.jenvman.2005.08.007
- [123] Li, G. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 6, 1043–1049. doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.013
- [124] Kayali, O. (2004). Effect of high volume fly ash on mechanical properties of fiber reinforced concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 37, No. 269, 318–327. doi:10.1617/13978
- [125] Lam, L.; Wong, Y. L.; Poon, C. S. (2000). Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 5, 747–756. doi:10.1016/S0008-8846(00)00213-1
- [126] Yu, J.; Lu, C.; Leung, C. K. Y.; Li, G. (2017). Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash, *Construction and Building Materials*, Vol. 147, 510–518. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188
- [127] McKerall, W. C.; Ledbetter, W. B.; Teague, D. J. (1981). Analysis Of Fly Ashes Produced In Texas
- [128] Singh, N.; Kumar, P.; Goyal, P. (2019). Reviewing the behaviour of High Volume Fly Ash based Self Compacting Concrete, *Journal of Building Engineering*, 100882.

doi:10.1016/j.job.2019.100882

- [129] Thomas, M. (n.d.). *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*
- [130] Harwalkar, A. B.; Awanti, S. S. (2014). Laboratory and Field Investigations on High-Volume Fly Ash Concrete for Rigid Pavement, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2441, No. 1, 121–127. doi:10.3141/2441-16
- [131] Kocak, Y.; Nas, S. (2014). The effect of using fly ash on the strength and hydration characteristics of blended cements, *Construction and Building Materials*, Vol. 73, 25–32. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.048
- [132] Arezoumandi, M.; Volz, J. S. (2013). Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high-volume fly ash concrete beams, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 59, 120–130. doi:10.1016/j.jclepro.2013.06.043
- [133] Alkhateb, H.; Al-Ostaz, A.; Cheng, A. H.-D.; Li, X. (2013). Materials Genome for Graphene-Cement Nanocomposites, *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*, Vol. 3, No. 3, 67–77. doi:10.1061/(ASCE)NM.2153-5477.0000055
- [134] Ranjbar, N.; Mehrali, M.; Mehrali, M.; Alengaram, U. J.; Jumaat, M. Z. (2015). Graphene nanoplatelet-fly ash based geopolymer composites, *Cement and Concrete Research*, Vol. 76, 222–231. doi:10.1016/j.cemconres.2015.06.003
- [135] Kong, D.; Corr, D. J.; Hou, P.; Yang, Y.; Shah, S. P. (2015). Influence of colloidal silica sol on fresh properties of cement paste as compared to nano-silica powder with agglomerates in micron-scale, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 63, 30–41. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.08.002
- [136] Xu, G.; Shi, X. (2018, September 1). Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review, *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier B.V., 95–109. doi:10.1016/j.resconrec.2018.04.010
- [137] Gesoğlu, M.; Güneyisi, E.; Kocabağ, M. E.; Bayram, V.; Mermerdaş, K. (2012). Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash, *Construction and Building Materials*, Vol. 37, 160–170. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092
- [138] Agarwal, S. K.; Gulati, D. (2006). Utilization of industrial wastes and unprocessed micro-fillers for making cost effective mortars, *Construction and Building Materials*, Vol. 20, No. 10, 999–1004. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.06.009
- [139] Elkhadiri, I.; Diouri, A.; Boukhari, A.; Aride, J.; Puertas, F. (2002). Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in Moroccan Portland cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 10, 1597–1603. doi:10.1016/S0008-8846(02)00834-7
- [140] Sua-Iam, G.; Makul, N. (2013). Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, Vol. 38, 455–464. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.016
- [141] Ghrici, M.; Kenai, S.; Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 7, 542–549. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009
- [142] Menéndez, G.; Bonavetti, V.; Irassar, E. F. (2003). Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 1, 61–67. doi:10.1016/S0958-9465(01)00056-7
- [143] Ouchi, M.; Sakai, E. (n.d.). Self-Compacting Concrete In Japan, from https://www.researchgate.net/publication/293802635_SELF-Compacting_Concrete_In_Japan, accessed 20-12-2019
- [144] Khan, M.; Ali, M. (2019). Improvement in concrete behavior with fly ash, silica-fume and coconut fibres, *Construction and Building Materials*, Vol. 203, 174–187. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.103
- [145] Assi, L.; Carter, K.; Deaver, E. (Eddie); Anay, R.; Ziehl, P. (2018). Sustainable concrete: Building a greener future, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 198, 1641–1651.

doi:10.1016/j.jclepro.2018.07.123

- [146] Pala Krunal J Dhandha ME Student Assistant Professor, K. P. (2015). Use of Marble Powder and Fly Ash in Self Compacting Concrete, *IJIRST-International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, Vol. 1
- [147] Topçu, İ. B.; Canbaz, M. (2001). *Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri Influences Of Use Of Fly Ash In Concrete, Eng.&Arch.Fac.Osmangazi University* (Vol. XIV)
- [148] Dokuz Eylül Üniversitesi, İ. M. B. (n.d.). *Beton Teknolojisi Agregası Agregası Yapı Malzemesi Ders II*
- [149] Yazıcı, D. D. H. (n.d.). *Beton Basın Beton Basınç Dayanımı - Yapı Malzemesi 1-2-3*
- [150] Filiz, M.; Özel, C.; Ali Oktay, M.; Kağan Aktemur, S.; Demirel Üniversitesi, S.; Eğitim Fakültesi, T.; Eğitimi Bölümü, Y. (2009). *Modifiye Çökme Deney Cihazı İle Klasik Çökme Deneyinin Karşılaştırılması Comparison Of Modify Slump Test Apparatus With Classical Slump Test, International Journal of Technologic Sciences* (Vol. 18)
- [151] Tuğrul Erdem, R.; Öztürk, A. U. (2012). *Mermer Tozu Katkısının Çimento Harcı Donma-Çözünme Özellikleri Üzerine Etkisi Effect of Marble Powder Additive on Freezing-Thawing Properties of Cement Mortar, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi BEU Journal of Science* (Vol. 1)
- [152] TS 706 EN 12620. (n.d.), from <https://www.scribd.com/document/30560526/TS-706-EN-12620>, accessed 13-12-2019
- [153] *Kırmataş Hammaddeleri Ve Standartları Raw Materials Of Crushed Stone And Their Standards.* (n.d.)
- [154] Haktanir, T.; Karaboga, D.; Akay, B. (2012). Mix Proportioning of Aggregates for Concrete by Three Different Approaches, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 5, 529–537. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000416
- [155] University, A. Y. B. (n.d.). *Concrete Aggregates*
- [156] TSE. (n.d.). TS EN 197-1, from <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?053107106111065067115113049116090107100056052055108081090071086075069085047110067109075073081116103090081086073108065117084119101054079105102106052121113073088089115071068074049054051110112066>, accessed 13-12-2019
- [157] Tanyıldızı, H.; Coşkun, A. (2011). Elazığ Yöresi Vişne Mermer Tozu Katkılı Hafif Betonun Basınç Ve Ultrasonik Ses Geçirgenliği Özelliğinin Araştırılması, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, Vol. 27, No. 2, 150–154
- [158] Emiroğlu, M.; Yıldız, S.; Özgan, E. (2013). Lastik Agregalı Betonlarda Elastisite Modülünün Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Vol. 24, No. 3
- [159] 1008, T. E. (n.d.). TSE EN Standard Detayı, from <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073081070066068114089057071081121122>, accessed 14-12-2019
- [160] Türker, P.; Erdoğan, B. (n.d.). *Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri*
- [161] Oranda, Y.; Azaltıcı, S.; Akışkanlaştırıcı, S.; Katkısı, B. (n.d.). *CHRYSO® Optima 284*
- [162] Üniversitesi, I.; Fakültesi, M.; Bölümü, İ. M. (n.d.). *Iğdır Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü Yapı Lab. Dersi Deney Föyü*
- [163] Koehler, E. P.; Fowler, D. W. (2003). *Summary of Concrete Workability Test Methods Sponsored by the Aggregates Foundation for Technology, Research and Education*
- [164] Concrete Admixtures - V.H. Dodson - Google Kitaplar. (n.d.), from https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=9NEFCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=concrete+and+concrete+admixtures&ots=2kPxUVd3Ym&sig=hOnl80i7hLp9NbgMSnSObfCahJw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false, accessed 24-12-2019
- [165] Demirel, B.; Gultekin, E.; Alyamac, K. E. (2019). Performance of Structural Lightweight Concrete

- containing Metakaolin after Elevated Temperature, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1–8
- [166] Barbuta, M.; Lepadutu, D. (n.d.). Mechanical Characteristics Investigation of Polymer Concrete Using Mixture Design of Experiments and Response Surface Method
- [167] Smith, W. F. (2005). *Experimental Design for Formulation*, SIAM
- [168] Bayramov, F.; Taşdemir, C.; Taşdemir, M. A. (2004). Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 6, 665–675. doi:10.1016/S0958-9465(03)00161-6
- [169] Dean, A.; Voss, D.; Draguljić, D. (1999). *Design and Analysis of Experiments* (Vol. 1), Springer
- [170] Değirmencioğlu, A.; Yazgı Ege Üniversitesi, A.; Fakültesi Tarım Makinaları Bölümü, Z. (2006). *Tepki Yüzeyleri Metodolojisi 'Optimizasyon Esaslı Çalışmalara İlişkin Teorik Esaslar ve Tarımsal Mekanizasyon Uygulamaları'*, *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi* (Vol. 2)

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Esen EREN

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri: Malatya

Doğum Yılı: 1983

Uyruğu: T.C.

Adres: Fırat Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü

E-posta: mehmeteseneren@gmail.com

Yabancı Diller: İngilizce (ÜDS:55)

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : “Betonun Küp Yarmada Çekme Dayanımı Üzerine Malzeme ve Boyut Etkisi”

Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı, 2010

Danışman: Prof. Dr. Ragıp İnce

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2007

Lise: Ankara Bahçelievler Deneme Lisesi, 2000

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

Beton Basınç Deney Aleti, Beton Geçirimsizlik Deney Aleti, Windsor Probe, Ultrasonik Dalga Hızı Test Cihazı

MATLAB, C-C++, Fortran 90,

Auto-Cad, Design Expert,

İŞ DENEYİMİ

2007 – 2019: Modern Yapı Firması Kurucusu ve Yöneticisi

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

- Multi-fractal scaling law for split strength of concrete cubes Ince, R., Gör, M., Alyamaç, K.E., Eren, M.E. 2016 Magazine of Concrete Research 68(3), pp. 141-150
- The effect of size on the splitting strength of cubic concrete members Ince, R., Gör, M., Eren, M.E., Alyamaç, K.E. 2015 Strain 51(2), pp. 135-146

Bildiriler:

- The effect of waste marble powder on the workability of eco-efficient concrete Eren, M.E., Alyamaç K.E. 2019 International Asian Congress On Contemporary Sciences II, pp. 90-97
- Investigation of strength properties of eco-efficient concrete containing waste tire aggregate Eren, M.E., Alyamaç K.E. 2019 International Asian Congress On Contemporary Sciences II, pp. 98-105