T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MgO ÇİMENTOSU KULLANILARAK ELDE EDİLEN YAPAY AGREGALARIN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Enis COŞKUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Malzemeleri Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Huzeyfe AKCA

Eş Danışman

Dr. Onur ŞAHİN

Ekim, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ BAŞLIĞI

Enis COŞKUN tarafından hazırlanan tez çalışması 17.10.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Abdullah Huzeyfe AKCA Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Dr. Onur ŞAHİN Yıldız Teknik Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Huzeyfe AKCA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Anıl NİŞ, Üye _____
İstanbul Gelişim Üniversitesi

Danışmanım Dr. Abdullah Huzeyfe AKCA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “MgO ÇİMENTOSU KULLANILARAK ELDE EDİLEN YAPAY AGREGALARIN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ ” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Enis COŞKUN

İmza

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FYL-2024-6380” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Eşim

ve

oğluma

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleri ile bana kılavuz olan ve benden hiçbir konuda desteğini esirgemeyen kıymetli tez danışmanım hocam Dr. Abdullah Huzeyfe AKCA'ya

Benden desteklerinin esirgemeyen sevgili eşim ve oğluma, Üretim sürecinde malzeme desteği sağlayan ve üretimlerde yardımcı olan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım

Enis COŞKUN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 1
1.1.1 Amaç ve Gerekçe 1
1.1.2 Kapsam 1
2 LİTERATÜR TARAMASI 3
2.1 Agregalar 3
2.1.1 Genel Agrega Tüketimi 5
2.1.2 Agregaların Sınıflandırılması 6
2.1.3 Yapay ve Hafif Agregaların Özellikleri 9
2.2 MgO Çimentosu 13
2.3 Karbonatlaşma 15
2.4 Hafif Betonlar 16
2.4.1 Hafif Betonun Mekanik Özellikleri 18
3 DENEYSEL ÇALIŞMA 21
3.1 Çalışmanın Metodu 21
3.2 Ön Deney Çalışması 21
3.3 Yapay Agrega 24
3.3.1 Yapay Agrega Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri 24
3.3.2 Yapay Agrega Üretim Aşaması 24

3.3.3 Agrega Deneyleri 29

3.4 Beton Üretimi 35

3.4.1 Beton Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri 35

3.4.2 Beton Karışım Oranları 37

3.4.3 Beton Üretimi ve Kür Yöntemi 46

3.5 Deney Çıktıları 48

4 SONUÇ **53**

4.1 Agrega Özellikleri 53

4.2 Beton Özellikleri 53

KAYNAKÇA **55**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **62**

SİMGE LİSTESİ

σ_t	Çekme Gerilimi
Σ	Dayanım Değeri
P	Kırılma Yükü
R_o	Ortalama Yarıçap
σ_{tane}	Tanecik Dayanımı
X	Yükleme Noktaları Arasındaki Mesafe

KISALTMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
ACV	Agrega Kırılma Değeri
ACI	American Concrete Institute
C-S-H	Tobermorit Jeli
DKY	Doygun Kuru Yüzey
LWA	Hafif Agrega
LWBC	Katkılı Sinterlenmiş Hafif Uçucu Kül
LWC	Hafif Beton
LWGC	Cam Tozu
GDA	Geri Dönüşüm Agregası
RMC	Reaktif Magnezyum Çimentosu
PC	Portland Çimentosu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kaba – ince agrega **4**
Şekil 2.2 Agrega elek analizine göre ideal granülometri sınırları **4**
Şekil 2.3 Yıllık milyar ton üzerinden üretim eğilimi (UEPG 2022) **6**
Şekil 2.4 Konvansiyonel Portland Çimentosu üretim ve magnezyum esaslı çevreci üretim süreçleri. **15**
Şekil 3.1 Agrega üretiminde kullanılan magnezyum oksit çimentosunun tanecik dağılımı **22**
Şekil 3.2 Agrega tanecik dayanım deneyi **23**
Şekil 3.3 Yapay agrega üretim aşamaları **26**
Şekil 3.4 Yapay agrega üretim aşamaları **26**
Şekil 3.5 Yapay agrega çeyrekleme yöntemi ve 40 ºC etüv **29**
Şekil 3.6 M3 agregası granülometri eğrisi **30**
Şekil 3.7 M14 agregası granülometri eğrisi **30**
Şekil 3.8 MS3 agregası granülometri eğrisi **31**
Şekil 3.9 MS14 agregası granülometri eğrisi **31**
Şekil 3.10 MMH3 agregası granülometri eğrisi **31**
Şekil 3.11 MMH14 agregası granülometri eğrisi **32**
Şekil 3.12 24 saat suda bekletilen agregalar **32**
Şekil 3.13 Su emme deneyi **33**
Şekil 3.14 Özgül ağırlık deneyi **33**
Şekil 3.15 I No agrega granülometri eğrisi **35**
Şekil 3.16 Doğal kum granülometri eğrisi **36**
Şekil 3.17 Kırma kum granülometri eğrisi **36**
Şekil 3.18 Kırma kum metilen mavisi deneyi **36**
Şekil 3.19 Doğal kum metilen mavisi deneyi **37**
Şekil 3.20 Referans beton karışım grafiği **40**
Şekil 3.21 M3-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği **40**
Şekil 3.22 M3 agregası ile oluşturulan karışım grafiği **41**
Şekil 3.23 MS3-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği **41**

Şekil 3.24 MS3 agregası ile oluşturulan karışım grafiği **42**
Şekil 3.25 MMH3-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği **42**
Şekil 3.26 MMH3 agregası ile oluşturulan karışım grafiği **43**
Şekil 3.27 M14-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği **43**
Şekil 3.28 M14 agregası ile oluşturulan karışım grafiği **44**
Şekil 3.29 MS14-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği **44**
Şekil 3.30 MS14 agregası ile oluşturulan karışım grafiği **45**
Şekil 3.31 MMH14-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği **45**
Şekil 3.32 MMH14 agregası ile oluşturulan karışım grafiği **46**
Şekil 3.33 Beton üretim aşamaları **47**
Şekil 3.34 Agrega dayanım sonuçları **48**
Şekil 3.35 Beton dayanım sonuçları **50**
Şekil 3.36 Beton basınç deneyine tabi tutulan numuneler **51**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Polipropilen lifin özellikleri **21**
Tablo 3.2 Yapay agregaların numune kodlaması **22**
Tablo 3.3 Agregaların ortalama yoğunlukları **23**
Tablo 3.4 Agregaların ortalama tanecik dayanımları **23**
Tablo 3.5 Agrega karışım grupları ve oranları **25**
Tablo 3.6 3 günlük kür sonrası ağırlık farkı **27**
Tablo 3.7 14 günlük kür sonrası ağırlık farkı **28**
Tablo 3.8 Elek analizi **30**
Tablo 3.9 Özgül ağırlık ve su emme deneyleri **34**
Tablo 3.10 Özgül ağırlık ve su emme deneyleri **37**
Tablo 3.11 3 gün kürlenen agregalar ile yapılan betonların karışım oranları **38**
Tablo 3.12 14 gün kürlenen agregalar ile yapılan betonların karışım oranları **39**
Tablo 3.13 Yapay agrega ortalama dayanım sonuçları **48**
Tablo 3.14 3 günlük agrega ile üretilen beton basınç dayanım deneyi **49**
Tablo 3.15 14 günlük agrega ile üretin beton basınç dayanım deneyi **49**
Tablo 3.16 3 günlük agrega ile yapılan beton su emme deneyi **52**
Tablo 3.17 14 günlük agrega ile yapılan beton su emme deneyi **52**

ÖZET

MgO Çimentosu Kullanılarak Elde Edilen Yapay Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi

Enis COŞKUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Abdullah Huzeyfe AKCA

Eş-Danışman: Dr. Onur ŞAHİN

Bu çalışmada MgO çimentosu ile elde edilen yapay agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri ve bu agregalar ile üretilen betonların özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle farklı karışım oranları ve MgO çimentosuna ilave malzemeler kullanılarak hazırlanan agregalar CO_2 kabininde 3 ve 14 gün süreyle kür edilmiştir. Agregaların özgül ağırlık, su emme yüzdeleri tespit edilmiş ve bu bilgiler doğrultusunda beton karışım oranları belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonuçları, CO_2 kürüne maruz kalan agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler olduğunu ortaya koymuştur. Yapay agregalar ile üretilen betonlarda da CO_2 kabinindeki kür süresinin beton dayanım sonuçlarında etkili olduğu görülmüştür. Sonuç olarak agrega kür süresinin ve beton içerisinde kullanılan yapay agrega miktarının beton dayanım değerlerini belirlemede önemli bir etken olduğu ve ayrıca MgO çimentosu ile kullanılan malzemelerin özelliklerinin de sonuçlarda etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: MgO çimentosu, Yapay agrega, CO_2, Karbonatlaşma

ABSTRACT

Effect Of Artificial Aggregates Obtained Using MgO Cement On Concrete Properties

Enis COŞKUN

Department of Civil Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Dr. Abdullah Huzeyfe AKCA

Co-supervisor: Dr. Onur ŞAHİN

This study investigated the physical and mechanical properties of synthetic aggregates produced with MgO cement and the properties of concretes produced with these aggregates. Aggregates prepared using different mixing ratios and additives to MgO cement were first cured in a CO_2 chamber for 3 and 14 days. The specific gravity and water absorption percentages of the aggregates were determined, and concrete mixture ratios were determined based on this information. The experimental study results revealed improvements in the physical and mechanical properties of aggregates subjected to CO_2 curing. It was also observed that the curing time in the CO_2 chamber affected the concrete strength results in concrete produced with synthetic aggregates. Consequently, it was observed that the aggregate curing time and the amount of synthetic aggregate used in the concrete are important factors in determining concrete strength values, and the properties of the materials used with MgO cement also affect the results.

Anahtar Kelimeler: MgO cement, Artificial aggregate, CO_2, Carbonation

1
GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

İnşaat sektörü, başta agrega olmak üzere önemli miktarda doğal kaynak tüketmekte ve çimentolu malzemelerin kullanımıyla karbon emisyonuna neden olmaktadır. Geleneksel beton üretiminde kullanılan çimento, küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumludur. Aynı şekilde, doğal agregaların çıkarılması da ekosistemler üzerinde tahrip edici etkiler oluşturmaktadır. Bu durum hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Dolayısıyla, daha düşük karbon salınımı ile üretilebilen bağlayıcı sistemlerin ve alternatif agrega kaynaklarının kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Bu nedenle inşaat sektörünün temel kaygılarından biri yapılar ve altyapılar için sürdürülebilir ve çevre dostu kaynaklar bulmaktır. Ancak yeni teknikler ve materyaller bazen ya mevcut alternatiflerinden daha pahalı hale gelir ya da özel işlemler gerektirir.

1.1.1 Amaç ve Gerekçe

Projenin amacı: Karbonatlaştırılarak sertleştirilmiş magnezyum çimentolu yapay agrega üretilmesi

Projenin gerekçesi: İnşaat sektörü doğal kaynakların tüketimi ve karbon salınımı konularında sürdürülebilir çözümlere ihtiyaç duymaktadır.

1.1.2 Kapsam

Karbon salınımı ve doğal kaynakların tükenmesi günümüzün küresel sorunlarından biridir. Bu sebeple karbon salınımı azaltılmış ve hatta karbon tüketebilen malzemelerin endüstride kullanılması inovatif sürdürülebilirlik konusunda önemli bir husustur. Çalışmada bu konular özelinde bir çözüm üretmek amacıyla karbondioksit gazı kullanılarak sertleştirilmiş yapay agrega üretimi hedeflenmektedir. Böylelikle proje kapsamının ve verilerinin ışığında yıllık 50

milyar ton seviyelerinde agrega kullanımının söz konusu olduğu inşaat sektörüne daha yeşil ve çevreci olması için alternatif çözümler sunulacaktır.

2
LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Agregalar

Agrega, beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı madde yardımı ile bir araya getirilen, organik olmayan, kum, çakıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın cürufu, genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemelerdir [1]. Agregaları kısaca betonda kullanıma uygun taneli mineral malzeme olarak tanımlayabiliriz. Agregalar, doğal, yapay veya daha önceden kullanılmış malzemelerden tekrar kazanım yoluyla elde edilmiş olabilir.[2]

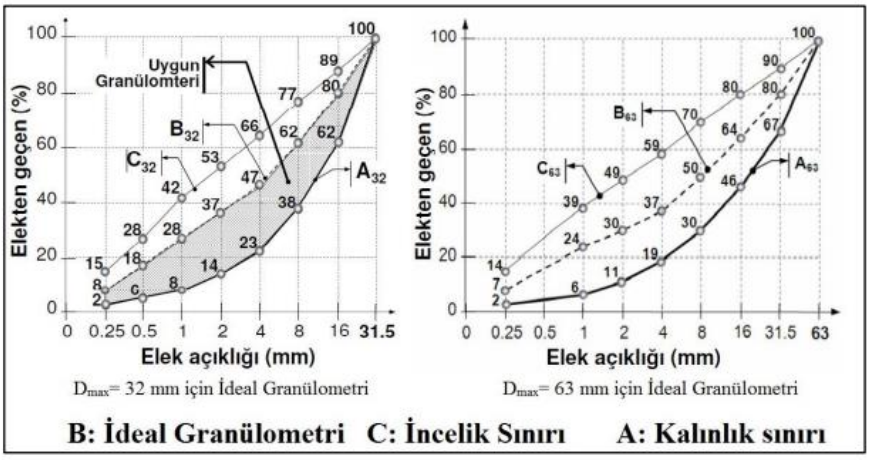
Agreganın beton yapımında ekonomik ve Teknik yönden çok önemli bir konumu bulunmaktadır. Agrega maliyeti çimentoya göre oldukça düşük olduğundan, agrega betonda kullanılan ve oldukça ucuz olan bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmektedir. Betonda agrega kullanılması, sertleşen betonun hacim değişikliğinin önlemekte veya azaltmakta, çevre etkilerine karşı betonun dayanıklılığını arttırmakta ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonda gerekli dayanımın sağlanmasına yardımcı olabilmektedir. Agrega, kaba ve ince agrega olarak iki kısımda incelenebilir. Bu iki bileşeni tane büyüklüğü olarak birbirinden ayırmak için kullanılan kriter 4 mm boyutudur. 4mm'den iri boyuttaki tanelerden oluşan kısma kaba agrega, 4 mm'den küçük boyuttaki kısma ince agrega denir. [3]



Şekil 2.1 Kaba – ince agrega

Betonun yaklaşık olarak hacmen %75'ini oluşturan agregaların nitelik ve nicelikleri, betonun kalitesini ve ekonomisini büyük ölçüde etkiler. Agrega betonun iskeletinin oluşturduğundan özelliklerinin kullanılmalarından önce deneylerle belirlenmesi gerekmektedir. Ülkemizde beton agregalarında aranan özellikler TS 706 EN 12620 standardında belirleniştir. [4]

Agrega granülometrisi taze haldeki betonda işlenebilme, sertleşmiş betonda mekanik dayanım, kompasite, geçirimlilik, durabilite, rötre gibi özellikler üzerinde etkilidir. Beton üretiminde kullanılacak karışım agregasının granülometrisi 'ideal granülometri eğrisiyle uyuşmalı veya ideal bölgelerde kalmalı. Maksimum agrega boyutuna bağlı olarak kabul edilen referans granülometri eğrileri ilgili standartta belirtilmiştir. [5]



Şekil 2.2 Agrega elek analizine göre ideal granülometri sınırları

Betonda kullanılan agregaların kolayca kırılmayan, çabuk aşınmayan, sağlam ve sert olması gerekmektedir. Agreganın aşınma dayanıklılığı, basınç dayanımı, tokluğu ve sertliği betonun mekanik özelliklerini etkileyen etmenler olarak sayılabilir. Agreganın elastisite modülü ve poisson oranı mekanik özellikleri arasında yer almaktadır. [6]

Agreganın dayanımı ve sertliğinin yanı sıra, özellikle beton yüzeyinin aşınmaya maruz kalacağı durumlarda agreganın aşınmaya dayanıklı olması gerekmektedir. [7]

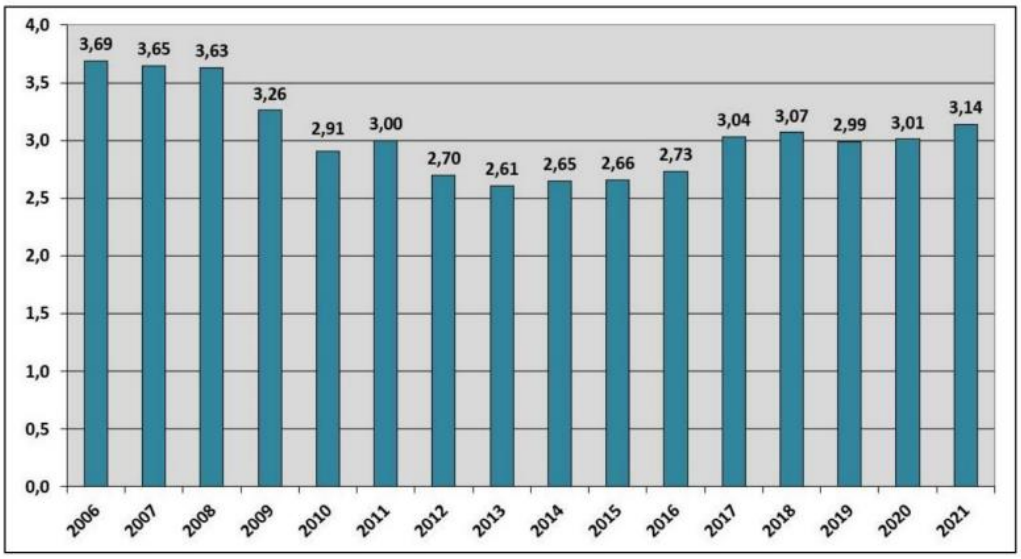
Agrega içerisinde bulunan zararlı maddeler betonun prizine veya sertleşmesine zarar veren, betonun dayanımını veya doluluğunu (kompasite) azaltan, parçalanmasına neden olan veya donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşüren maddelerdir. Dağılış ve miktarlarına bağlı olarak zararlı etkiyen malzemeler şunlardır. Yıkanabilir maddeler, organik kökenli maddeler, sertleşmeye zarar veren maddeler, bazı kükürtlü bileşikler, yumuşayan, şişen ve hacmi arttıran maddeler, klorürler gibi korozyona sebep olan maddeler ve mikalar. [8]

2.1.1 Genel Agrega Tüketimi

Agrega (kum, çakıl ve kırma taş) tüketimi son yirmi yılda üç katına çıkmış ve şu anda (2022) yılda yaklaşık 50 milyar ton olarak tahmin edilmektedir. Dünya çapında talep, artan kentleşme, kalkınma, nüfus artışı ve aynı zamanda yükselen deniz seviyeleriyle birlikte katlanarak artmaktadır. Dolayısıyla agregalar, sudan hemen sonra dünyada en çok kullanılan ikinci kaynaktır. [9]

Üretilen agregaların %80'i yapı ve altyapı sektöründe kullanılmaktadır. Dünya genelinde ortalama kişi başı yıllık agrega tüketimi 5-7 ton arasında değişmektedir. Agrega sektörünün küresel ekonomik büyüklüğünün 2025 yılına kadar 593 milyar $'a ulaşacağı öngörülmektedir.[10]

Kum, çakıl ve kaya gibi agregalar, ekonomik ve toplumsal ilerlemeye sağladıkları katkıların yanı sıra çevre üzerindeki etkileri açısından da önemlidir. Avrupa agrega endüstrisi, her yıl 3 milyar ton üretimle AB'deki enerji dışı madencilik sektörünün en büyük bölümünü oluşturmaktadır (Şekil 2.3). Bu kaynaklar ekonomiye hayati bir girdi sağlamakta ve bina ve altyapı tedarikinde, ekonomik büyümeyi ve artan ulusal nüfusun ihtiyaçlarını desteklemede stratejik öneme sahip olarak kabul edilmektedir.[11]



Şekil 2.3 Yıllık milyar ton üzerinden üretim eğilimi (UEPG 2022)

Türkiye'de agrega üretimi 2018 yılında 450 milyon tona ulaşmıştır. Ancak inşaat sektöründeki daralmaya paralel olarak agrega üretimi 2019 yılında 220 milyon ton seviyelerine kadar düşmüş, 2021 yılında kısmi artışla yükselerek 300 milyon ton seviyelerine ulaşmıştır. Kişi başı agrega tüketimleri de 6 ton seviyelerinden 4 ton seviyelerine inmiştir.[12]

Agrega üretiminin çoğu, agrega ocaklarından ve kum-çakıl yataklarından elde edilmektedir; geri kalan %10'luk kısım ise endüstriyel atıkların geri dönüşümü, cüruf ve yıkım atıklarından (%8), denizlerden ve endüstriyel olarak üretilen agregalardan (%4) gelmektedir (uepg.eu). Türkiye Agrega Üreticileri Birliği (AGÜB) verilerine göre, Türkiye'de toplam 12 agrega üretiminin 270 milyon tonu kırmataş, kum ve çakıl olarak kullanılmaktadır. Türkiye'deki agregaların büyük bir kısmı sert kaya ocaklarından (250 milyon ton), diğerleri ise kum-çakıl yataklarından (19,9 milyon ton) ve deniz agregalarından (0,1 milyon ton) elde edilmektedir.[13]

2.1.2 Agregaların Sınıflandırılması

Agregalar genel olarak, elde ediliş şekillerine, boyutlarına, birim ağırlıklarına, tane şekillerine, yüzey dokularına, kaynaklarına, jeolojik ve mineralojik yapılarına göre sınıflandırılabilirler [14].

Agregaların tane boyutu 4 mm'den büyükse, iri (çakıl), 4 mm'den küçükse ince (kum) ve bu ikisinin karışımında ise karışık (tüvanan) agrega denilerek üç gruba ayrılır. [15]

Normal agregalar; EN 1097-6'ya uygun olarak tayin edilen etüv kurusu tane birim hacim kütlesi 2000 kg/m³ – 3000 kg/m³ arasında olan agrega.

Hafif agregalar; EN 1097-6'ya uygun olarak tayin edilen etüv kurusu tane birim hacim kütlesi 2000 kg/m³'den küçük veya EN 1097-3'e uygun olarak tayin edilen etüv kurusu yığın (boşluklu) birim hacim kütlesi 1200 kg/m3 den küçük olan mineral esaslı agrega.

Ağır agregalar; EN 1097-6'ya uygun olarak tayin edilen etüv kurusu tane birim hacim kütlesi en az 3000 kg/m³ olan agrega.[16]

Elde ediliş şekillerine göre agregalar ikiye ayrılır doğal agregalar ve yapay agregalar.

2.1.2.1 Doğal Agregalar

Doğal Agrega doğal taş agrega; teraslardan, nehirlerden, denizlerden, göllerden ve taş ocaklarından elde edilen kırılmış agregadır.[17]

Doğal agregalar mineral kökenli değişik boyutların karışımı halinde bulunabilir. Kum ve çakılın bir arada bulunduğu malzemeye tüvenan agrega adı verilir. [18]

Doğal (yuvarlak, nehir) agregalar; nehir ve akarsu yataklarından çıkarılan ve doğal olarak yuvarlanmış taşlardan oluşur. Bu doğal yuvarlanma süreci, agregaların yüzeyini pürüzsüz hale getirirken, köşeli kırmataş agregalarına göre daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olmalarını sağlar. [19]

Agregaların bu özellikleri, beton karışımında daha iyi işlenebilirlik ve daha az su ihtiyacı sağlasa da bağlanma performansını olumsuz etkileyebilir. Doğal agregaların en önemli avantajlarından biri, pürüzsüz yüzeyleri sayesinde beton ve harç karışımlarının işlenebilirliğini artırmasıdır. [20]

2.1.2.2 Alternatif Agregalar

Bölüm 1.1 de bahsedildiği üzere doğal agregaların çıkarılması da ekosistemler üzerinde tahrip edici etkiler oluşturmaktadır. Bu durum hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Dolayısıyla, daha düşük karbon

salınımı ile üretilebilen bağlayıcı sistemlerin ve alternatif agrega kaynaklarının kullanımı giderek önem kazanmaktadır.

- **Geri Dönüşüm Agregası**

GDA; genellikle inşaat ve yıkım atıklarının geri dönüşümü sonucunda elde edilen atık betondan üretilir. Bu tür agregaların yeni beton üretiminde kullanılması, doğal agrega kaynaklarının korunmasına katkı sağlarken, aynı zamanda çevresel sorunların çözümüne de yardımcı olur. GDA'ların kullanımı, doğal kaynak tüketimini azaltarak ekosisteme duyarlı bir yaklaşım sunar ve inşaat sektöründe sürdürülebilir malzeme kullanımını teşvik eder. Böylece hem atık yönetimine hem de çevre dostu yapı malzemesi üretimine önemli bir katkı sağlanmış olur. [21]

GDA, yıkım sonrası oluşan atık betonlar kırılarak, temizlenerek ve çeşitli boyutlarda sınıflandırılarak elde edilir. Çalışmalar, GDA'nın kimyasal ve fiziksel özelliklerinin, malzemenin kaynağına ve geri dönüşüm sürecine bağlı olarak değişiklik gösterdiğini belirtmektedir.[22]

GDA'ların en önemli farklılığı, doğal agregalara göre daha yüksek su emme kapasitesine ve daha düşük yoğunluğa sahip olmasıdır.[23]

Araştırmalar, geri dönüştürülmüş agregaların mekanik dayanımının, özellikle yüksek performanslı beton uygulamaları için doğal agregalardan daha düşük olabileceğini göstermektedir. [24]

- **Yapay Agregalar**

Yüksek fırın cürufu taşı, izabe cürufu veya yüksek fırın cüruf kumu gibi sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış agregadır.[25]

Yapay hafif agregalar (LWA), genleşme özelliğine sahip malzemelerin ısıl işlemle işlenmesi ya da kireç ile uçucu kül gibi puzolanik taneler arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon temelli soğuk bağlama aglomerasyon süreciyle üretilmektedir. Isıl işlem, kil, şeyl, arduvaz, perlit ve vermikülit gibi doğal malzemelere uygulanabildiği gibi; uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, endüstriyel atıklar ve arıtma çamuru gibi endüstriyel yan ürünler üzerinde de uygulanabilmektedir.

2.1.3 Yapay ve Hafif Agregaların Özellikleri

2.1.3.1 Yapay hafif agregaların fiziksel özellikleri

Hafif agregaların fiziksel özellikleri; özgül ağırlık, birim hacim ağırlığı ve su emme oranları, kanalizasyon külü, uçucu kül, silis dumanı, zeolit tüfü, kil, arduvaz, perlit gibi farklı ince malzemeler üzerinden birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda sinterleme sıcaklıkları genellikle 1000–1300 °C arasında değişmiştir. Genel olarak, ısıl ve polimer işlemleri poroziteyi azaltmıştır [26]. Kristalin ürünlerin camsı yapılara dönüşmesiyle, artan sıcaklıkla birlikte katıların yoğunluğunda azalma eğilimi görülmüştür. Ayrıca, hızlı soğutma ile yavaş soğutma karşılaştırıldığında, 1300 °C'de eş sıcaklık seviyelerinde hızlı soğutma sonucunda katı yoğunluğu daha düşük bulunmuştur. Polimer işleminden geçmiş agregaların yoğunluğu, polimerin özgül ağırlığının kızartma karışımındaki organik maddelerden daha düşük olması sebebiyle, işlenmemiş agregalara kıyasla daha düşük bulunmuştur.

Li-xiong ve ark. [27] tarafından rapor edilen sinterlenmiş uçucu kül agregaları üzerine yapılan bir çalışmada, taze peletler ön sinterleme öncesinde 140 °C'de 4 saat boyunca kurutulmuş, ardından 700 °C'de 25 dakika ön sinterleme uygulanmış ve nihayetinde 1200–1250 °C sıcaklık aralığında 35 dakika sinterleme yapılarak yüksek sıcaklık fırınından çıkarılmıştır. Bu hafif agregalar 7,8 MPa dayanım, %4,2 su emme oranı ve 843 kg/m³ yoğunluk sergilemiştir.

Bir diğer çalışmada, termik santralden elde edilen uçucu kül örneklerinin organik bağlayıcı olmaksızın sinterleme davranışı incelenmiştir [28]. Örneğin, bir uçucu kül örneği 1175 °C'de ısıl işlem sonrasında açık griden koyu griye dönüşmüş ve yüzeyi pürüzsüzleşmiştir. Diğer örneklerde de ısıl işlemle birlikte renk ve yüzey dokusunda değişiklik gözlemlenmiştir. Gözeneklilik nedeniyle sinterlenmiş örnekler, 2,43–2,58 g/cm³ aralığında görece düşük yoğunluk ve yüksek su emme oranı göstermiştir.

Bir F sınıfı uçucu külün sinterleme yeteneği, 1050–1200 °C sıcaklık ve 0–90 dakika süre aralıklarında incelenmiştir [29] Uygulanan her sıcaklık için sinterleme süresi arttıkça yoğunluk da genel olarak artmıştır. Optimum yoğunluk artışı 1100 °C'de 60 dakika sinterlemede görülmüş, 1200 °C'de 90 dakika sonunda 1708 kg/m³

maksimum yoğunluk elde edilmiştir. Yığın yoğunluğu ile su emme oranı ters orantılıdır; yoğunluk arttıkça su emme azalmaktadır.

Kockal ve Ozturan [30], bentonit ve cam tozu gibi farklı bağlayıcılarla (fly ash + bağlayıcı) üretilen hafif uçucu kül agregalarının 1100 °C, 1150 °C ve 1200 °C'deki ısıl işlemler sonrası fiziksel özelliklerini incelemiştir. Hem yalnız uçucu kül hem de farklı oranlarda bağlayıcı içeren karışımlarla üretilen peletlerin özgül ağırlık, su emme ve porozite değerleri ölçülmüştür. Bağlayıcı kullanımı (bağlayıcı türünden bağımsız olarak), 1200 °C'de sinterlenen tüm agregaların genleşme nedeniyle özgül ağırlığını önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak daha düşük sinterleme sıcaklıklarında (1100–1150 °C), bağlayıcıların uçucu küle eklenmesi, bağlayıcıların uçucu külden daha yüksek özgül ağırlığa sahip olması nedeniyle özgül ağırlığı artırmıştır. Yalnız uçucu kül kullanılarak üretilen hafif agregaların özgül ağırlığı ise artan sinterleme sıcaklığıyla sürekli yükselmiş, bu durum yüksek sıcaklıklarda süreksiz ve küçük gözeneklerle yoğun cam fazı oluşumu ile açıklanmıştır [31]. Tüm hafif agregaların su emme değerleri artan sıcaklıkla azalmış; 1100 °C'de açık ve bağlantılı gözenekler nedeniyle yüksek, 1150 °C'de süreksiz porozite ve küçük gözenekler nedeniyle daha düşük, 1200 °C'de ise kapalı ve bağlantısız porozite nedeniyle en düşük seviyede bulunmuştur. Su emmedeki bu azalma, aynı sıcaklıkta, agregaların yüzeyinde camsı yapı oluşumuna bağlanmıştır [32,33]. Ayrıca, bağlayıcı oranının artırılması (bağlayıcı türünden bağımsız olarak) su emme değerlerinde azalmaya yol açmıştır [34]. Genel olarak, tüm agrega türlerinde artan sinterleme sıcaklığıyla toplam porozite azalmıştır.

Geetha ve Ramamurthy [35], soğuk bağlanmış agregaların yığın yoğunluğu, porozite ve su emme özelliklerini incelemiştir. Bağlayıcı oranındaki artış, dayanımı artırmış, açık poroziteyi azaltmış ve böylece su emme değerlerini düşürmüştür. Kür periyodu sonrasında agregaların yığın yoğunluğu ölçülmüş ve 750–980 kg/m³ aralığında bulunmuştur; bu değerler normal ağırlıklı agregaların yoğunluklarından düşüktür. Bu durum, hammadde özgül ağırlığı ve agrega tanelerindeki gözenek varlığı ile açıklanmıştır. Bağlayıcı miktarının artışı, ince malzeme (uçucu kül) ile bağlayıcı arasındaki puzolanik reaksiyon sayesinde daha fazla hidratasyon ürünü oluşmasına ve daha yoğun, daha az açık poroziteli bir yapının oluşmasına yol açmıştır. Böylece su emme değerleri düşmüştür. Çimentoyla bağlayıcı oranının

%44,2'den %32'ye, kireçle ise %35'e düşmesi porozite azalmasına örnek teşkil etmektedir.

Baykal ve Döven [36], uçucu küle %8 oranında çimento ve kireç bağlayıcı eklenmesinin soğuk bağlanmış hafif agregaların fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bağlayıcılarla üretilen peletlerin birim ağırlıkları artış göstermiş, bağlayıcı eklenmesi agregaların özgül ağırlığını yükseltmiş, porozite ve su emme oranlarını ise azaltmıştır. Katkısız uçucu kül peletlerine kıyasla, kireç ve çimento eklenmesiyle özgül ağırlık %3–4 artarken, su emme değerleri %4–9 azalmıştır.

Gesoglu ve ark. [37], farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip uçucu küllerden üretilen soğuk bağlanmış hafif agregaların özgül ağırlıklarını 1,72–1,80 aralığında bulmuş; su camı ve şerbet ile işlem görmüş belirli bir agrega grubunda su emme oranı ağırlıkça %27'den sırasıyla %3,0 ve %18'e düşmüştür.

Soğuk bağlanmış uçucu kül hafif agregalarının geçirgenliği, normal ağırlıklı agregalara ve sinterlenmiş hafif agregalara kıyasla daha yüksek bulunmuş ve bu durum su emme oranlarının da yüksek olmasına yol açmıştır [38].

2.1.3.2 Hafif Agregaların Mekanik Özellikleri

Doğal iri agregaların dayanımı, ana kaya üzerinde yapılan deneylerle belirlenebilirken, yapay hafif agregalar için aynı yöntem uygulanamamaktadır. Bu nedenle, ASTM C 131, BS 812-110 ve BS 812-111'de tanımlandığı üzere, hafif peletlerin dayanımlarını değerlendirmek amacıyla Los Angeles aşınma testi, agrega kırılma değeri (ACV) ve %10 ince malzeme testi gibi dolaylı yöntemler kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra, peletlerin dayanım değerlerini hesaplamak için denklem 2.1'den yararlanılmıştır

$$\sigma = \frac{2.8 * \mathrm{p}}{\pi * \mathrm{X}^2} \tag{2.1}$$

Burada P kırılma yükünü, X ise yükleme noktaları arasındaki mesafeyi ifade etmektedir [30, 39-42].

Nilsen ve ark. [43], granüler mekaniği teorisinin ve gerilme döngüsü nedeniyle oluşan enerji yitiminin, hafif peletlerin basınç dayanımını tahmin etmek ve kalitesini değerlendirmek için kullanılabileceğini önermiştir. Yang ve Huang [44] ise, farklı hacim oranlarında peletlerin dayanım değişim eğilimini gözlemleyerek

mikromekanik tabanlı sayısal bir yöntem geliştirmiştir. Tangtermsirikul ve Wijeyewickrema [45], soğuk bağlanmış uçucu kül agregalarının dayanımını tahmin etmek için bir yöntem önermiş ve kırılma düzlemindeki çekme gerilimini hesaplamak üzere denklem 2.2 geliştirilmiştir.

$$\sigma_t = \frac{2*P}{R_0^2} \tag{2.2}$$

Bu denklemde σt çekme gerilimini, P kırılma anındaki yükü, R_0 ise peletin üç farklı yöndeki ortalama yarıçapını ifade etmektedir.

Wasserman ve Bentur [46], hafif agregaların mekanik kalitesini değerlendirmek için kırılma dayanımı değerlerini kullanmıştır. Bu değer, hafif agregalarla doldurulan silindirin yükleme altındaki kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Çamur/kil oranı arttıkça hafif agregaların kırılma dayanımı, darbe direnci ve aşınma dayanımı azalmıştır [33]. Lytag agregaları 1300 °C'de sinterleme sonrası hızlı soğutulduklarında yüzey çatlakları nedeniyle kırılma dayanımlarında düşüş göstermiştir [46]. 1250–1300 °C'de sinterlenen Lytag agregaları daha düşük poroziteye sahip olmalarına rağmen, mineralojik değişim, çatlaklar ve termal gerilme kaynaklı iç kusurlar nedeniyle daha düşük dayanım sergilemişlerdir.

Kockal ve Ozturan [30], bentonit ve cam tozu bağlayıcıları kullanarak farklı oranlarda hazırlanan uçucu kül agregalarının fiziksel özellikleri ve kırılma dayanımlarını incelemiştir. Peletler 1100 °C, 1150 °C ve 1200 °C'de sinterlenmiştir. Bağlayıcı içermeyen agregaların dayanımı, tüm sıcaklıklarda sinterleme ile sürekli artarken; bağlayıcı içeren agregalar (bağlayıcı türünden bağımsız olarak) en yüksek dayanımı 1150 °C'de göstermiştir. 1200 °C'de ise pelet genleşmesi ve bağlayıcıların ergimeye bağlı mineralojik değişimleri nedeniyle dayanım düşüşü rapor edilmiştir [29, 39, 47-49].

Baykal ve Döven [36], uçucu küle %8 oranında çimento ve kireç bağlayıcı ekleyerek üretilen soğuk bağlanmış hafif agregaların 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde kırılma dayanımlarını incelemiştir. Çimento katkılı agregalar ilk 14 gün boyunca daha yüksek dayanım göstermiştir. Ancak, 28 gün sonunda kireç katkılı agregaların dayanımları çimento katkılılara kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Her iki bağlayıcı katkısı da yalnız uçucu kül agregalarına göre daha yüksek dayanım sağlamıştır.

Gesoglu ve ark. [51], farklı yüzey alanı ve CaO içeriğine sahip iki uçucu kül grubu kullanarak soğuk bağlanmış hafif agregaların özelliklerini incelemiştir. Bağlayıcı kullanılmadan üretilen peletler su camı ile yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Yüksek yüzey alanına ve düşük CaO içeriğine sahip uçucu külden üretilen agregalar daha yüksek dayanım göstermiştir. Ancak düşük yüzey alanı ve yüksek CaO içeriğine sahip ikinci grup agregaların su camı ile işlem görmesi, bu agregaların dayanımında belirgin artış sağlamıştır. Bunun nedeni, su camının yüksek CaO içerikli çimentomsu malzemelerin hidratasyonunu artırması, agreganın yüzey çatlaklarını iyileştirmesi ve $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek dayanımın temel kaynağı olan C-S-H (tobermorit jeli) fazını üretmesidir [52].

Bir agrega tanesinin mekanik kalitesi, yoğunluk, gözenek boyutu ve dağılımı, su emme oranı, agrega şekli (küresel agregalar daha yüksek dayanım gösterir), yüzey çatlakları, genleşme, bağlayıcıların ergime sıcaklığı ile sinterleme ve termal gradyanlara bağlı mineralojik değişim ve yoğunlaşma etkileri gibi birçok birbiriyle ilişkili faktör tarafından belirlenmektedir [53, 54]. Genel olarak, literatür incelemeleri, hafif agrega üretiminde kullanılan ince partiküllerin varlığının, peletlerin su camı ve şerbet ile yüzey işlemine tabi tutulmasının (porozite ve su emmenin azalması), ayrıca sinterleme sürecinin (iç kusur oluşmadığı durumda açık porozitenin azalması) hafif agregaların mekanik özellikleri üzerinde avantaj sağladığını göstermektedir.

2.2 MgO Çimentosu

Reaktif magnezyum oksit (MgO) çimentosu (RMC), üretimi sırasında kullanılan daha düşük kalsinasyon sıcaklıkları da dahil olmak üzere Portland çimentosuna (PC) kıyasla bazı avantajlar sunar (örn. 700-1000 °C vs. 1450 ºC) ve Atmosferik CO_2'yi kalıcı olarak kararlı karbonatlar halinde emerek ve depolayarak mukavemet kazanır. [55-59] Son dönemde yürütülen bazı araştırmalar, magnezyum oksit çimentosunun çevresel açıdan Portland çimentosuna göre sürdürülebilir olduğunu ve betonun mekanik dayanımı ile hızlı priz alma özelliklerine olumlu katkılar sağladığını ortaya koymuştur. [60, 61]

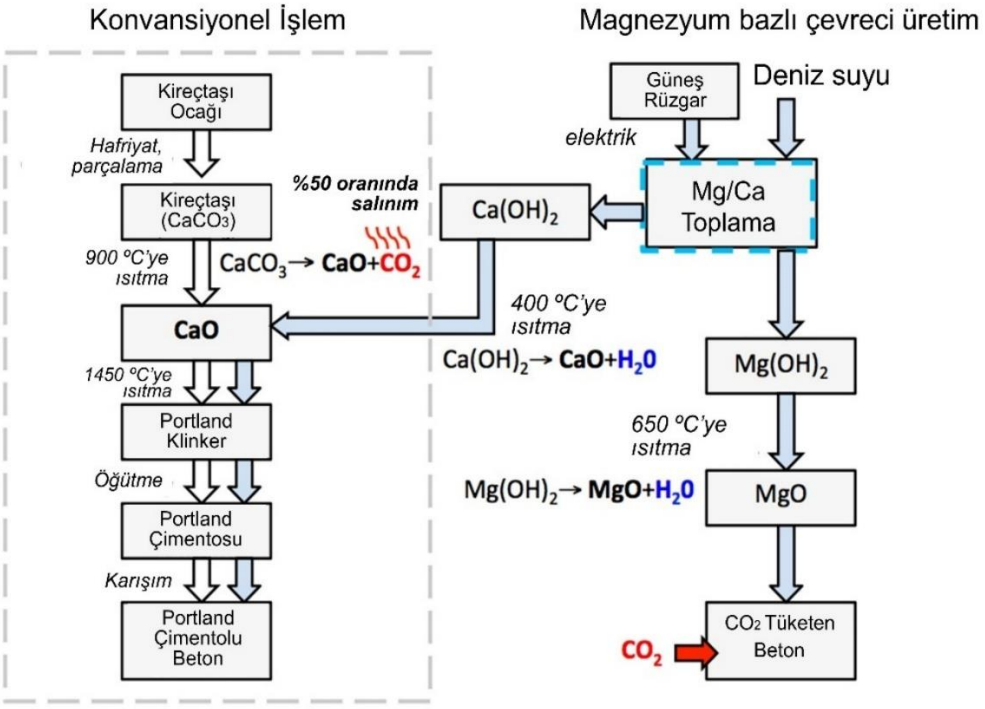
Ayrıca, çevre dostu bir magnezyum oksit hammaddesi olan magnezyum hidroksit denizlerde bol miktarda bulunmakta olup, mineralin deniz suyundan elde edilmesine yönelik çalışmalar literatürde geniş yer bulmaktadır. [61, 62]

Magnezyum oksit bir hidrolik bağlayıcı olarak su ile sertleşmekle birlikte karbondioksiti de bağlayarak daha yüksek mekanik gelişim gösterebilmektedir. Bu önemli özelliği düşünerek yapay agrega üretiminde bağlayıcı olarak magnezyum oksit kullanmak üretilen yapay agregaların karbon tutma kapasitesini artırmaktadır. Agregaların betonda hacimce %70 mertebesinde kullanıldığı düşünüldüğünde, bu yöntemle üretilmiş yapay agrega kullanıldığında beton içerisinde karbon stoklamak için önemli bir rezerv elde etmek mümkün olabilir.

Ticari olarak üretilen magnezyum oksit, periklazın doğada nispeten nadir bulunması ve hidratasyon ürünün brusit [$Mg(OH)_2$]'in ticari olarak uygulanabilir sınırlı sayıda jeolojik oluşumda bulunması nedeniyle doğrudan çıkarılamaz. MgO ise genellikle, çıkarılmış magnezit yataklarının ($MgCO_3$) kalsinasyonundan kuru bir yolla veya magnezyum içeren tuzlu su veya deniz suyu çözeltilerinden ıslak bir yolla elde edilir. Islak yol ile üretim için daha yüksek enerji gereksinimi nedeniyle, dünya çapındaki MgO üretiminin büyük bir kısmı magnezitin kalsinasyonu ile elde edilir. [63,64]

$$MgCO_3 + \text{ısı} \longrightarrow MgO + CO_2 \qquad (2.3)$$

MgO esas olarak doğal minerallerden elde edilir ve kalsinasyon sıcaklığına göre hafif yanık/reaktif (700-1000 °C), sert yanık (1000-1400 °C) ve tam yanık (1400-2000 °C) olarak sınıflandırılır. Bunlar arasında hafif yanık MgO, RMC'de bulunan ana faz olan en reaktif olanıdır.[65]



Şekil 2.4 Konvansiyonel Portland Çimentosu üretim ve magnezyum esaslı çevreci üretim süreçleri.

2.3 Karbonatlaşma

Karbonatlaşma, atmosferik CO_2'nin harç veya betona difüze olması durumunda çimento esaslı malzemelerin özelliklerini etkileyen doğal bir süreçtir. [66]

Magnezyum hidroksitin doğrudan yapısal malzeme olarak kullanımına odaklanan çalışmalar sınırlı olmakla birlikte, mevcut sonuçlar umut vericidir ve magnezyum hidroksit esaslı çimentoların dayanım gelişiminin CO_2 derişimi ve kür süresine bağlı olduğunu göstermektedir [67].

CO_2 kürü sırasında magnezyum hidroksitte aşağıdaki karbonatlaşma reaksiyonları gerçekleşebilir; hangi reaksiyon(lar)ın baskın olacağı ise sıcaklık ve basınç koşulları gibi çeşitli parametrelere bağlıdır:

$$Mg(OH)_2+CO_2+2H_2O \rightarrow MgCO_3 \cdot 3H_2O \text{ (Nesquehonite)} \quad (2.4)$$

$$5Mg(OH)_2+4CO_2 \rightarrow 4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 4H_2O \text{ (Hydromagnesite)} \quad (2.5)$$

$$5Mg(OH)_2+4CO_2+H_2O \rightarrow 4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 5H_2O \text{ (Dypingite)} \quad (2.6)$$

Nesquehonite, hidromagnezit ve dypingite, çimentolaşarak mikro yapıyı yoğunlaştırabilen magnezyum karbonatlar olup, ortaya çıkan magnezyum esaslı çimento matrisinin mekanik özelliklerini belirlemektedir [68]. Portland çimentosu ve MgO çimentosunun aksine, magnezyum hidroksit hidrolik olmayan bir bağlayıcıdır ve hidratasyon yoluyla priz almaz; bu nedenle statik sıkıştırma gibi özel kalıplama tekniklerine ihtiyaç duyar. Statik sıkıştırma, CO_2 kürü öncesinde magnezyum hidroksit şerbetlerine uygulanarak boşluk oranını azaltmakta ve partiküller arasındaki temas noktalarının sayısını artırmaktadır. Bu teknik kullanıldığında, malzeme yoğunlaştıkça basınç dayanımı optimum sıkıştırma basıncına kadar artmaktadır. Ancak, daha ileri düzeyde yoğunlaştırma, CO_2 moleküllerinin mikro yapıya difüze olabileceği yolları tıkayarak karbonatlaşma hızını yavaşlatabilmektedir [69], [70], [71].

2.4 Hafif Betonlar

Son dönemde, hafif agregalı beton kullanımının, kiriş, kolon, döşeme ve temel gibi taşıyıcı elemanların kesit alanlarını azaltarak yapının ölü yükünü düşürmesi ve dolayısıyla çelik donatı kullanımında olası azalmaya yol açması nedeniyle, bu beton türünün geliştirilmesine yönelik ilgi artmıştır [72-74, 75, 76]. Ölü yükteki bu azalma, köprülerde daha geniş açıklıkların elde edilmesine (örneğin Norveç'teki yüksek performanslı hafif yüzer köprüler gibi), daha yüksek yapıların inşa edilebilmesine ve ayrıca deprem yüklerinin doğrudan yapı kütlesiyle orantılı olması sebebiyle deprem riskinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [77, 78]. Bunun yanı sıra, hafif beton kullanımı daha yüksek dayanım/ağırlık oranı, gelişmiş çekme dayanımı kapasitesi ve hafif agregalarda bulunan hava boşlukları sayesinde üstün ısı ve ses yalıtım özellikleri sunmaktadır [73, 76, 79]. Öte yandan, hafif betonun yüksek geçirgenliği, suyun ve zararlı maddelerin betona nüfuz etmesine yol açarak betonun bozulmasına ve klorür geçişi sonucu donatının korozyona uğramasına neden olmaktadır [76, 79].

Hafif betonun temel bileşeni agrega olduğundan, hafif agregaların özellikleri ve davranışlarına ilişkin yeterli bilginin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Hacimsel oran açısından değerlendirildiğinde, harç matrisine kıyasla daha düşük dayanım ve elastisite modülüne sahip hafif agregaların kullanımı, hafif agregalı

betonun basınç dayanımı ve elastisite modülünün belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır [44, 74].

Hafif agregaların üretim koşulları ve üretimde kullanılan hammaddeler bakımından çok sayıda farklılık söz konusudur. Bu nedenle hafif agregalar oldukça geniş bir özellik yelpazesine sahiptir. Ancak bu geniş çeşitliliğe rağmen, yalnızca uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kil, şeyl ve arduvazdan üretilen agregalar, beton üretiminde kullanılabilecek yeterli dayanım özelliklerine sahiptir.

Zhang ve Gjorv'un [80] çalışmasına göre, Avrupa pazarlarında tane şekli, yüzey dokusu ve gözenek yapısı bakımından farklılık gösteren yüksek dayanımlı hafif agregalar bulunmaktadır. Agregaların gözeneklerinin büyük çoğunluğunun açık yapıda olması nedeniyle su emme konusu tartışmalı hale gelmiştir. Deneyler, toplam 24 saatlik su emme miktarının yarısından fazlasının ilk 30 dakika içerisinde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Su emiliminin azaltılması ve hafif agregaların dayanımının artırılması amacıyla, peletlerin su camı ($Na_2O \cdot SiO_2$) ile kaplanması, yüzeyin ısıtılması (eğer peletler sinterleme sıcaklığının üzerinde sinterlenmişse) ya da agrega tanelerinin çimento veya silis dumanı şerbetine daldırılması gibi yüzey işlemleri kritik öneme sahiptir [81, 82].

Zhang ve Gjorv'un [83] çalışmasına göre ise, genleşmiş kil ve sinterlenmiş uçucu kül gibi hafif agregalar ile çimento hamuru arasında etkin bir puzolanik reaktivite bulunmamaktadır. Araştırmacılar, mineral bileşiklerin yeniden kristalleşmesinin düşük puzolanik reaktivitenin temel nedeni olduğunu belirtmişlerdir.

Yaklaşık 300–2000 kg/m³ yoğunluk aralığında ve 1–60 MPa dayanım aralığında üretilen hafif betonlar, 2100–2500 kg/m³ yoğunluk ve 15 MPa'dan 100 MPa'nın üzerine kadar değişen dayanım değerlerine sahip normal ağırlıklı betonlarla karşılaştırılabilmektedir [84].

Soğuk bağlanmış uçucu kül peletleri kullanılarak üretilen hafif betonların (LWC) basınç dayanımı 60 MPa seviyesine kadar ulaşmıştır. Farklı LWC gruplarında elde edilen basınç dayanımı değerleri, her grupta kullanılan hafif agrega (LWA) özellikleriyle doğrudan ilişkili bulunmuştur [51]. Bununla birlikte, önceki çalışmaların da ortaya koyduğu üzere [77, 85, 86], daha yüksek miktarda LWA kullanımı LWC'lerin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir.

Gesoglu ve arkadaşları [85], LWC'lerin basınç dayanımı, statik elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerini incelemiş ve bu değerlerin sırasıyla 20,8–47,3 MPa, 14,2–24,4 GPa ve 1,86–3,94 MPa aralığında değiştiğini rapor etmiştir. Silis dumanı ilavesi (bağlayıcı miktarının artırılması) ve hafif iri agrega hacim oranının azaltılması, söz konusu mekanik özelliklerin tamamında iyileşmeye yol açmıştır. Ayrıca, ACI sınırlamalarına göre, taze betonların yoğunluğu görece yüksek değerler göstermiş ve 1950–2170 kg/m³ aralığında bulunmuştur. Bu durumun, karışımda yüksek miktarda çimento ve ince agrega olarak doğal kum kullanılmasından kaynaklandığı daha önceki çalışmalarda da belirtilmiştir [87].

Gesoglu ve arkadaşlarının [37] yürüttüğü bir diğer araştırmada ise, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip LWA'lar kullanılarak üretilen LWC'lerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü incelenmiştir. Ayrıca, bazı LWA grupları su camı ve şerbet ile yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Su camı ile kaplanmış LWA'larla üretilen LWC'ler, şerbet ile işlenmiş olanlara kıyasla daha yüksek mekanik özellikler sergilerken; herhangi bir yüzey işlemine tabi tutulmamış LWC'ler en düşük değerlere sahip olmuştur.

Kockal ve Ozturan [38], cam tozu (LWGC) ve bentonit (LWBC) katkılı sinterlenmiş hafif uçucu kül agregaları ile üretilen LWC'lerin yanı sıra, sinterlenmemiş soğuk bağlanmış uçucu kül agregaları (LWCC) kullanılarak üretilen LWC'lerin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Taze betonlarda hava içeriği, çökme ve yoğunluk değerleri sırasıyla LWCC için %3,9, 15 cm ve 1991 kg/m³; LWBC için %4,3, 15,5 cm ve 1960 kg/m³; LWGC için ise %4,1, 16,5 cm ve 1975 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Sertleşmiş betonların 28. gün basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri ise sırasıyla; LWCC için 42,3 MPa, 3,7 MPa ve 19,6 GPa; LWBC için 53,5 MPa, 4,8 MPa ve 26,0 GPa; LWGC için 55,8 MPa, 4,9 MPa ve 25,7 GPa olarak bulunmuştur.

2.4.1 Hafif Betonun Mekanik Özellikleri

Yapısal hafif betonun basınç dayanımı, yoğunluk ile doğrudan ilişkilidir. Yoğunluk arttıkça basınç dayanımı da artmaktadır. Basınç dayanımındaki artış, beton yapıların rekabet gücünün gelişmesine katkı sağlamaktadır. Sertleşmiş hafif beton için 75 MPa basınç dayanımı ve 1940 kg/m³ yoğunluk değerleri rapor edilmiştir.

Hafif beton köprülerde ise basınç dayanımı gerekliliği 50–60 MPa aralığındadır [88].

Basınç dayanımını etkileyen faktörler, hafif agregalı betonlarda çekme dayanımını da etkilemektedir. Ancak, bu betonlarda kırılma yüzeyi ve su içeriği farklılık göstermektedir. Hafif agregalarda kırılma hattı agrega gövdesinden geçmekte ve su emme nedeniyle nem gradyanlarının oluşması sonucu su içeriği daha yüksek olmaktadır. Buna karşılık, normal betonda kırılma hattı agreganın çevresinden geçmekte ve su içeriği daha düşük kalmaktadır [84]. Genel olarak, hafif agregalı betonların elastisite modülü, aynı dayanım seviyesindeki normal betonların yaklaşık yarısıdır [88]. Literatürde, beton dayanımını etkileyen en önemli faktörün agrega dayanımı olduğu belirtilmektedir. Hafif agregalarda, basınç dayanımı artarken elastisite modülü azalmakta ve maksimum yük altındaki nihai birim şekil değiştirme, normal ağırlıklı betona kıyasla artmaktadır.

Normal ve hafif betonlarda kür koşullarının dayanım üzerindeki etkisi de incelenmiştir. İki farklı yapısal hafif beton (35 ve 50 MPa) ile doğal agrega içeren normal beton kullanılarak yapılan deneylerde, hafif beton için ilk 7 günlük kür ve deniz kenarı koşullarına maruz bırakma daha iyi dayanım gelişimi sağlamıştır. Buna karşılık, normal betonlarda sürekli su kürü en yüksek dayanım gelişimini ortaya koymuştur [89, 90].

Yüksek dayanımlı hafif betonlarda kür koşullarının dayanım ve elastisite modülü üzerindeki etkileri de araştırılmıştır [91]. Farklı sürelerde (7 ve 28 gün) ve farklı koşullarda (hava kürü, polietilen örtü altında nemli kür, %100 nemli kür ve değişik sıcaklıklarda su kürü) yapılan deneyler sonucunda, su kürü ve polietilen örtü altındaki nemli kür en yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülünü sağlamıştır. Bununla birlikte, basınç dayanımı ve elastisite modülünün, kür koşullarından bağımsız olarak birbirine doğrudan orantılı olduğu görülmüştür.

Güneyisi ve arkadaşlarının [92] çalışmasında, kauçuk katkı oranının artışıyla birlikte, silis dumanı katkılı ya da katkısız kauçuklu betonlarda basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülünde belirgin azalmalar rapor edilmiştir. Kauçuk ve silis dumanı bulunmayan ve su/çimento oranı 0,60 olan normal betonlarda bu değerler sırasıyla 53,8 MPa, 3,1 MPa ve 33,1 GPa iken; aynı

su/çimento oranında %50 kauçuk ve %20 silis dumanı ilavesiyle üretilen betonlarda değerler sırasıyla 8,6 MPa, 0,8 MPa ve 6,5 GPa'a düşmüştür. Su/çimento oranının 0,60'tan 0,40'a düşürülmesi durumunda, katkısız normal betonun basınç ve çekme dayanımları ile elastisite modülü sırasıyla 75,8 MPa, 4,1 MPa ve 45,9 GPa'a yükselmiştir. Ancak aynı su/çimento oranında %50 kauçuk ve %20 silis dumanı katkısı bulunan betonlarda bu değerler sırasıyla 11,7 MPa, 1,0 MPa ve 8,2 GPa olarak bulunmuştur.

Eldin ve Senoci'nin [93] çalışmasına göre, ince agreganın tamamen öğütülmüş kauçuk ile değiştirilmesi basınç dayanımında %65, yarmada çekme dayanımında ise yaklaşık %50 azalmaya yol açmıştır. Daha da kritik olan durum, iri agreganın tamamen lastik parçalarıyla değiştirilmesi sonucunda basınç dayanımının %85 oranında düşmesidir. Bununla birlikte, her iki durumda da kauçuk katkılı beton örnekleri sünek kırılma davranışı ve yüksek enerji yutma kapasitesi sergileyerek eğilme dayanımında ve darbe direncinde artış göstermiştir.

Pelisser ve arkadaşları [94], beton karışımına lastik parçalarının eklenmesinin basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerindeki etkilerini incelemiş; üç farklı beton türü üretmişlerdir: normal Portland çimentosu betonu, lastik katkılı beton ve silis dumanı ile modifiye edilmiş lastik katkılı beton. Lastik katkısı, referans betona kıyasla basınç dayanımı ve elastisite modülünde ciddi azalmaya neden olmuştur. Ancak, silis dumanı katkısı, lastik katkılı betonlarda bu mekanik özelliklerin önemli ölçüde iyileştirilmesini sağlamıştır.

Liu ve ark. [95], Khaloo ve ark. [96] ile Turatsinze ve Garros'un [97] yürüttükleri çalışmalarda da beton karışımındaki kauçuk oranının artışıyla birlikte, basınç dayanımı ve elastisite modülünde ciddi düşüşler gözlemlenmiştir.

3
DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Çalışmanın Metodu

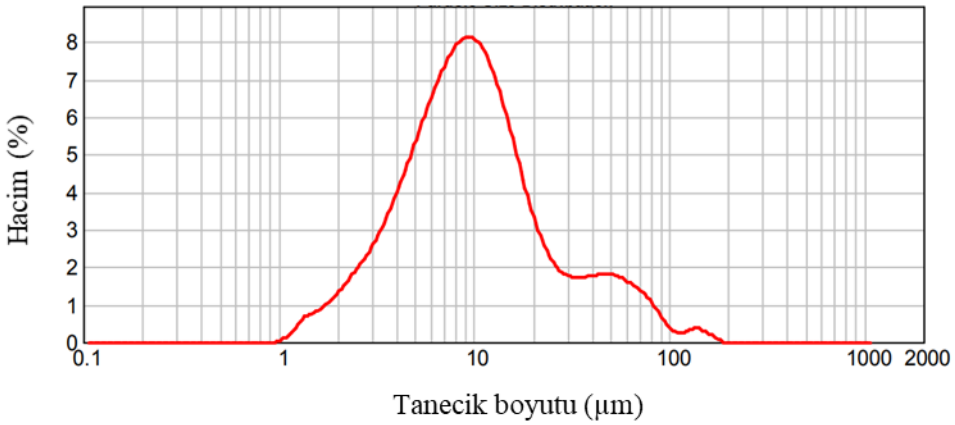
Çalışmada magnezyum oksit yapay agrega üretiminde bağlayıcı olarak kullanılacaktır. Yapay agregaların farklı yoğunluklarda ve dayanımlarda olması için bazı yapay agrega gruplarının içerisinde ince kum ve magnezyum hidroksit kullanılacaktır. Yapay agregaların dane çapının 4 mm ile 22 mm arasında olması ve beton içerisinde iri agrega olarak kullanılması hedeflenmektedir. Üretilen agregalar karbonatlaştırıldıktan sonra fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için test edilecektir.

3.2 Ön Deney Çalışması

Çalışmada agrega üretimi saflığı %98 üzerinde olan reaktif magnezyum oksit çimentosu ve saf su kullanılarak elle yapılmıştır. Buna göre su bağlayıcı oranı her karışımda 1,3 olacak şekilde ayarlanmıştır. Çalışmada kullanılan magnezyum oksitin tanecik dağılımı Şekil 3.1'de verilmiştir. Çalışmada agregaların tanecik dayanımlarının ölçüm yöntemi agreganın çekme dayanımın da önemli ölçüde etkisi altındadır. Bu sebeple çalışmada agrega karışımlarına hacimce %0,1 oranında polipropilen lif ilavesi yapılmıştır. Kullanılan polipropilen liflerin özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Polipropilen lifin özellikleri

Uzunluk	**Çap**	**Narinlik**	**Çekme Mukavemeti**	**Elastisite Modülü**	**Özgül Ağırlığı**	**Erime Noktası**
(mm)	**(µm)**		**(MPa)**	**(Gpa)**		**(ºC)**
12	32	375	250	3,5	0,9	165



Şekil 3.1 Agrega üretiminde kullanılan magnezyum oksit çimentosunun tanecik dağılımı

Malzemeler karıştıktan sonra elle yuvarlanarak iri agrega taneleri elde edilmiştir. Bu yapay agregaların yarısı 25 ºC sıcaklıkta %80 nem seviyesindeki karbondioksit kabininde %10 konsantrasyonda 7 gün boyunca kür edilmiştir. Diğer yarısı ise yine 25 ºC sıcaklıkta %70 nem seviyesinde hava ortamında 7 gün boyunca kür edilmiştir. Buna göre gruplar Tablo 3.2'de gösterildiği gibi kodlanmıştır.

Tablo 3.2 Yapay agregaların numune kodlaması

Numune	Lif Takviyesi	Karbondioksit Kürü	Hava Kürü
RA	Yok	Yok	Var
RC	Yok	Var	Yok
PPA	Var	Yok	Var
PPC	Var	Var	Yok

Daha sonra yapay agregalarda Şekil 3.2'de görüldüğü gibi yükleme yapılmış ve tanecik dayanımları denklem 3.1'de verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Yükleme hızı (0,1 x çap) mm/dak olacak şekilde belirlenmiştir.

$$\sigma_{Tanecik} = \frac{2.8}{\pi} \times \frac{(Kırılma\ Yükü)}{(Tanecik\ Çapı)^2} \quad (3.1)$$



Şekil 3.2 Agrega tanecik dayanım deneyi

Agregaların kütleleri ve iki farklı eksenden çapları tanecik dayanımı testi öncesinde tek tek ölçüldü. Böylece agregaların yaklaşık yoğunlukları ve tanecik çapları belirlendi. Agregaların ortalama tanecik yoğunlukları Tablo 3.3'te, denklem 3.1'e göre hesaplanan ortalama tanecik dayanımları ise Tablo 3.4'te verilmiştir. Tanecik yoğunluğu karbondioksit kürü sonrasında lifli grup ve referans grup için sırasıyla %62,3 ve %46,8 kadar artmıştır. İki gruba ait karbondioksit kürü sonrası ortalama yoğunluk artışı ise %56 seviyesinde hesaplanmıştır. Yine polipropilen lifli yapay agregaların yoğunluklarındaki bu fazladan artış daha çok karbonatlaşma belirtisi olarak değerlendirilebilir. Havada kür edilen yapay agregaların ise yoğunlukları 1 gr/cm^3'ün altında kalmıştır. Agregaların yoğunluklarına genel olarak bakıldığında ise tüm gruplar hafif agrega olarak kullanılma potansiyeline sahiptir denilebilir.

Tablo 3.3 Agregaların ortalama yoğunlukları

Grup	**PPC**	**RC**	**PPA**	**RA**
Yoğunluk (g/cm^3)	**1,61 ± 0,17**	**1,38 ± 0,07**	**0,99 ± 0,08**	**0,94 ± 0,07**

Tablo 3.4 Agregaların ortalama tanecik dayanımları

Grup	**PPC**	**RC**	**PPA**	**RA**
Tanecik dayanımı (MPa)	**2,29 ± 0,42**	**2,05 ± 0,41**	**0,54 ± 0,21**	**0,68 ± 0,27**

İki gruba ait karbondioksit kürü sonrası ortalama tanecik dayanımı artışı ise %261 olarak belirlenmiştir. En yüksek tanecik dayanımı PPC grubunda elde edilmiştir ve 2,29 MPa seviyesindedir. Karbondioksit kürüne maruz bırakılan polipropilen lifli yapay agregaların daha yüksek tanecik dayanımına sahip olması bu agregaların karbonatlaşma seviyesinin diğer gruplara göre daha fazla olmasından kaynaklanabilir. Liflerin çekme mukavemeti üzerinden tanecik dayanımını olumlu etkilemesi durumu ise magnezyum oksitli yapay agregalarda çalışmamış olabilir. Çünkü hava kürüne maruz bırakılan agregalarda lifli olan grup lifsiz olan gruba göre %21 daha düşük tanecik dayanıma sahip olmuştur. Ayrıca karbondioksit kürüne maruz bırakılan polipropilen lifli grubun yoğunluk ve kütle kaybı değerlerinin diğer gruplara göre belirgin bir seviyede daha iyi çıkması da tanecik dayanımı sonuçlarında etkili olmuştur.

Ön deney çalışması neticesinde hava kürüne maruz bırakılan grupta agregaların dayanımının düşmesi ve bu agregaların yoğunluk ve kütle kaybının daha fazla olması nedeni ile hava kürü ile agrega üretiminin yapılamaması düşünülmüştür. Ayrıca lif takviyesinin mekanik özellikleri belirgin bir şekilde arttırmaması sebebi ile lif yerine MgO çimentosu yanında alternatif ürünler kullanılacaktır. Kür süresinin etkisinin araştırmak için 3 ve 14 gün kürleme yapılması kararlaştırılmıştır.

3.3 Yapay Agrega

3.3.1 Yapay Agrega Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

MgO çimentosu özgül ağırlık 3,69 gr/cm³, saflık %99,5'tir.

$Mg(OH)_2$ tozu saflık %96-98 arasında olup özgül ağırlığı 2,36 gr/cm³'tür

Silis kumunun özgül ağırlığı 2,65 gr/cm³'tür.

3.3.2 Yapay Agrega Üretim Aşaması

Magnezyum oksit çimentosu ve su karıştırılarak hamur elde edilmiş ve bu hamura el yordamıyla küresel şekiller verilmiştir. Farklı yüzey pürüzlülüğü ve agrega yoğunluğu elde etmek için bazı gruplarda karışıma magnezyum hidroksit veya ince kum ilave edilerek yapay agrega üretimi gerçekleştirilecektir. Agrega için karışımlar şu şekilde oluşturulmuştur. MgO çimentosu + saf su, MgO çimentosu + Silis kumu + saf su, MgO çimentosu + $Mg(OH)_2$ + saf su.

Kullanılan çimentonun reaktivitesi yüksek olduğu için su ile tepkimeye girdiğinde sınırlı işlenebilirlik sunmaktadır. Bu sebeple çalışmada öncelikle elle işlenebilme kıvamının yakalandığı su bağlayıcı oranı belirlenmiştir.
Karışımlara ait oranlar Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.5 Agrega karışım grupları ve oranları

Grup	S/Ç	Su	MgO(kg/m³)	$Mg(OH)_2$ (kg/m³)	Silis kumu (kg/m³)	Kür süresi
M3	**1**	**787**	**787**			**3**
M14	**1**	**787**	**787**			**14**
MS3	**1,3**	**395**	**304**		**608**	**3**
MS14	**1,3**	**395**	**304**		**608**	**14**
MMH3	**0,67**	**660**	**495**	**495**		**3**
MMH14	**0,67**	**660**	**495**	**495**		**14**

Malzemeler karıştırıldıktan sonra elle yuvarlanarak hazırlanmış ve 25 ºC sıcaklıkta karbondioksit kabininde %10 konsantrasyonda 3 ve 14 günlük olmak üzere kür edilmiştir.



Şekil 3.3 Yapay agrega üretim aşamaları



Şekil 3.4 Yapay agrega üretim aşamaları

Üretilen agregalar karbondioksit küründen önce taze haldeki ağırlıkları ile kür sonrası ağırlıkları tartılarak farklar karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.6 3 günlük kür sonrası ağırlık farkı

MgO + Saf su					
Tepsi	**Tepsi + Agrega (gr)**	**Taze net ağırlık (gr)**	**3 günlük kür sonrası (gr)**	**Net ağırlık (gr)**	**Fark (gr)**
1175	**3145**	**1970**	**3026**	**1851**	**-119**
1165	**3076**	**1911**	**2967**	**1802**	**-109**
1160	**2397**	**1237**	**2327**	**1167**	**-70**
MgO + Mg(OH)2					
Tepsi	**Tepsi + Agrega (gr)**	**Taze net ağırlık (gr)**	**3 günlük kür sonrası (gr)**	**Net ağırlık (gr)**	**Fark (gr)**
1175	**3988**	**2813**	**4017**	**2842**	**29**
1165	**1985**	**820**	**2002**	**837**	**17**
1160	**3822**	**2662**	**3824**	**2664**	**2**
MgO + Silis					
Tepsi	**Tepsi + Agrega (gr)**	**Taze net ağırlık (gr)**	**3 günlük kür sonrası (gr)**	**Net ağırlık (gr)**	**Fark (gr)**
1175	**4386**	**3211**	**4362**	**3187**	**-24**
1165	**4371**	**3206**	**4341**	**3176**	**-30**
1160	**4402**	**3242**	**4324**	**3164**	**-78**

Tablo 3.7 14 günlük kür sonrası ağırlık farkı

MgO + Saf su					
Tepsi	**Tepsi + Agrega (gr)**	**Taze net ağırlık (gr)**	**14 günlük kür sonrası (gr)**	**Net ağırlık (gr)**	**Fark (gr)**
1179	**3773**	**2594**	**3732**	**2553**	**-41**
1160	**4219**	**3059**	**4159**	**2999**	**-60**
1160	**4413**	**3253**	**4351**	**3191**	**-62**
MgO + Mg(OH)2					
Tepsi	**Tepsi + Agrega (gr)**	**Taze net ağırlık (gr)**	**14 günlük kür sonrası (gr)**	**Net ağırlık (gr)**	**Fark (gr)**
1165	**5002**	**3837**	**5232**	**4067**	**230**
1165	**5190**	**4025**	**5434**	**4269**	**244**
1160	**4293**	**3133**	**4519**	**3359**	**226**
MgO + Silis					
Tepsi	**Tepsi + Agrega (gr)**	**Taze net ağırlık (gr)**	**14 günlük kür sonrası (gr)**	**Net ağırlık (gr)**	**Fark (gr)**
1165	**4443**	**3278**	**4446**	**3281**	**3**
1165	**4457**	**3292**	**4416**	**3251**	**-41**
1160	**4200**	**3040**	**4199**	**3039**	**-1**

3 günlük ve 14 günlük kür sonrası kütle değişim oranlarında meydana gelen fark 3 günlük kür süresince agregaların su kaybetmesi ve 14 günlük kür süresince suyun yerini karbondioksitin almasından kaynaklanmaktadır.

3.3.3 Agrega Deneyleri

Elde edilen yapay agrega standartlara uygun şekilde deneylere tabi tutulmuştur. Agregalar çeyrekleme yöntemi ile azaltılarak etüvde 24 saat 40 ºC sıcaklıkta bekletilmiştir.

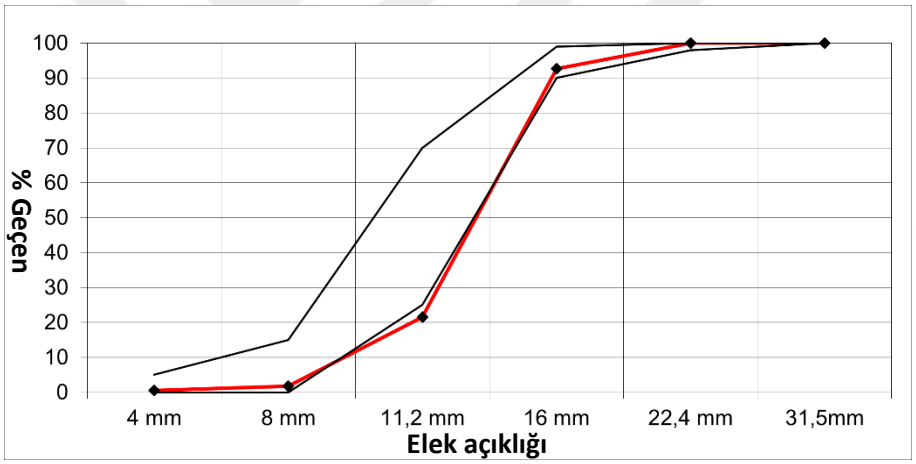


Şekil 3.5 Yapay agrega çeyrekleme yöntemi ve 40 ºC etüv

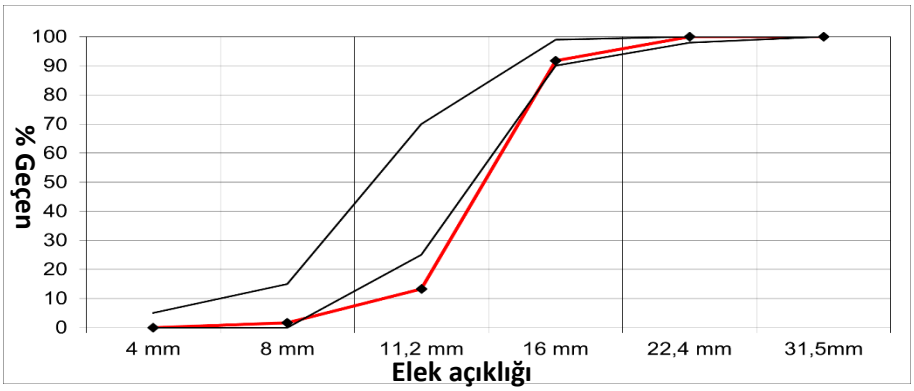
24 saat etüvde bekletilen agregalar TS 3530 EN 933-1 standardına uygun olarak elek analizine tabi tutulmuştur. Ayrıca etüvde bekletilmeden önceki ağırlıkları ve etüvde bekletildikten sonraki ağırlıkları karşılaştırılmıştır. Elek analiz sonuçları Tablo 3.8'de gösterilmiştir. Elek analizlerine ait granülometri eğrileri Şekil 3.6-3.11'de gösterilmiştir. Elek analizine tabi tutulan agregaların ağırlıklı olarak 4mm-16mm arasında kaldığı, el ile yuvarlanarak yapılması sebebi ile ideal granülometriden uzak olduğu görülmektedir.

Tablo 3.8 Elek analizi

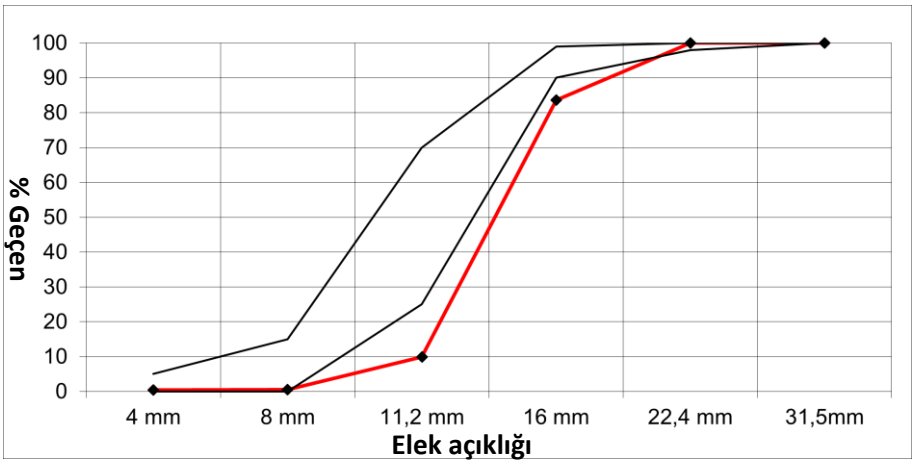
	31,5	22,4	16	11,2	8	4	Doğal ağırlık	Kuru ağırlık
M3	-	-	109	1166	1460	1478	1686	1486
M14	-	-	126	1333	1511	1537	1668	1537
MS3	-	-	322	1769	1952	1956	2050	1963
MS14	-	-	680	1895	1931	1931,6	1985	1935
MMH3	-	-	224	1658	1821	1824	2003	1827
MMH14	-	-	392	1952	2032	2033	2119	2034



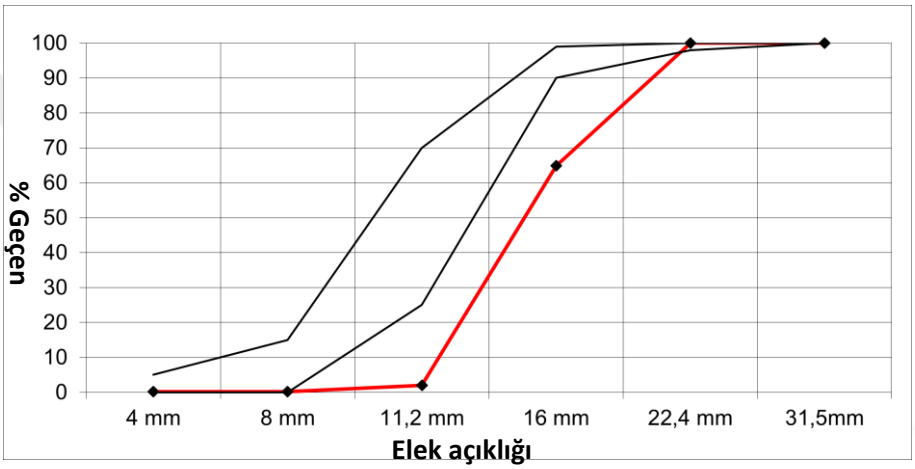
Şekil 3.6 M3 agregası granülometri eğrisi



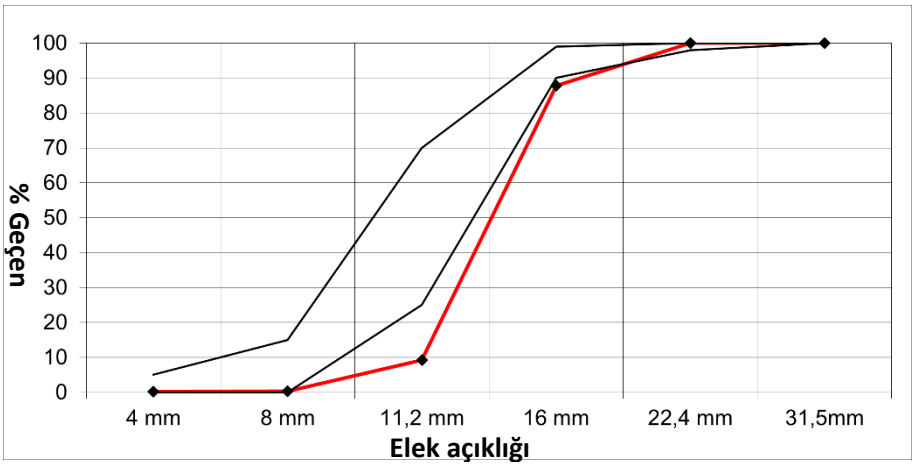
Şekil 3.7 M14 agregası granülometri eğrisi



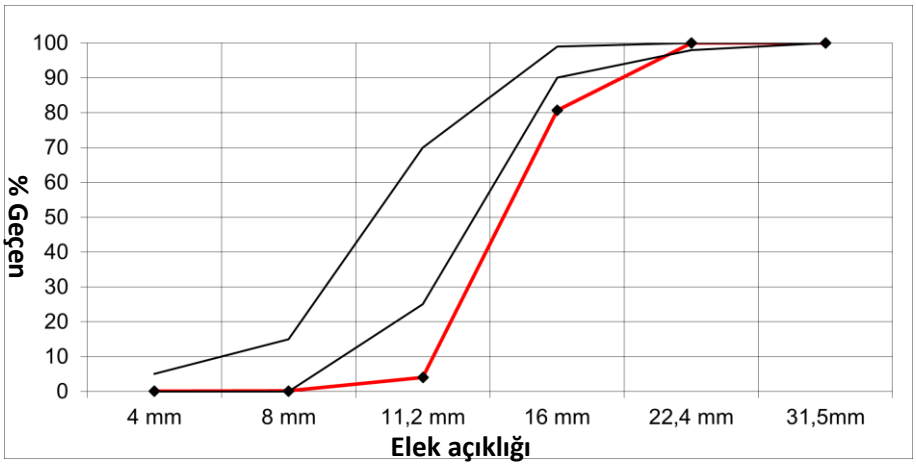
Şekil 3.8 MS3 agregası granülometri eğrisi



Şekil 3.9 MS14 agregası granülometri eğrisi



Şekil 3.10 MMH3 agregası granülometri eğrisi



Şekil 3.11 MMH14 agregası granülometri eğrisi

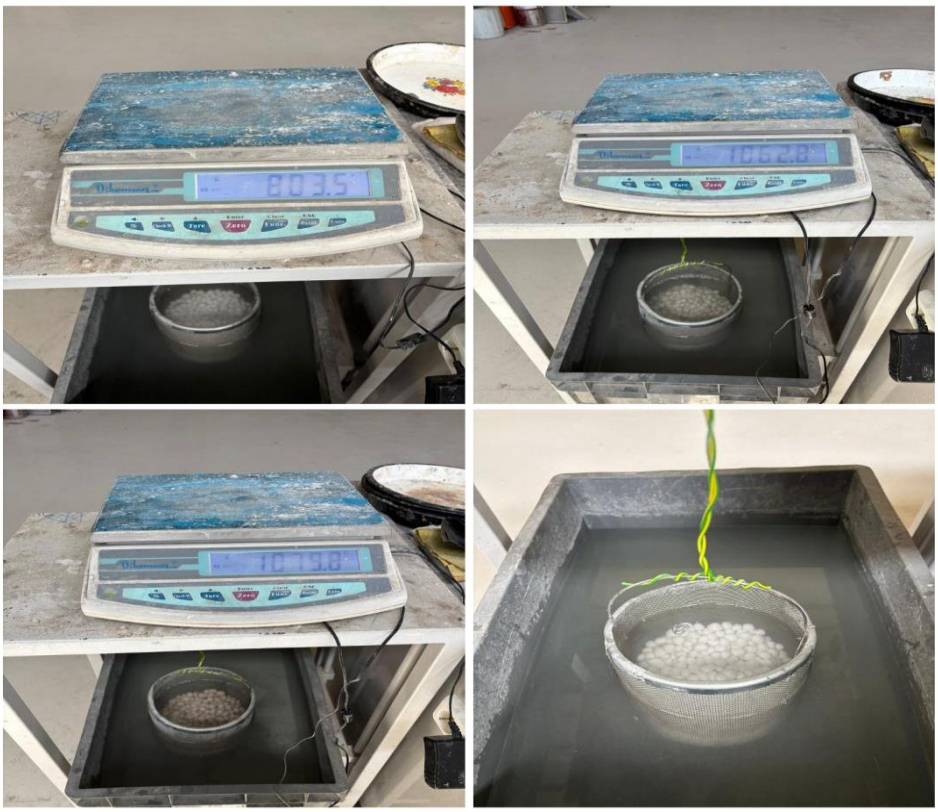
Etüv kurusu ağırlıkları bilinen agregalar kaplara alınarak 24 saat suda bekletildiler. 24 saat suda bekletilen agregaların yüzeyindeki fazla su havlu yardımı ile alınarak doygun kuru yüzey (DKY) haline getirilmiştir (Şekil 3.12). Daha sonra agregalar tartılarak su emme %'si hesaplanmıştır. Agregalara ait su emme yüzdeleri Tablo 3.9'da verilmiştir. DKY haldeki agregalar sepet yardımı ile Şekil 3.13'te görüldüğü gibi suda tartılarak özgül ağırlıkları hesaplanmıştır.



Şekil 3.12 24 saat suda bekletilen agregalar



Şekil 3.13 Su emme deneyi



Şekil 3.14 Özgül ağırlık deneyi

Tablo 3.9 Özgül ağırlık ve su emme deneyleri

	Etüv kurusu (gr)	**Dky (gr)**	**Suda (gr)**	**Görünür (gr/cm³)**	**Etüv (gr/cm³)**	**Dky (gr/cm³)**	**Su emme (%)**
M3	**1483,7**	**1933**	**788**	**2,13**	**1,3**	**1,69**	**30,28**
M14	**1536,7**	**1903**	**803,5**	**2,1**	**1,4**	**1,73**	**23,84**
MS3	**1955,7**	**2255**	**1106**	**2,3**	**1,7**	**1,96**	**15,3**
MS14	**1931,6**	**2173,9**	**1079,8**	**2,27**	**1,77**	**1,99**	**12,54**
MMH3	**1824**	**2134,4**	**956,6**	**2,1**	**1,55**	**1,81**	**17,02**
MMH14	**2033**	**2270,1**	**1062,8**	**2,1**	**1,68**	**1,88**	**11,66**

3 günlük karbondioksit kürüne tabi tutulan agregalar ile 14 gün küre tabi tutulan agregalar arasında su emme yüzdesi olarak farklılıklar olduğu 14 gün kürlenen agregalarda su emme oranın düştüğü tespit edilmiştir. En yüksek su emme yüzdesi 3 gün kürlenen M3 agregasının olduğu en düşük su emme yüzdesininse MMH14 agregasının olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların meydana gelmesinin sebepleri olarak aynı seriler için farklı kür sürelerinde agrega içerisindeki boşlukların karbondioksit ile dolması, farklı seriler içinse kullanılan malzemelerin incelik oranları veya su emme kapasiteleri ile açıklanabilecektir.

Özgül ağırlık deney sonuçlarına göre en yüksek 1,99 g/cm³ ile MS14 agregasının en düşük ise 1,69 g/cm³ ile M3 agregasının olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların yine aynı seriler için farklı kür sürelerinde karbondioksit kaynaklı değişim olduğu, farklı serilerde ise yine kullanılan malzemelerin özgül ağırlıklarının farklı olmasından kaynaklı olarak değişkenlik gösterdiği ile açıklanabilir.

3.4 Beton Üretimi

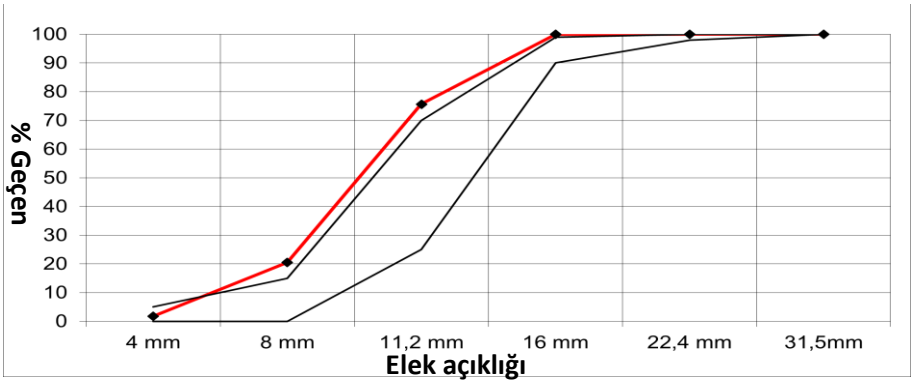
3.4.1 Beton Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Akçansa Büyükçekmece fabrikasında üretilen CEMI 42,5R tipi çimento kullanılmıştır. 30.06.2025 tarihinde üretimi yapılan çimentoya ait 03.07.2025 tarihinde yapılan deneme sonuçlarına göre özgül ağırlık 3,12 gr/cm³, özgül yüzey 3740 cm²/gr bulunmuş olup28 günlük basınç dayanım sonucu 55,8 MPa'dır. Kimyasal analiz sonuçlarına göre Klor içeriği %0,0269'dur.

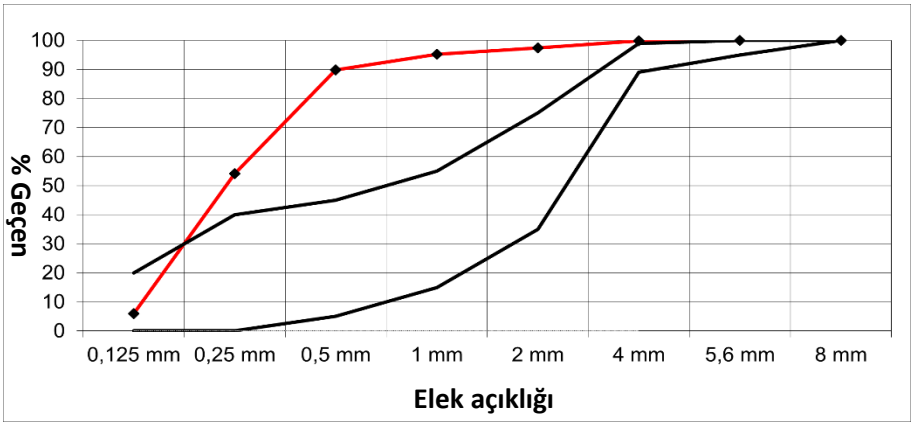
Beton karışımında güney cebeci taş ocaklarında çıkarılan agrega olarak I no 4/16 mm, kırma kum 0/4 mm aralığında kullanılmıştır (Şekil 3.14, Şekil 3.16). İstanbul Teknik Üniversitesi 03.12.2024 tarihli 513-2024 tarihli teknik raporuna göre kayaç "mitrik kireçtaşı" olarak tanımlanmıştır. Klorür oranı %0,00032, alkali-silika reaktivitesi 14 gün sonundaki genleşme %0,08 bulunmuştur. Kırma kumun metilen mavisi deneyi göre kirlilik 0,50 g/kg bulunmuştur (Şekil 3.17).

Karışımda doğal kum olarak Yılmazer madencilik firmasının Kemerburgaz, Akpınar köyü mevkisinden çıkarmış olduğu kum kullanılmıştır. 0/4 mm elek aralığına (Şekil 3.15) ve 2,6 g/cm³ özgül ağırlığa sahiptir (Tablo 3.10). İstanbul Teknik Üniversitesi 15.11.2024 tarihli ve 460-20024 sayılı teknik raporuna göre %70-75 oranında kuvars içermektedir. Klorür oranı %000114, alkali-agrega reaktivitesi 14 gün sonundaki genleşme %0,14 bulunmuştur. Doğal kumun metilen mavisi deneyine göre kirlilik 1 g/kg bulunmuştur (Şekil 3.18).

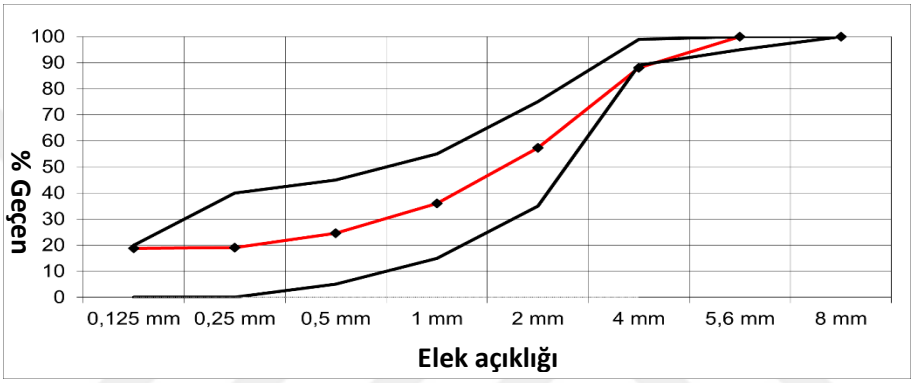
Kimyasal katkı olarak chryso fluid optima79 polimer esaslı katkısı kullanılmıştır.



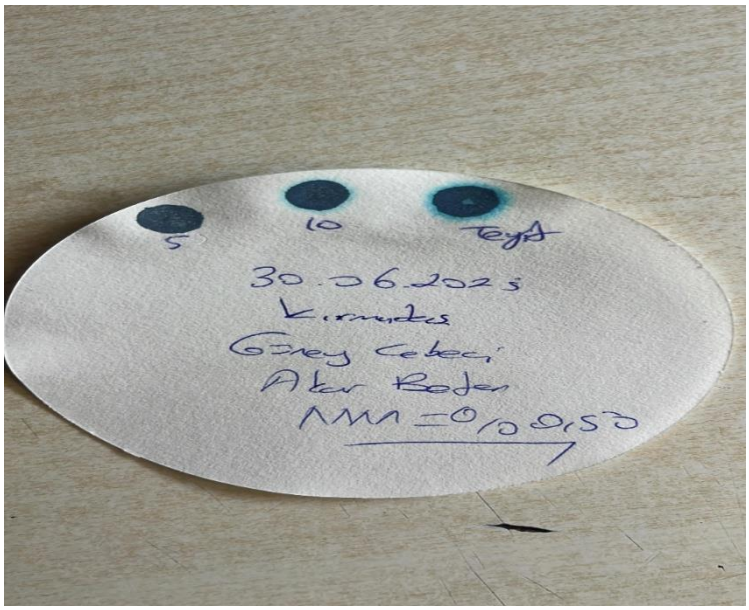
Şekil 3.15 I No agrega granülometri eğrisi



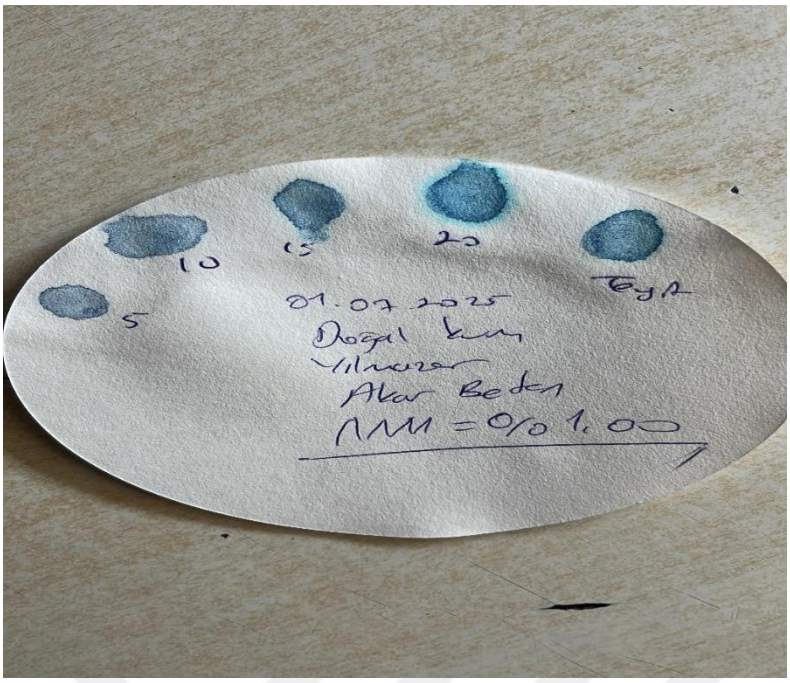
Şekil 3.16 Doğal kum granülometri eğrisi



Şekil 3.17 Kırma kum granülometri eğrisi



Şekil 3.18 Kırma kum metilen mavisi deneyi



Şekil 3.19 Doğal kum metilen mavisi deneyi

Tablo 3.10 Özgül ağırlık ve su emme deneyleri

	Etüv kurusu (gr)	**Dky (gr)**	**Suda (gr)**	**Görünür (gr/cm³)**	**Etüv (gr/cm³)**	**Dky (gr/cm³)**	**Su emme (%)**
I no	**470**	**472**	**298**	**2,72**	**2,69**	**2,70**	**0,49**
Kırma kum	**201**	**205**	**129**	**2,78**	**2,63**	**2,69**	**1,99**
Doğal kum	**167**	**169**	**104**	**2,66**	**2,56**	**2,6**	**1,50**

3.4.2 Beton Karışım Oranları

Üretimlerde, karışıma giren agrega cinsi ve miktarına göre 13 seri hazırlanmıştır. Serilerin karışım oranları ve seri isimleri Tablo 3.11 ve Tablo 3.12'de verilmiştir. Agregalar arasında bulunan özgül ağırlık farklılıklarından dolayı kullanılan yapay agregaların miktarlarında değişiklik olmuş olup hacim olarak aynı hacimdedirler.

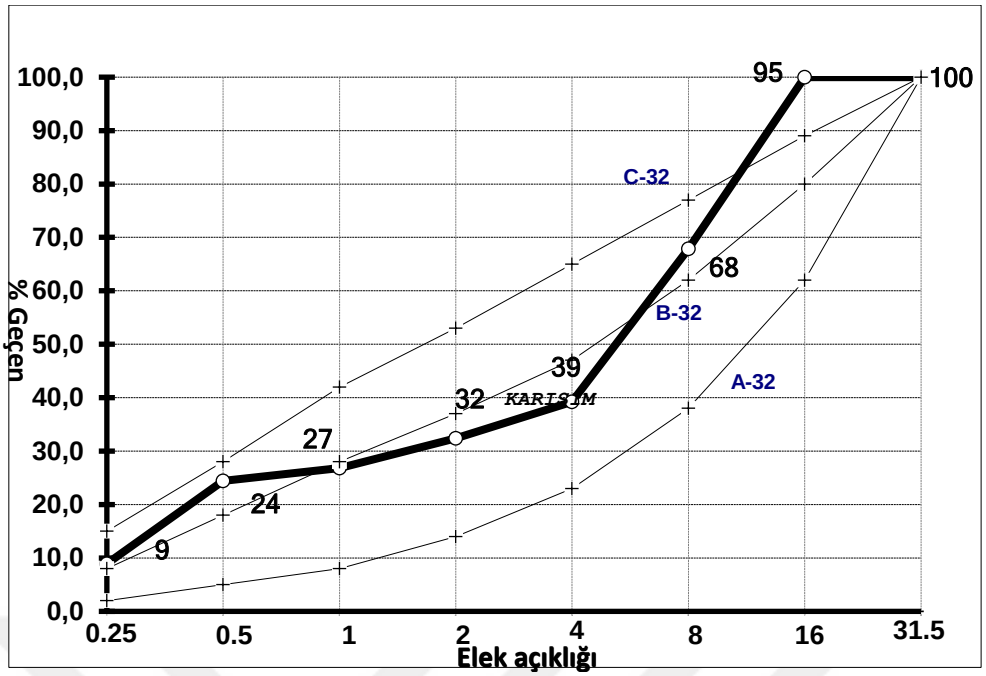
Tablo 3.11 3 gün kürlenen agregalar ile yapılan betonların karışım oranları

	Referans	**M3-H**	**M3**	**MS3-H**	**MS3**	**MMH3-H**	**MMH3**
CemI 42,5 (kg)	**360**	**360**	**360**	**360**	**360**	**360**	**360**
1 NO (kg)	**1140**	**570**	**0**	**570**	**0**	**570**	**0**
Yapay A. (kg)	**0**	**358**	**716**	**415**	**831**	**384**	**767**
Kırma K. (kg)	**377**	**377**	**377**	**377**	**377**	**377**	**377**
Doğal K. (kg)	**372**	**372**	**372**	**372**	**372**	**372**	**372**
K. Katkı (%1)	**3,6**	**3,6**	**3,6**	**3,6**	**3,6**	**3,6**	**3,6**
Su (kg)	**160**	**160**	**160**	**160**	**160**	**160**	**160**
Toplam A. (kg)	**2412,6**	**2200,6**	**1988,6**	**2257,6**	**2103,6**	**2226,6**	**2039,6**

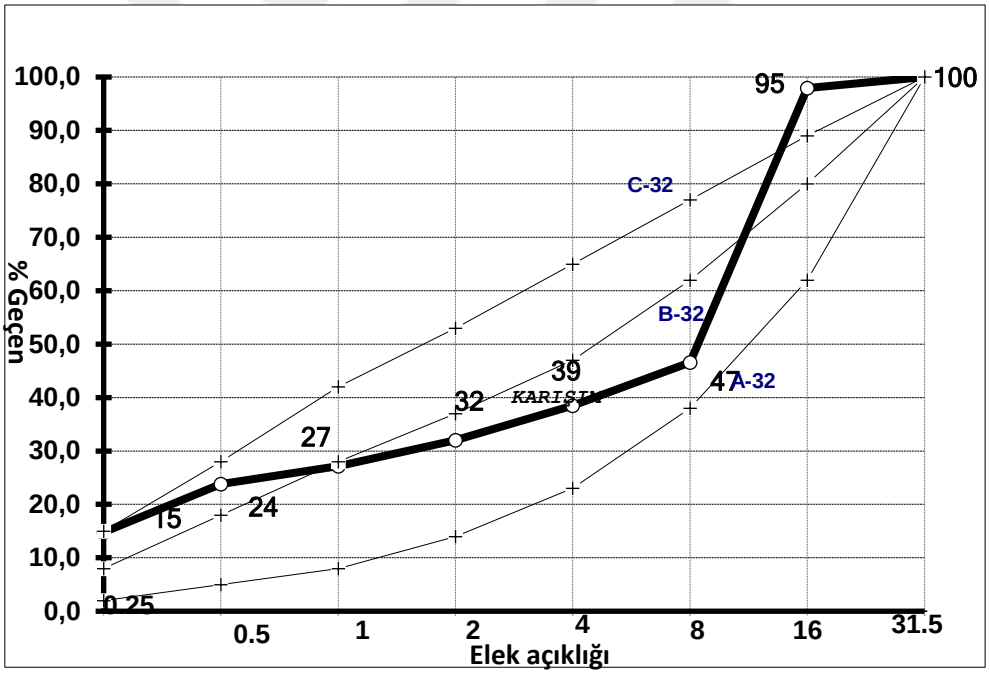
Tablo 3.12 14 gün kürlenen agregalar ile yapılan betonların karışım oranları

	Referans	**M14-H**	**M14**	**MS14-H**	**MS14**	**MMH14-H**	**MMH14**
CemI 42,5 (kg)	**360**	**360**	**360**	**360**	**360**	**360**	**360**
1 NO (kg)	**1140**	**570**	**0**	**570**	**0**	**570**	**0**
Yapay A. (kg)	**0**	**367**	**733**	**422**	**843**	**398**	**797**
Kırma K. (kg)	**377**	**377**	**377**	**377**	**377**	**377**	**377**
Doğal K. (kg)	**372**	**372**	**372**	**372**	**372**	**372**	**372**
K. Katkı (%1)	**3,6**	**3,6**	**3,6**	**3,6**	**3,6**	**3,6**	**3,6**
Su (kg)	**160**	**160**	**160**	**160**	**160**	**160**	**160**
Toplam A. (kg)	**2412,6**	**2209,6**	**2005,6**	**2264,6**	**2115,6**	**2240,6**	**2069,6**

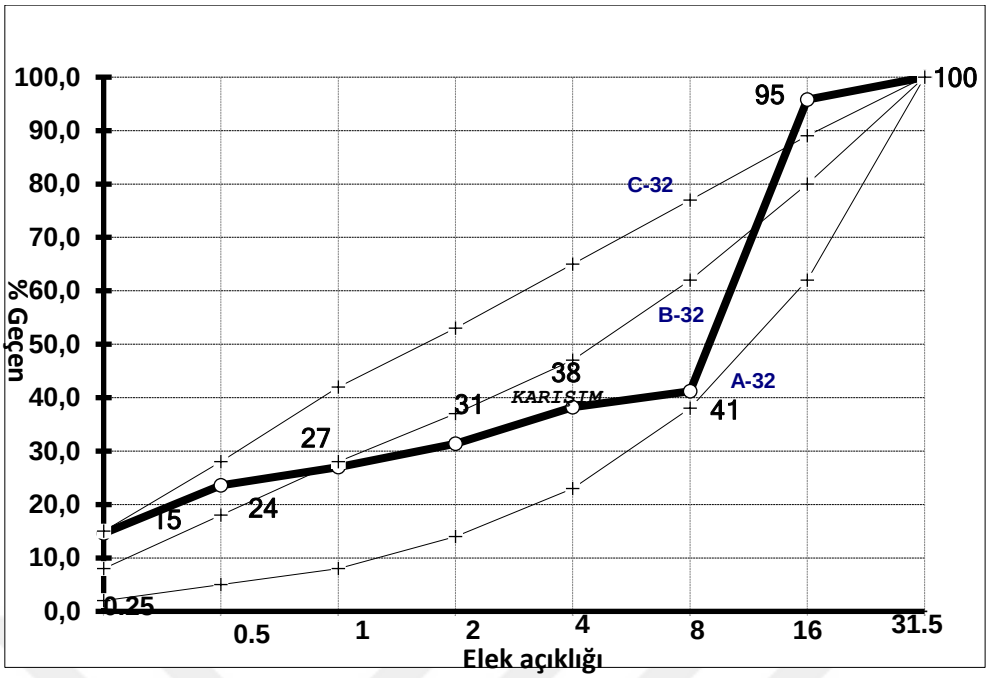
Karışımlarda hacimce %40 ince agrega (%20 KK, %20 DK) %60 iri agrega kullanılmıştır. %50 yapay agrega, %50 doğal iri agrega karışımlarında %30 yapay agrega %30 doğal agrega kullanılmıştır.



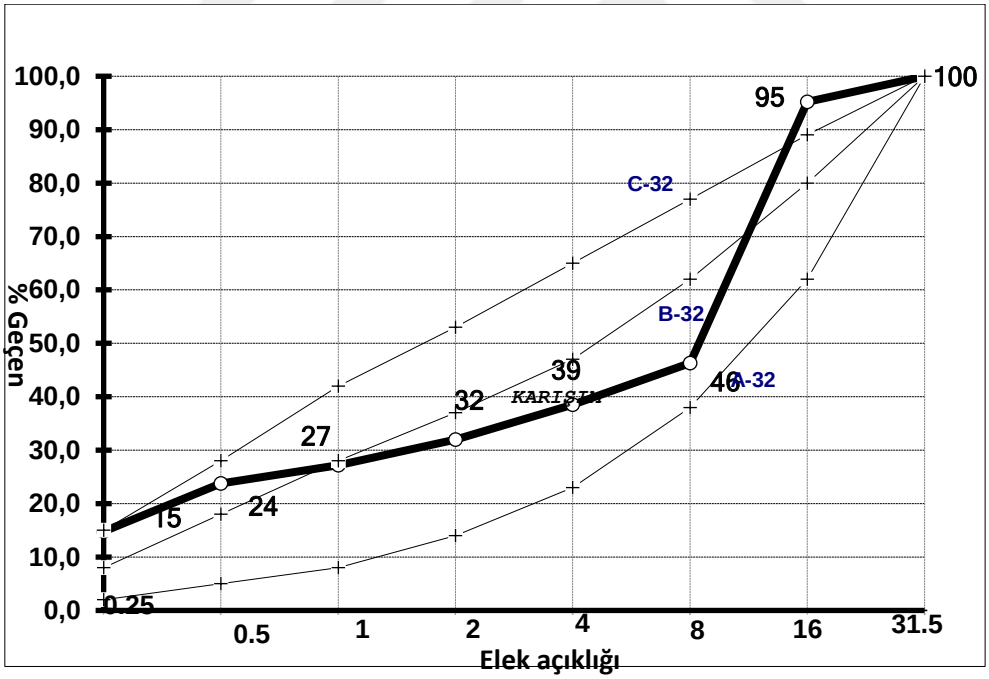
Şekil 3.20 Referans beton karışım grafiği



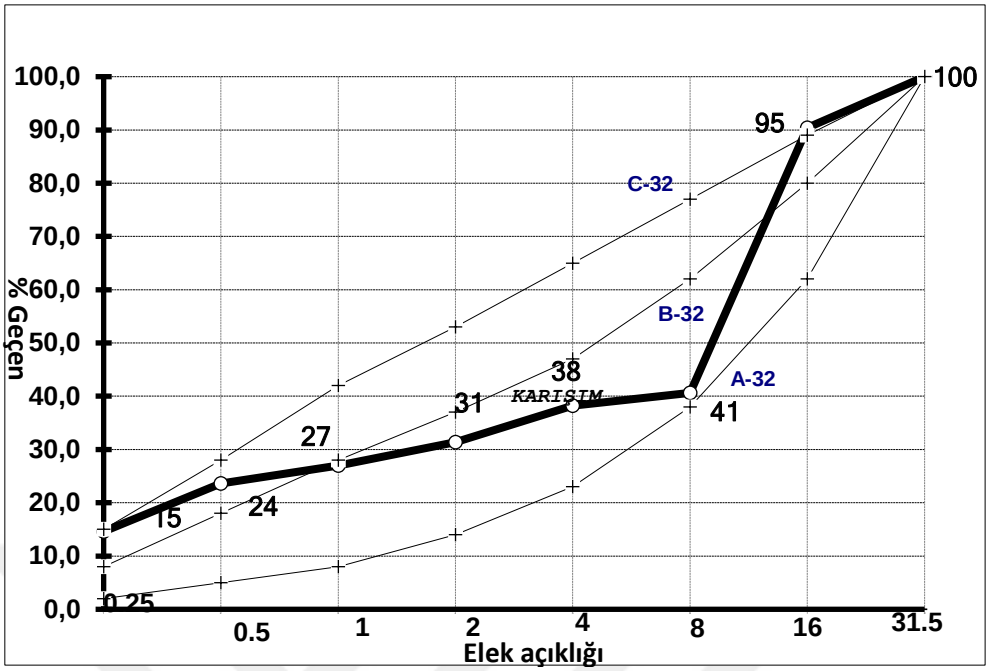
Şekil 3.21 M3-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği



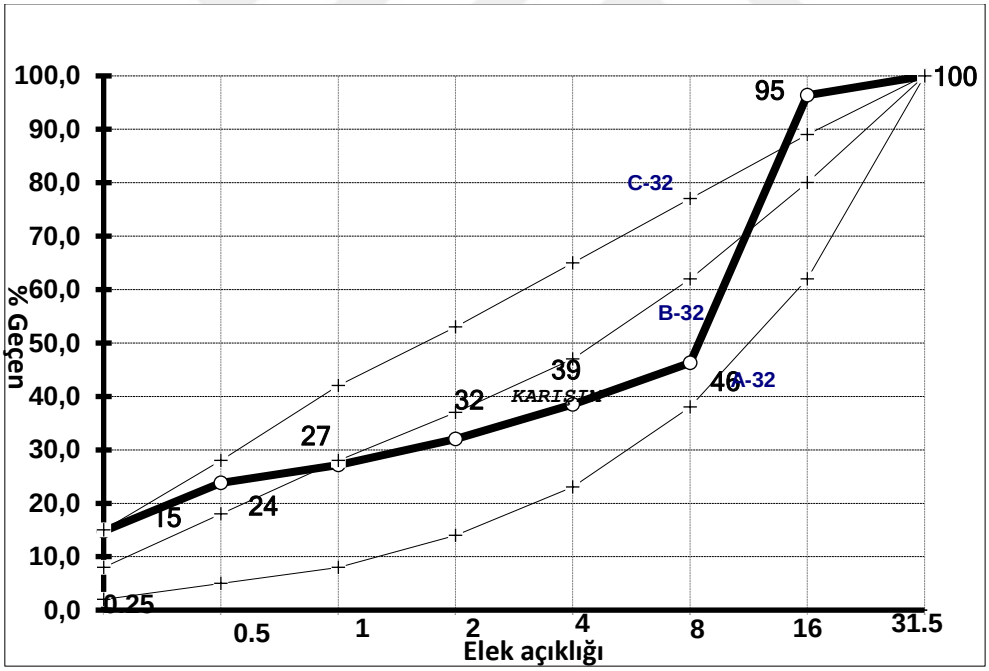
Şekil 3.22 M3 agregası ile oluşturulan karışım grafiği



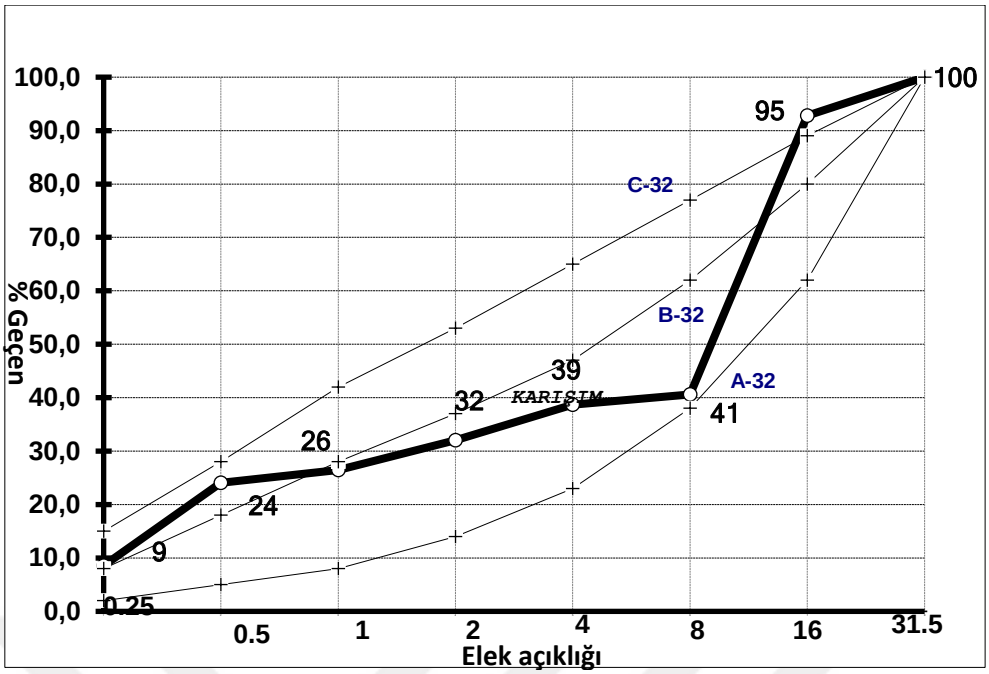
Şekil 3.23 MS3-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği



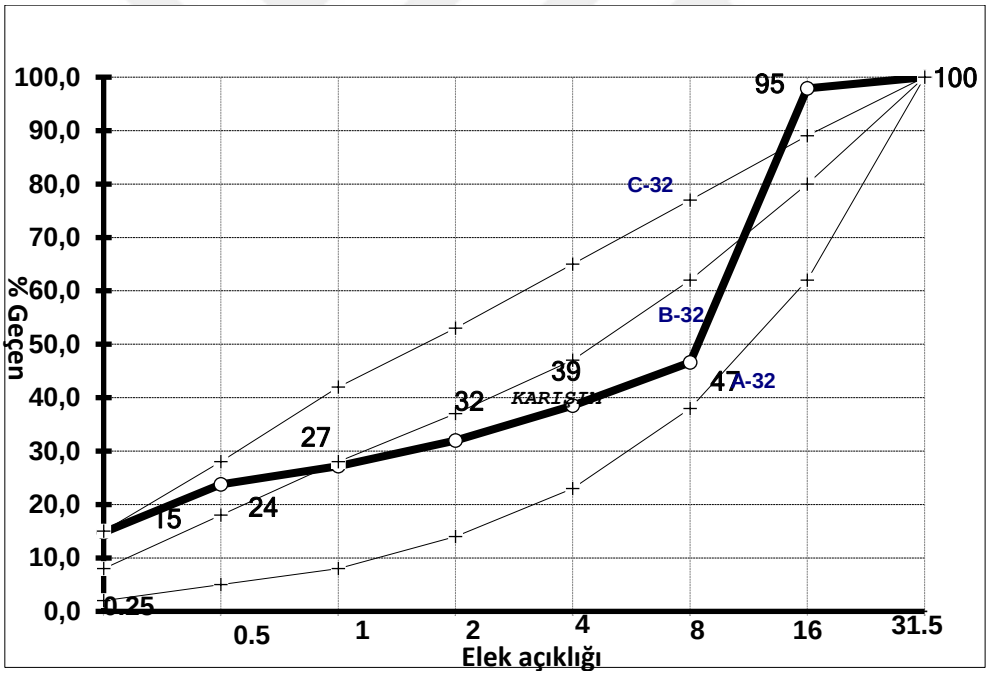
Şekil 3.24 MS3 agregası ile oluşturulan karışım grafiği



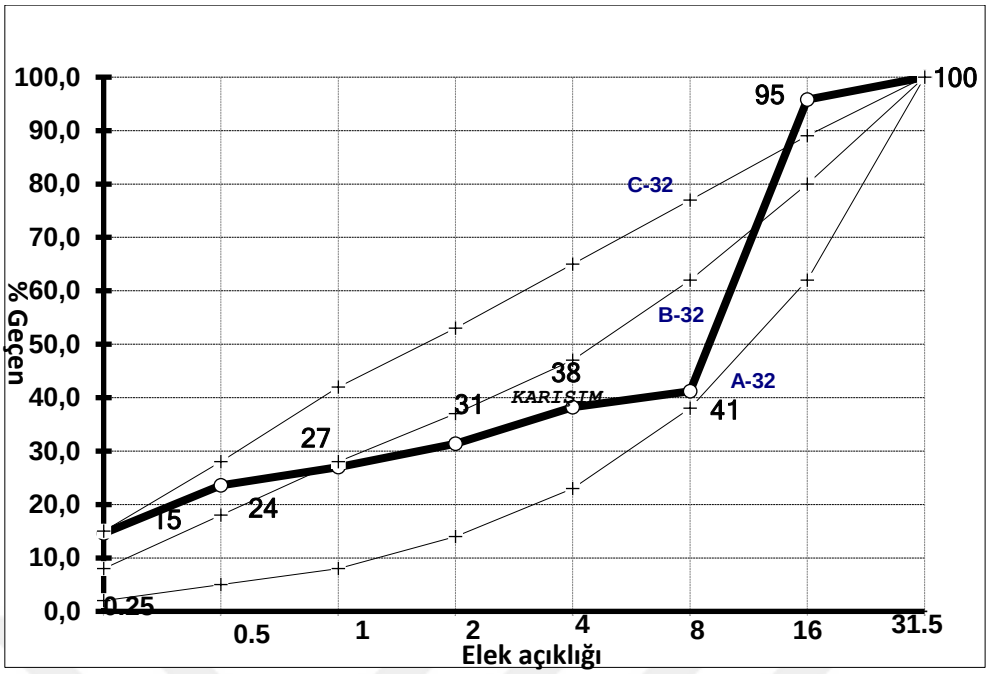
Şekil 3.25 MMH3-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği



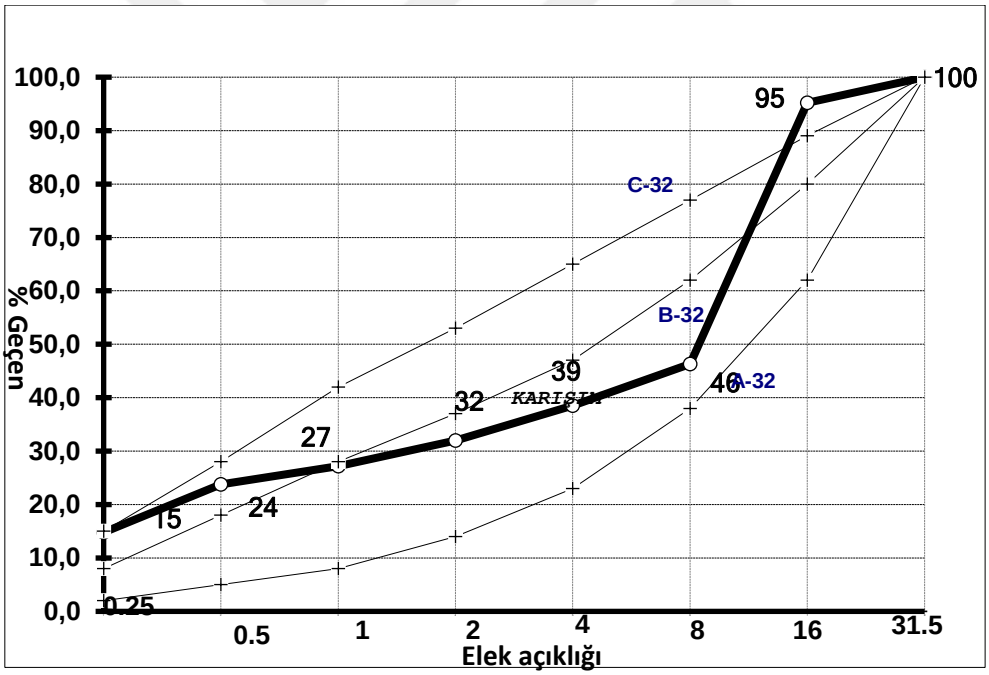
Şekil 3.26 MMH3 agregası ile oluşturulan karışım grafiği



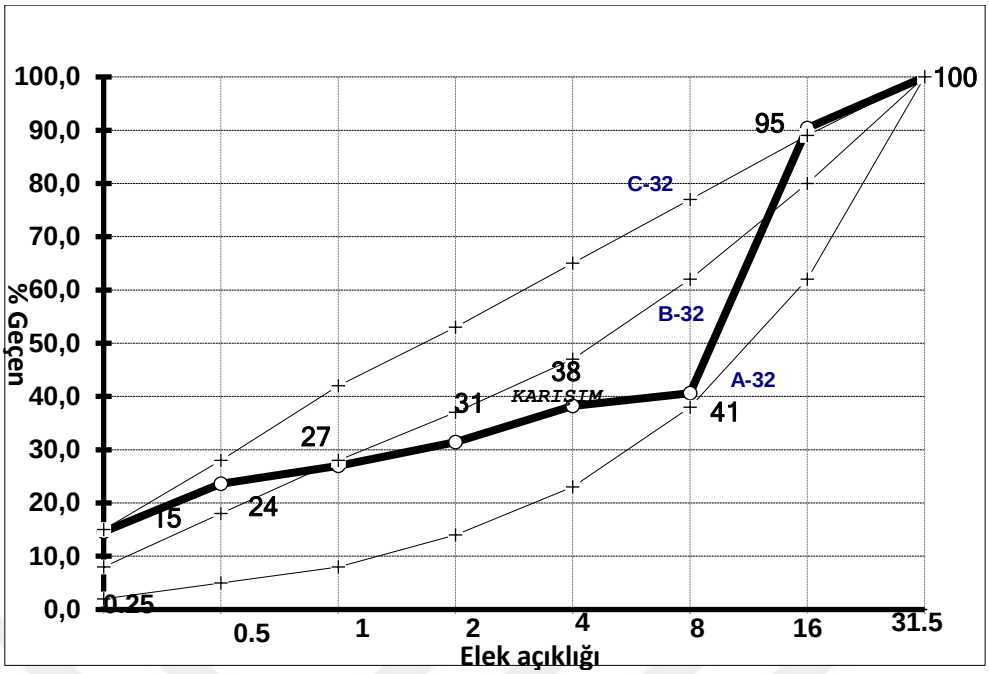
Şekil 3.27 M14-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği



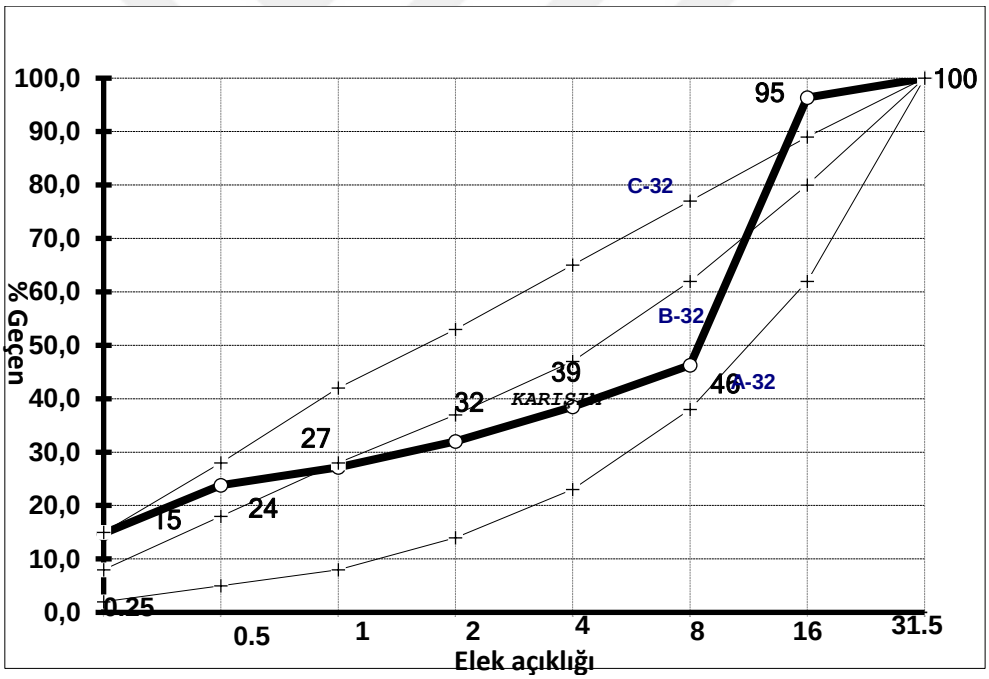
Şekil 3.28 M14 agregası ile oluşturulan karışım grafiği



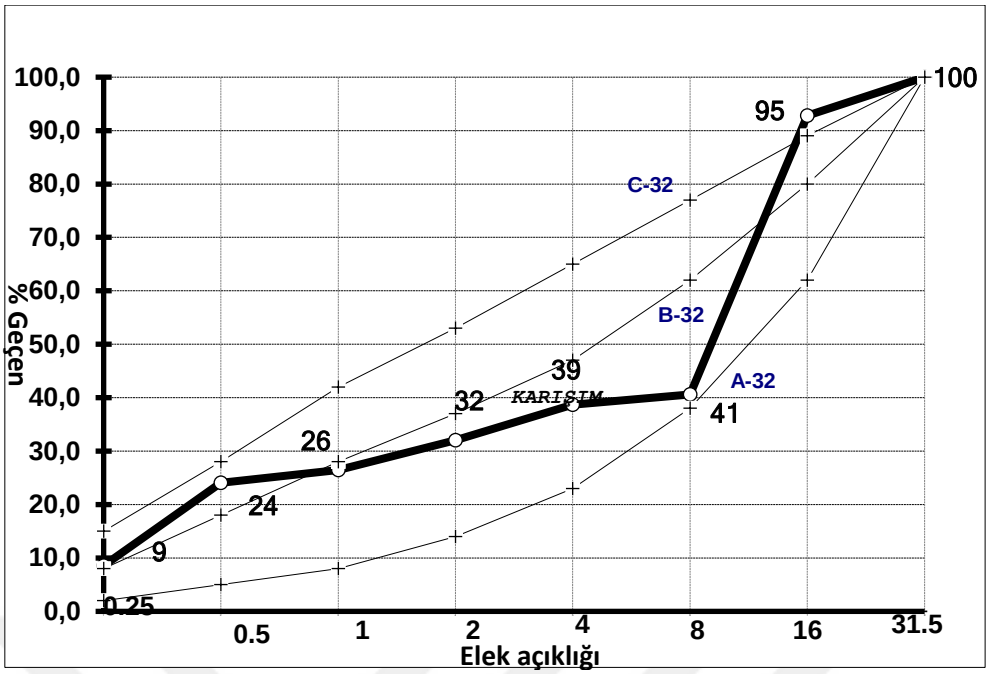
Şekil 3.29 MS14-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği



Şekil 3.30 MS14 agregası ile oluşturulan karışım grafiği



Şekil 3.31 MMH14-H agregası ile oluşturulan karışım grafiği



Şekil 3.32 MMH14 agregası ile oluşturulan karışım grafiği

3.4.3 Beton Üretimi ve Kür Yöntemi

Beton karışımları 6 dm³ olarak üretilmiştir. Üretilecek betonun az olması ve yapay agregaların parçalanması riskine karşılık üretim mikser kabında el ile karıştırmak suretiyle yapılmıştır.6 dm³'lük karışımdan 10*10*10 cm'lik ölçülere sahip 4 adet küp numune olarak dökülmüştür. Numuneler kalıplara 2 katman olarak dökülmüş ve her katmanda 25 kez şişleme uygulanmıştır. Beton karışım esnasında M3 ve M14 agregaları ile yapılan karışımlarda agregaların özgül ağırlığından dolayı üste doğru çıktığı. MS3 ve MS14 agregaları ile yapılan karışımlarda kıvam kaybının hızlı olduğu görülmüştür.

24 saat kalıpta bekletilen numuneler daha sonra kalıptan çıkarılarak 28. Gün şebeke suyu ile doldurulmuş kür havuzunda bekletilmiştir. 28 gün sonunda havuzdan çıkarılan numuneler deneye tabi tutulmuştur.



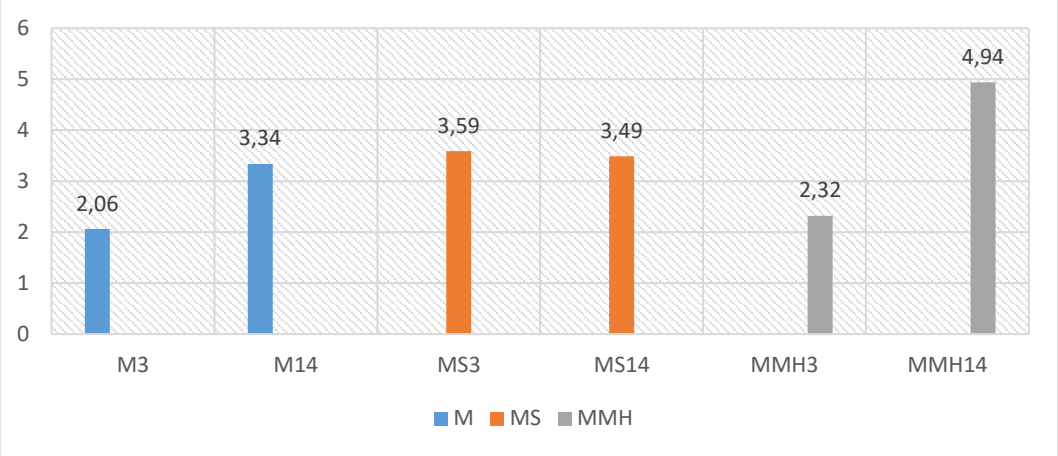
Şekil 3.33 Beton üretim aşamaları

3.5 Deney Çıktıları

Yapay agregalar üzerinde yapılan basınç dayanım testinde Tablo 4.1'deki sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek agrega dayanımı MMH14 serisinde elde edilmiştir ve 4,94 MPa seviyesindedir. M serisi ve MMH serisinde 14 günlük kürlenen agregaların dayanımında artış olmuştur.

Tablo 3.13 Yapay agrega ortalama dayanım sonuçları

Grup	Yoğunluk (gr/cm3)	S sapma	Tanecik Day (MPa)	Ssapma
M3	**1,82**	**0,35**	**2,06**	**1,02**
MS3	**2,37**	**0,90**	**3,59**	**1,53**
MH3	**2,06**	**0,20**	**2,32**	**0,84**
M14	**1,69**	**0,16**	**3,34**	**1,24**
MS14	**2,13**	**0,20**	**3,49**	**0,74**
MH14	**2,24**	**1,40**	**4,94**	**2,25**



Şekil 3.34 Agrega dayanım sonuçları

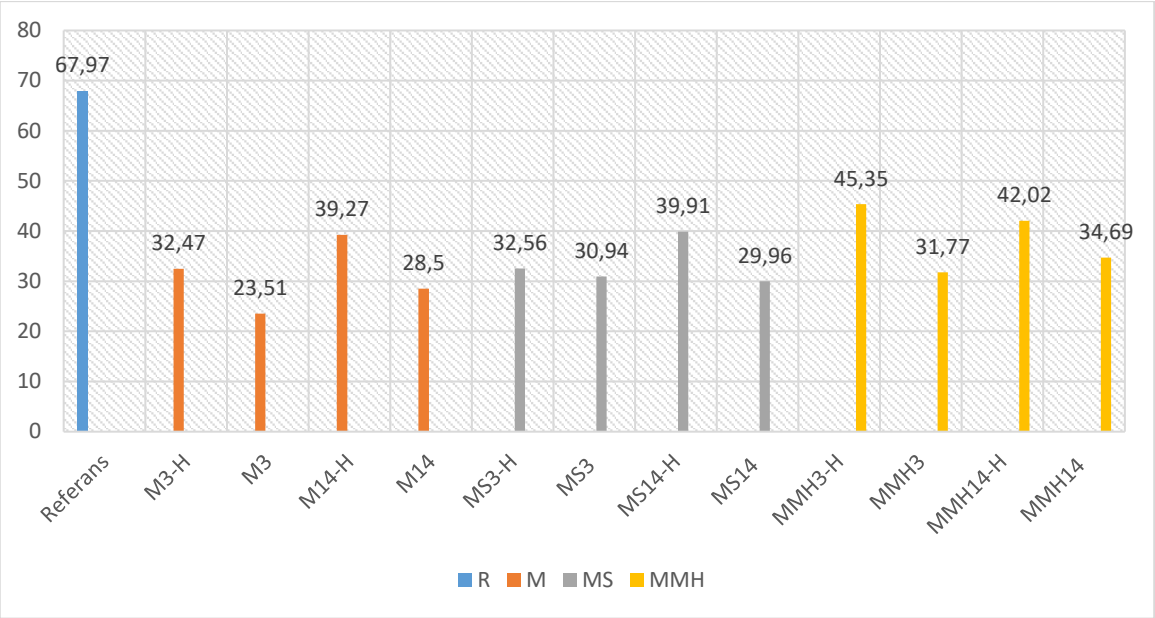
Beton numuneleri üzerinde basınç dayanımı ve su emme deneyleri yapılmıştır. Her seriden 3 adet numune basınç dayanım deneyine, 1 adet numune 7 gün 45 ºC sıcaklıkta etüvde bekletilerek su emme yüzdesi hesaplanmıştır. Numuneler basınç deneyine tabi tutulmadan önce tartılmıştır.

Tablo 3.14 3 günlük agrega ile üretilen beton basınç dayanım deneyi

	Ort. Basınç dayanımı (MPa)	**Ort. Ağırlık (gr)**
Referans	**67,97**	**2461,2**
M3-H	**32,47**	**2253,9**
M3	**23,51**	**2043,3**
MS3 -H	**32,56**	**2314**
MS3	**30,94**	**2149,3**
MMH3-H	**45,35**	**2311,4**
MMH3	**31,77**	**2082,2**

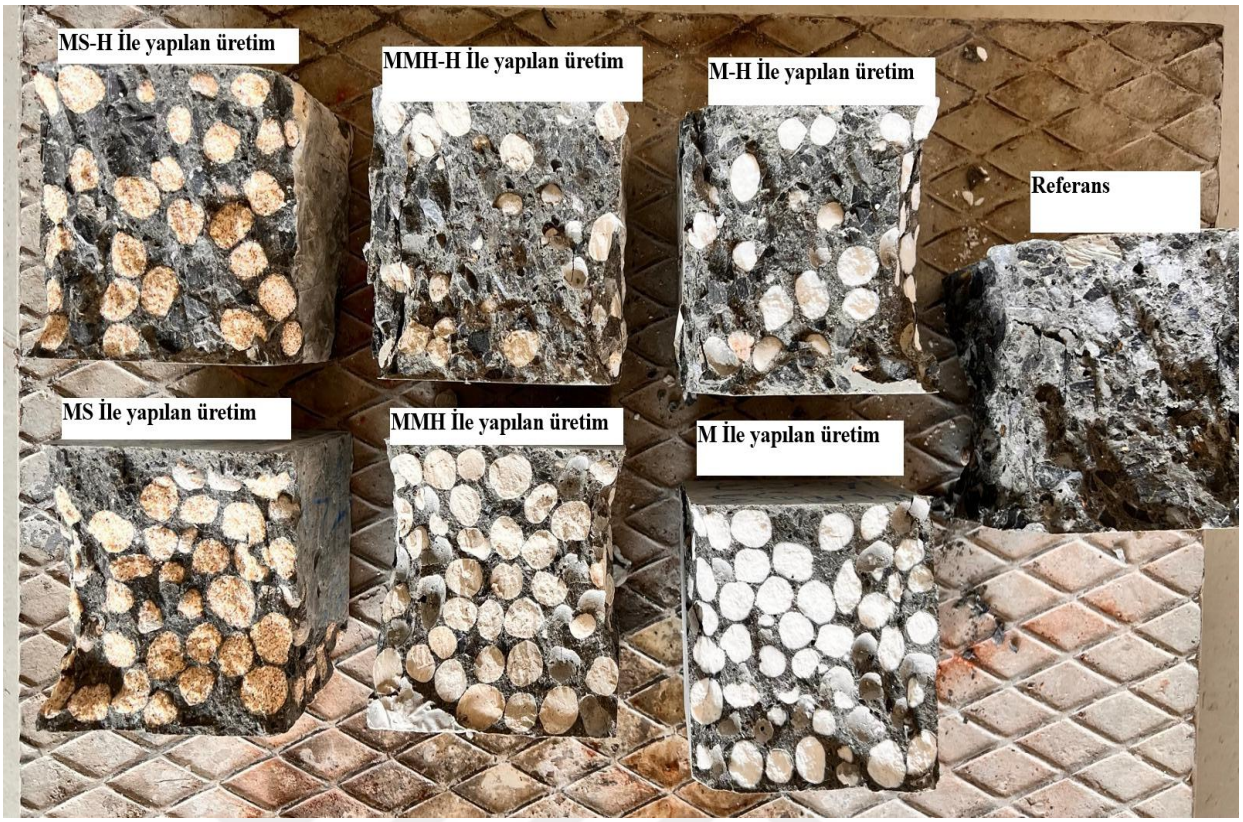
Tablo 3.15 14 günlük agrega ile üretin beton basınç dayanım deneyi

	Ort. Basınç dayanımı (MPa)	**Ort. Ağırlık (gr)**
M14-H	**39,27**	**2292,1**
M14	**28,5**	**2086,8**
MS14-H	**39,91**	**2350,4**
MS14	**29,96**	**2188,1**
MMH14-H	**42,02**	**2332,46**
MMH14	**34,69**	**2149,8**



Şekil 3.35 Beton dayanım sonuçları

Yapılan beton basınç dayanım testlerinin sonuçlarına göre seriler arasında MMH serisinin diğer serilere göre daha yüksek sonuç verdiği görülmüştür. Serilerin kendi içlerinde ortaya çıkan sonuçlarda genel olarak 14 gün kürlenen agregaların mukavemetlerinde 3 günlük kürlenen agregalara göre artış olduğu tespit edilmiştir. MS3 ve MS14 serilerinde mukavemette anlamlı bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. MMH3-H ve MMH14-H serilerinde ise 14 gün kürlenen agreganın 3,3 MPa daha düşük çıktığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.36 Beton basınç deneyine tabi tutulan numuneler

Beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen su emme deneylerinde referans betonun su emmesinin en düşük olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4.3). Hibrit kullanılan karışımların su emmelerinin %100 yapay agrega kullanılan karışımlara göre daha düşük su emmelerinin olduğu ve 14 gün kürlenen agregalar ile oluşturulan karışımlarında su emmelerinin 3 gün kürlenen agregalara göre bir miktar düşük olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4.4-4.5).

Tablo 3.16 3 günlük agrega ile yapılan beton su emme deneyi

	28 gün sonu ağırlık (gr)	**45 ºC Etüvde beklem sonrası ağırlık (gr)**	**Su emme (%)**
Referans	**2427,8**	**2398,7**	**1,19**
M3 -H	**2224,8**	**2122,4**	**4,6**
M3	**2040**	**1927,6**	**5,5**
MS3-H	**2335,2**	**2273,4**	**2,64**
MS3	**2177,1**	**2087,2**	**4,12**
MMH3 -H	**2309,9**	**2252,8**	**2,47**
MMH3	**2063,7**	**1982,1**	**3,95**

Tablo 3.17 14 günlük agrega ile yapılan beton su emme deneyi

	28 gün sonu ağırlık (gr)	**45 ºC Etüvde beklem sonrası ağırlık (gr)**	**Su emme (%)**
M14-H	**2279,6**	**2202,4**	**3,38**
M14	**2101,8**	**1996,5**	**5**
MS14-H	**2324,1**	**2259,9**	**2,76**
MS14	**2183,7**	**2107,1**	**3,5**
MMH14-H	**2357**	**2296,5**	**2,56**
MMH14	**2161,3**	**2065**	**4,45**

4
SONUÇ

Bu çalışmada MgO çimentosu kullanılarak elde edilen yapay agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenerek elde edilen sonuçlar neticesinde oluşturulan beton karışım hesabına göre üretilen betonların özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar agrega üretim ve kür yöntemleri, beton dayanım sonuçları, agrega kullanım oranlarının beton dayanımı üzerine etkisi açısından kapsamlı biçimde değerlendirilmektedir.

4.1 Agrega Özellikleri

Agregaların özgül ağırlık ve su emme değerlerinde karbondioksit kürü süresine göre değişiklik gösterdiği 14 gün kürlenen agregaların özgül ağırlıklarında artış ve su emme yüzdelerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Agregaların basınç dayanımlarda kür süresinin etkili olduğu 14 gün kürlenen agregaların basınç dayanımlarında genel olarak artış olduğu gözlemlenmiştir.

4.2 Beton Özellikleri

MgO çimentosu ile elde edilen agregalar ile üretilen betonların dayanımları incelendiğinde yapay agrega ile üretilen betonların referans betona göre dayanımlarında belirgin bir düşüş olduğu ve bununla birlikte karbondioksit küründe 14 gün bekletilmiş agregalar ile üretilen betonların dayanımlarında anlamlı artış olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda hibrit olarak üretilen betonların dayanımlarının %100 yapay agrega ile üretilenlere göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özgül ağırlık, su emme yüzdeleri ve kür süresi gibi değişkenlerin bu sonuçlarda etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen betonların su emme değerlerinin de kür süresi ve kullanılan malzeme içeriğine göre düşüş gösterdiği gözlemlemiştir.

Sonuçlar bütün olarak ele alındığında kür süresinin yapay agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştiren parametre olarak öne çıktığı, yapay agrega karışımında MgO çimentosu yanında kullanılan malzemelere göre agrega

dayanımlarında ve su emme yüzdelerinde değişkenlik olduğu ve bununla birlikte beton dayanımlarda artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kür yöntemi göz önüne alındığında yapay agrega ve bu agrega ile üretilen betonun sürdürülebilirlik ve çevresel etki açısından karbon tutma kapasitesinin bulunması önemli bir kazanımdır.

KAYNAKÇA

[1] G. Özışık, "Beton," İstanbul üniversitesi mühendislik fakültesi inşaat mühendisliği bölümü, İstanbul, 1998.

[2] İstanbul mühendisler odası, https://www.imo.org.tr/Eklenti/7419,13394pdf.pdf?0, erişim 05.08.2025

[3] T. Y. Erdoğan, "Beton oluşturan malzemeler-Agregalar," Türkiye hazır beton birliği yayını, İstanbul, 1995.

[4] A. Ünsal, H. Şen, "Beton ve beton malzemeleri laboratuvar deneyleri," Karayolları genel müdürlüğü teknik araştırma dairesi başkanlığı malzeme lab. Şube müdürlüğü, 2008.

[5] TS 706 "Beton agregaları," Türk standartları enstitüsü, Ankara

[6] Y. T. Erdoğan, "BETON," ODTÜ geliştirme vakfı yayını, Ankara

[7] A. M. Neville, "Properties of concrete," Longman scientific and technical, 1981.

[8] M. Çağlayan, S. Haberveren, B. İpekoğlu, İ. Kurşun, "Beton yapımında kullanılan agregaların özellikleri ve örnek bir kuruluş İston," 2. Ulusal kırmataş sempozyumu, İstanbul, 1999.

[9] A. Golev, L. Gallagher, A. V. Velpen, J.R. Lynggaard, D. Friot, M. Stringer, S. Chuah, D. Arbelaez-Ruiz, D. Mazzingh, L. Moura, et al. "Ore-Sand: A Potential New Solution to the Mine Tailings and Global Sand Sustainability Crises. Final Report. Version 1.4," The University of Queensland & University of Geneva., 2022

[10] İstanbul maden ihracatçıları birliği, "Türkiye'de ve dünyada çimento hammaddeleri ve yapı malzemeleri rezervleri, işletmeciliği & geleceği," https://imib.org.tr/wp-content/uploads/cimento.pdf, erişim 05.08.2025

[11] UEPG 2022 final report, "Sustaınable suplly of aggregates in europe," Montan universitad, leoben, 2022.

[12] Özel ihtisas komisyonu raporu, "On ikinci kalkınma planı 2024-2028 Maden politikaları," T.C. Cumhurbaşkanlığı strateji ve bütçe başkanlığı, Ankara, 2023.

[13] A. Tuğrul, "Küresel Agrega Endüstrisi ve Türkiye," Madencilik Türkiye Dergisi, 2023.

[14] B. Postacıoğlu, "Beton bağlayıcı maddeler, Agregalar, Beton (Cilt 2)," İstanbul: Teknik Kitaplar Yayınevi, 1982.

[15] O. Şimşek, "Beton ve beton teknolojisi (6. Baskı)," Şeçkin Akademik ve Mesleki Yayınlar, Ankara, 2020.

[16] Bingöl üniversitesi, https://www.bingol.edu.tr/documents/2_%20Hafta.pdf, erişim 08.08.2025

[17] A. M. Neville, "Properties of Concrete, Third Edition," Longman Scientific and Technical. 1993.

[18] B. Baradan, H. Yazıcı, S. Aydın, “Beton,” Dokuz eylül üniversitesi mühendislik fakültesi yayınları, İzmir.

[19] P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, “Concrete: Microstructure, Properties, and Materials,” Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley, 2006.

[20] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. C. Panarese, “Design And Control of Concrete Mixtures,” Portland Cement Association, 2008.

[21] W. Huang, H. Wang, “Comprehensive Assessment of Engineering And Environmental Attributes of Geopolymer Pervious Concrete With Natural and Recycled Aggregate,” Journal of Cleaner Production, 2024.

[22] R. V. Silva, J. De Brito, R. K. Dhir, 2014, “Properties and Composition of Recycled Aggregates From Construction and Demolition Waste Suitable for Concrete Production”, Construction and Building Materials, 2014.

[23] C. S. Poon, D. Chan, “The Use of Recycled Aggregate in Concrete in Hong Kong,” Resources, Conservation And Recycling, 2007.

[24] S. W. Tabsh, A. S. Abdelfatah, “Influence of Recycled Concrete Aggregates on Strength Properties of Concrete,” Construction and Building Materials, 2009.

[25] H. Özkul, M. A. Taşdemir, M. Tokyay, M. Uyan, “Her yönüyle beton,” THBB, İstanbul, 2004.

[26] R. Wasserman, A. Bentur, "Effect of Lightweight Fly Ash Aggregate Microstructure on The Strength of Concretes," Cement and Concrete Research, vol. 27, no. 4, pp. 525-537, 1997.

[27] G. Li-xiong, Y. Yan, W. Ling, “Research on Sintered Fly Ash Aggregate of High Strength and Low Absorption of Water,” Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, 2004.

[28] M. Erol, S. Kucukbayrak, A. Ersoy-Mericboyu, "Characterization of Sintered Coal Fly Ashes," Fuel, vol. 87, no. 7, pp. 1334-1340, 2008.

[29] J. J. Biernacki, A.K. Vazrala, H.W. Leimer, "Sintering of A Class F Fly Ash," Fuel, vol. 87, no. 6, pp. 782-792, 2008.

[30] N. U. Kockal, T. Ozturan, "Characteristics of Lightweight Fly Ash Aggregates Produced with Different Binders and Heat Treatments," Cement & Concrete Composites, vol. 33, no. 1, pp. 61-67, 2011.

[31] S. Al-Bahar, V.T.L. Bogahawatta, "Development of Lightweight Aggregates In Kuwait," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 31, no. 1, pp. 231-239, 2006.

[32] I. J. Chiou, K.S. Wang, C.H. Chen, Y.T. Lin, "Lightweight Aggregate Made From Sewage Sludge And Incinerated Ash," Waste Management, vol. 26, no. 12, pp. 1453-1461, 2006.

[33] K. J. Mun, "Development And Tests of Lightweight Aggregate Using Sewage Sludge for Nonstructural Concrete," Construction and Building Materials, vol. 21, no. 7, pp. 1583-1588, 2007.

[34] K. Ramamurthy, K.I. Harikrishnan, "Influence of Binders on Properties of Sintered Fly Ash Aggregate," Cement & Concrete Composites, vol. 28, no. 1, pp. 33-38, 2006.

[35] S. Geetha, K. Ramamurthy, "Environmental Friendly Technology of Cold-Bonded Bottom Ash Aggregate Manufacture Through Chemical Activation," Journal of Cleaner Production, vol. 18, no. 15, pp. 1563-1569, 2010.

[36] G. Baykal, A.G. Doven, "Utilization of Fly Ash by Pelletization Process; Theory, Application Areas and Research Results," Resources Conservation and Recycling, vol. 30, no. 1, pp. 59-77, 2000.

[37] M. Gesoglu, T. Ozturan, E. Guneyisi, "Effects of Cold-Bonded Fly Ash Aggregate Properties on The Shrinkage Cracking of Lightweight Concretes," Cement & Concrete Composites, vol. 28, no. 7, pp. 598-605, 2006.

[38] N. U. Kockal, T. Ozturan, "Durability of Lightweight Concretes with Lightweight Fly Ash Aggregates," Construction and Building Materials, vol. 25, no. 3, pp. 1430-1438, 2011.

[39] C. R. Cheeseman, A. Makinde, S. Bethanis, "Properties of Lightweight Aggregate Produced by Rapid Sintering of Incinerator Bottom Ash," Resources Conservation and Recycling, Vol. 43, no. 2, pp. 147-162, 2005.

[40] T. Mangialardi, "Sintering of MSW Fly Ash For Reuse As a Concrete Aggregate," Journal of Hazardous Materials, vol. 87, no. 1, pp. 225-239, 2001.

[41] Y. D. Li, D.F. Wu, J.P. Zhang, L. Chang, D.H. Wu, Z.P. Fang, Y.H. Shi, "Measurement And Statistics of Single Pellet Mechanical Strength of Differently Shaped Catalysts," Powder Technology, vol. 113, no. 1, pp. 176-184, 2000.

[42] S. Yashima, Y. Kanda, S. Sano, "Relationships between Particle-Size and Fracture Energy or Impact Velocity Required to Fracture as Estimated from Single-Particle Crushing," Powder Technology, vol. 51, no. 3, pp. 277-282, 1987.

[43] A. U. Nilsen, P.J.M. Monteiro, O.E. Gjorv, "Estimation of the Elastic-Moduli of Lightweight Aggregate," Cement and Concrete Research, vol. 25, no. 2, pp. 276-280, 1995.

[44] C. C. Yang, R. Huang, "Approximate Strength of Lightweight Aggregate Using Micromechanics Method," Advanced Cement Based Materials, vol. 7, no. 3, pp. 133-138, 1998.

[45] S. Tangtermsirikul, A. C. Wijeyewickrema, “Strength Evaluation of Aggregate Made From Fly Ash,” Science Asia, vol. 26, pp. 237-241, 2000.

[46] R. Wasserman, A. Bentur, "Effect of Lightweight Fly Ash Aggregate Microstructure on The Strength of Concretes," Cement and Concrete Research, vol. 27, no. 4, pp. 525-537, 1997.

[47] C. R. Cheeseman, G.S. Virdi, "Properties and Microstructure of Lightweight Aggregate Produced from Sintered Sewage Sludge Ash," Resources Conservation and Recycling, vol. 45, no. 1, pp. 18-30, 2005.

[48] K. S. Wang, C.J. Sun, and C.C. Yeh, "The Thermotreatment of MSW Incinerator Fly Ash for Use As an Aggregate: A Study of The Characteristics

of Size-Fractioning," Resources Conservation and Recycling, vol. 35, no.3, pp. 177-190, 2002.

[49] V. Adell,, C.R. Cheeseman, A. Doel, A. Beattie, A.R. Boccaccini, "Comparison of Rapid and Slow Sintered Pulverised Fuel Ash," Fuel, vol. 87, no. 2, pp. 187-195, 2008.

[50] D. Li, Z. Xu, Z. Luo, Z. Pan, L. Cheng, "The Activation and Hydration of Glassy Cementitious Materials," Cement and Concrete Research, vol. 32, no. 7, pp. 1145-1152, 2002.

[51] M. Gesoglu, T. Ozturan, E. Guneyisi, "Effects of Fly Ash Properties on Characteristics of Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregates," Construction and Building Materials, vol. 21, no. 9, pp. 1869-1878, 2007.

[52] K. I. Harikrishnan, K. Ramamurthy, "Influence of Pelletization Process on The Properties of Fly Ash Aggregates," Waste Management, vol. 26, no. 8, pp. 846-852, 2006.

[53] B. Gonzalez-Corrochano, J. Alonso-Azcarate, M. Rodas, "Characterization of Lightweight Aggregates Manufactured from Washing Aggregate Sludge and Fly Ash," Resources Conservation and Recycling, vol. 53, no. 10, pp. 571-581, 2009.

[54] F. C. Chang, S.L. Lo, M.Y. Lee, C.H. Ko, J.D. Lin, S.C. Huang, C.F. Wang, "Leachability of Metals from Sludge-Based Artificial Lightweight Aggregate," Journal of Hazardous Materials, vol. 146, no. 1, pp. 98-105, 2007.

[55] M. Liska, A. Al-Tabbaa, “Ultra-green construction: reactive magnesia masonry products,” Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Waste and Resource Management 185–196, 2009.

[56] M. Liska, A. Al-Tabbaa, “Performance of magnesia cements in porous blocks in acid and magnesium environments,” Adv. Cem. Res. 24, 221–232, 2012.

[57] C. Unluer, A. Al-Tabbaa, “Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements,” Cem. Concr. Res. 54, 87–97, 2013.

[58] A.J.W. Harrison, “Reactive Magnesium Oxide Cements,” Google Patents, United States of America, 2008.

[59] M. Liska, A. Al-Tabbaa, K. Carter, J. Fifield, “Scaled-up commercial production of reactive magnesium cement pressed masonry units,” Part I: production, Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Construction Materials 165, 211–223, 2012.

[60] A. H. Akca, S. Ma, D. Esposito, and S. Kawashima, “Evaluation of Mechanical Performance of Compacted Magnesium Hydroxide after Carbonation Curing,” J. Mater. Civ. Eng., vol. 34, no. 5, pp. 1–11, doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004186, 2022.

[61] P. Badjatya et al., “Carbon-negative cement manufacturing from seawater-derived magnesium feedstocks,” Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., vol. 119, no. 34, pp. 1–10, doi: 10.1073/pnas.2114680119, 2022.

[62] Y. Sano, Y. Hao, & F. Kuwahara, “Development of an electrolysis based system to continuously recover magnesium from seawater,” Heliyon, 4(11), e00923, 2018.

[63] F. Schorcht, I. Kourti, B. M. Scalet, S. Roudier, L. Delgado Sancho, “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide; Industrial Emissions,” Directive 2010/75/EU; Joint Research Centre, European Commission: Seville, Spain, 2013.

[64] J. H. Canterford, “Magnesia- an important industrial mineral: A review of processing options and uses Miner,” Process. Extr. Metall. Rev., 57– 104 doi: 10.1080/08827508508952601, 1985.

[65] M. Tangwei,E. Yang, C. Unluer, “İnvestigation of the properties of reactive MgO-based cements and their effect on performance,” Cement and concrete composites, 2023.

[66] X. You, X. Hu, P. He, J. Liu, C. Shi, “A review on the modelling of carbonation of hardened and fresh cement-based materials,” Cem. Concr. Compos., 125, Article 104315, 2022.

[67] P. De Silva, L. Bucea, and V. Sirivivatnanon, “Chemical, microstructural and strength development of calcium and magnesium carbonate binders,” Cem. Concr. Res., vol. 39, no. 5, pp. 460–465, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.02.003, 2009.

[68] A. Botha and C. A. Strydom, “Preparation of a magnesium hydroxy carbonate from magnesium hydroxide,” Hydrometallurgy, vol. 62, no. 3, pp. 175–183, doi: 10.1016/S0304-386X(01)00197-9, 2001.

[69] A. H. Akca, S. Ma, D. Esposito, and S. Kawashima, “Evaluation of Mechanical Performance of Compacted Magnesium Hydroxide after Carbonation Curing,” J. Mater. Civ. Eng., vol. 34, no. 5, pp. 1–11, doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004186, 2022.

[70] P. Badjatya et al., “Carbon-negative cement manufacturing from seawater-derived magnesium feedstocks,” Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., vol. 119, no. 34, pp. 1–10, doi: 10.1073/pnas.2114680119, 2022.

[71] C. Unluer A. Al-Tabbaa, “Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions,” Cem. Concr. Res., vol. 59, pp. 55–65, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.02.005, May 2014.

[72] A. Kilic, C.D. Atis, E. Yasar, F. Ozcan, "High-Strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures," Cement and Concrete Research, vol. 33, no. 10, pp. 1595-1599, 2003.

[73] I. B. Topcu, "Semi Lightweight Concretes Produced by Volcanic Slags," Cement and Concrete Research, vol. 27, no. 1, pp. 15-21, 1997.

[74] H. Z. Cui, T.Y. Lo, S.A. Memon, W. Xu, "Effect Of Lightweight Aggregates on The Mechanical Properties and Brittleness of Lightweight Aggregate Concrete," Construction and Building Materials, vol. 35, no. 1, pp. 149-158, 2012.

[75] J. A. Rossignolo, M.V.C. Agnesini, "Mechanical Properties of Polymer-Modified Lightweight Aggregate Concrete," Cement and Concrete Research, vol. 32, no. 3, pp. 329-334, 2002.

[76] S. Demirdag, I. Ugur, S. Sarac, "The Effects of Cement/Fly Ash Ratios on The Volcanic Slag Aggregate Lightweight Concrete Masonry Unit," Construction and Building Materials, vol. 22, no. 8, pp.1730-1735, 2008.

[77] M. Gesoglu, "Effects of Lightweight Aggregate Properties on Mechanical, Fracture and Physical Behaviour of Lightweight Concretes," Ph.D. Thesis, Boğaziçi University, 2004.

[78] K. S. Chia, M.H. Zhang, "Water Permeability and Chloride Penetrability of High Strength Lightweight Aggregate Concrete," Cement and Concrete Research, vol. 32, no. 4, pp. 639-645, 2002.

[79] H. Al-Khaiat, M.N. Haque, "Effect of Initial Curing on Early Strength and Physical Properties of a Lightweight Concrete," Cement and Concrete Research, vol. 28, no. 6, pp. 859-866, 1998.

[80] M. H. Zhang, O.E. Gjorv, "Characteristics of Lightweight Aggregates for High -Strength Concrete," ACI Materials Journal, vol. 88, no. 2, pp. 150-158, 1991.

[81] A. G. Döven, "Lightweight Fly Ash Aggregate Productions Using Cold Bonding Agglomeration Process," Ph.D. Thesis, Boğaziçi University, 1998.

[82] R. Wasserman, A. Bentur, "Effect of Lightweight Fly Ash Aggregate Microstructure on The Strength of Concretes," Cement and Concrete Research, vol. 27, no. 4, pp. 525-537, 1997.

[83] M. H. Zhang, O.E. Gjorv, "Pozzolanic Reactivity of Lightweight Aggregates," Cement and Concrete Research, vol. 20, no. 6, pp. 884-890, 1990.

[84] J. L. Clarke, "Structural Lightweight Aggregate Concrete," 1st ed., New York: Blackie Academic & Professional, London, pp. 240, 1993.

[85] M. Gesoglu, T. Ozturan, E. Guneyisi, "Shrinkage Cracking of Lightweight Concrete Made with Cold-Bonded Fly Ash Aggregates," Cement and Concrete Research, vol. 34, no. 7, pp. 1121-1130, 2004.

[86] J. M. Chi, R. Huang, C.C. Yang, J.J. Chang, "Effect of Aggregate Properties on The Strength and Stiffness of Lightweight Concrete," Cement & Concrete Composites, vol. 25, no. 2, pp. 197-205, 2003.

[87] T. P. Chang, M.M. Shieh, "Fracture Properties of Lightweight Concrete," Cement and Concrete Research, vol. 26, no. 2, pp. 181-188, 1996.

[88] M. L. Gambhir, "Concrete Technology," Third ed., Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., 2004.

[89] H. Al-Khaiat, N. Haque, "Strength and Durability of Lightweight and Normal Weight Concrete," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 11, no. 3, pp. 231 -235, 1999.

[90] N. Haque, H. Al-Khaiat, "Strength and Durability of Lightweight Concrete In Hot Marine Exposure Conditions," Materials and Structures, vol. 32, no. 221, pp. 533-538, 1999.

[91] A. R. Khaloo, N. Kim, "Effect of Curing Condition on Strength and Elastic Modulus of Lightweight High-Strength Concrete," ACI Materials Journal, vol. 96, no. 4, pp. 485-490, 1999.

[92] E. Guneyisi, M. Gesoglu, T. Ozturan, "Properties of Rubberized Concretes Containing Silica Fume," Cement and Concrete Research, vol. 34, no. 12, pp. 2309- 2317, 2004.

[93] N. N. Eldin, A.B. Senouci, "Rubber Tire Particles As Coarse Aggregate," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 5, no. 4, pp. 478-496, 1993.

[94] F. Pelisser, N. Zavarise, T.A. Longo, A.M. Bernardin, "Concrete Made with Recycled Tire Rubber: Effect of Alkaline Activation and Silica Fume Addition," Journal of Cleaner Production, vol. 19, no. 6, pp. 757-763, 2011.

[95] Z. K. Khatib, F.M. Bayomy, "Rubberized Portland Cement Concrete," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 11, no. 3, pp. 206-213, 1999.

[96] A. R. Khaloo, M. Dehestani, P. Rahmatabadi, "Mechanical Properties of Concrete Containing A High Volume of Tire–Rubber Particles," Waste Management, vol. 28, no. 12, pp. 2472-2482, 2008.

[97] A. Turatsinze, M. Garros, "On The Modulus of Elasticity and Strain Capacity of Self-Compacting Concrete Incorporating Rubber Aggregates," Resources Conservation and Recycling, vol. 52, no. 10, pp. 1209-1215, 2008.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. E. Coşkun, O. Şahin, A. H. Akca, "Karbonatlaşmanın Magnezyum esaslı Yapay İri Agregaların Tanecik Dayanımı Üzerine Etkileri" 8. Internatıonar Mediterranean Scientific Research Congress, 13-15 Ağustos 2025, TÜRKİYE