



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK MARDİN TAŞI TOZUNUN RİJİT YOL KAPLAMA
İNŞASINDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

Mehmet Ali YILDIZ

**Ocak-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK MARDİN TAŞI TOZUNUN RİJİT YOL KAPLAMA
İNŞASINDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

Mehmet Ali YILDIZ

**Danışman
Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ
Dr. Öğr. Üyesi Mahmut DURMAZ**

**Diğer Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Hakan ÇOBAN Dr. Öğr. Üyesi Murat BATAN**

**Ocak-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Ali YILDIZ tarafından hazırlanan “Atık Mardin Taşı Tozunun Rijit Yol Kaplama İnşasında Kullanılabilirliği” adlı tez çalışması 15/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hakan ÇOBAN

.....

Danışman

Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

.....

Üye

Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Murat BATAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Mehmet Ali YILDIZ
Tarih:15/01/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK MARDİN TAŞI TOZUNUN RİJİT YOL KAPLAMA İNŞASINDA KULLANILABİLİRLİĞİ

Mehmet Ali YILDIZ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

2025, 74 Sayfa

Yapılmış olan tez çalışmasında atık olan Mardin taşı tozunun beton yol yapımında kullanılabilirliğini araştırarak hem ülke ekonomisine katkı sağlamak hem de yeni bir çalışma ile farklı bir rijit yol yapım malzemesi üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Mardin iline gidilerek Mardin taşı üretim şantiyeleri (*Mardin Türkmen Deresi ve Kızıltepe Gurs Şantiyesi*) gezilmiş ve deney malzemesi olarak çeşitli dane boyutlarından Mardin taşı agregası ve Mardin taşı tozu temin edilmiştir. İlgili firmalardan silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı ve çelik lif temin edilerek Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında deneysel çalışmalar yapıldı. Bu kapsamda, Lifsiz Mardin Taşı Pudra Beton (MPB), Lifli Mardin Taşı Pudra Beton (MLPB), Lifsiz Referans Mardin Taşı Beton (RFB) ve Lifli Referans Mardin Taşı Beton (RFLB) olmak üzere 4 tip beton üretimi yapıldı. Üretilen numunelere 3 farklı tip kür uygulandı. Kür sonrası numunelere Basınç, Eğilme ve Donma-Çözülme deneyleri yapıldı. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, atık Mardin taşı tozunun kullanıldığı betonların, referans Mardin taşı agregasının kullanıldığı betonlardan daha iyi sonuçlar verdiği görüldü.

Anahtar Kelimeler: Beton yol, Mardin Taşı, Mardin Taşı Tozu, Lifli Mardin Taşı Tozu, Lifsiz Mardin Taşı Tozu, Kombine kür

ABSTRACT

MASTER THESIS

USABILITY OF WASTE MARDIN STONE POWDER IN RIGID ROAD COATING CONSTRUCTION

Mehmet Ali YILDIZ

Batman University Graduate Education Institute

Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

2025, 74 Pages

In this thesis, it is aimed to contribute to the national economy and to produce a different rigid road construction material with a new study by investigating the usability of Mardin stone dust in concrete road construction. For this purpose, Mardin province was visited and Mardin stone production sites (Mardin Türkmen Deresi and Kızıltepe Gurs sites) were visited and Mardin stone aggregate and Mardin stone dust of various grain sizes were obtained as test materials. Silica fume, super plasticizer and steel fiber were obtained from the relevant companies and experimental studies were carried out in Siirt University Faculty of Engineering Civil Engineering Laboratory. In this context, 4 types of concrete were produced: Fiberless Mardin Stone Powder Concrete (MPC), Fibrous Mardin Stone Powder Concrete (MLPC), Fiberless Reference Mardin Stone Concrete (RFC) and Fibrous Reference Mardin Stone Concrete (RFLC). Three different types of curing were applied to the produced specimens. After curing, the specimens were subjected to compression, flexural and freeze-thaw tests. As a result of the experimental studies, it was seen that the concretes using waste Mardin stone powder gave better results than the concretes using reference Mardin stone aggregate.

Keywords: Concrete road, Mardin Stone, Mardin Stone Powder, Fibrous Mardin Stone Powder, Non-fibrous Mardin Stone Powder, Combined curing

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasındaki temel amaç, Mardin Taşı tozunun beton yol yapımında uygulanabilir bir yol malzemesi olarak potansiyel uygulanabilirliğinin araştırılması yoluyla yenilikçi bir rijit yol yapım malzemesi geliştirirken, aynı zamanda ulusal ekonomiye önemli bir katkıda bulunmaktır. Bu hedefin peşinden gitmenin temel mantığı, ülkemizin bol kaynaklarının kullanımını optimize etme, böylece atık olarak kabul edilebilecek malzemeleri değerli ekonomik varlıklara dönüştürme, aynı zamanda düşük maliyetle yeni bir beton yol yapım malzemesi üretme ve tüm bunları yaparken ülkemizin eğitilmiş işgücünün yeteneklerinden ve uzmanlığından yararlanma, böylece bilimsel bilgidir ilerlemeleri teşvik etme, ekonomik tasarrufları teşvik etme ve atık oluşumunu azaltmak için aktif olarak çalışma arzusuna dayanmaktadır. Bu araştırma çalışması, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nın rehberliği ve koordinasyonu altında yürütülmüştür; bu da böylesine etkili bir projenin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için kritik öneme sahip olan kurumsal destek ve iş birliği çabalarının altını çizmektedir. Nihayetinde, bu çalışmanın bulgularının sadece inşaat sektörü için değil, aynı zamanda bir bütün olarak ulusal ekonominin sürdürülebilir kalkınması için de geniş kapsamlı etkileri olması ve hem malzeme bilimi hem de mühendislik uygulamalarında ileriye doğru önemli bir adım atılması beklenmektedir.

Akademik çalışmam boyunca bana paha biçilmez bir destek sağlayan, geniş bilgi birikiminden ve zengin deneyiminden yararlanarak bana etkili bir şekilde rehberlik eden değerli danışmanım Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ'a en içten şükranlarımı sunarım. Ayrıca, tereddütsüz yardımı ve olumlu tavrıyla karşılaştığım zorlukları sürekli olarak hafifleten, çeşitli engelleri daha kolay ve daha yüksek motivasyonla aşmamı sağlayan ikinci danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Mahmut DURMAZ'a da teşekkür etmek isterim. Prof. Dr. Ziraddin MAMMADOV'a, bu süreç boyunca kişisel ve profesyonel gelişimime önemli ölçüde katkıda bulunan içgörülerini ve teşvikleri için minnettarım. Ayrıca, deneysel çalışmalarında ve gerekli malzeme temininde bana yardımcı olarak bilimsel çalışmamın başarıyla tamamlanmasında önemli bir rol oynayan yüksek lisans öğrencisi Seher DALGIÇ'a katkılarından dolayı teşekkür etmek isterim. Son olarak, tez çalışmamda bana destek olarak, olağanüstü hoşgörü ve fedakârlık gösteren sevgili eşim Gülhan YILDIZ'a ve çocuklarım Hüseyin Agrin YILDIZ ile Ekin YILDIZ'a en derin sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Mehmet Ali YILDIZ
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Karayolu Yapısı ve Türleri	2
1.2. Kaplama Tipi ve Kalınlığına Etki Eden Faktörler	3
1.3. Beton Yol, Tarihi ve Gereklilikleri	4
1.4. Ülkemizde Beton Yol Başlangıcı	6
1.5. Reaktif Pudra Beton	6
1.6. Reaktif Pudra Beton Üretiminde Kullanılan Bileşenlerin ve Metodolojilerin İncelenmesi	8
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1. Mardin Taşı Tozu Katkılı Lifsiz Pudra Beton (MPB) Malzemeleri	22
3.1.1. Çimento türü ve özellikleri	22
3.1.1. Agrega türü ve özellikleri	23
3.1.1. Silis dumanı türü ve özellikleri	25
3.1.4. Kullanılan suyun türü ve özellikleri.....	26
3.1.5. Süper akışkanlaştırıcı türü ve özellikleri	26
3.2. Mardin Taşı Tozu Katkılı Lifli Pudra Beton (MLPB) Malzemeleri.....	26
3.2.1. Çelik lifin türü ve özellikleri.....	26
3.3. Beton Kontrol Numunesi (RFB) Malzemeleri.....	27
3.4. Lifsiz RPB Karışım Ölçüleri.....	28
3.4.1. İdeal lifsiz RPB karışım ölçüleri.....	28
3.4.2. Mardin taşı tozu katkı lifsiz pudra beton (MPB)	30
3.5. Lifli RPB Karışım Ölçüleri.....	31
3.5.1. İdeal lifli RPB karışım ölçüleri.....	31
3.5.2. Mardin taşı tozu katkı lifli pudra beton (MLPB).....	33
3.6. Lifsiz Referans Beton (RFB)	35
3.7. Lifli Referans Beton (RFLB)	35
3.8. Kür Uygulamaları	37
3.9. Basınç (Mukavemet) Deneyi	38
3.10. Eğilme Deneyi	40
3.11. Donma-Çözülme Deneyi	41
3.12. Taramalı Elektron Mikroskopu ve EDX Analizi	43

3.13. X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) Analizi.....	46
3.14. Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (UPV) Deneyi	47
3.15. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF Analizi)	47
3.16. Kullanılan Malzeme Çeşidi ve Miktarı.....	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	50
4.1. Basınç ve Eğilme Deney Sonuçları	50
4.1.1. Lifsiz ve lifli üretilen beton numunelerin basınç ve eğilme testleri	50
4.1.1.1. Referans Olarak Üretilen Beton Numunelerin Basınç ve Eğilme Testleri	50
4.1.1.2. Mardin Taşı Tozlu Beton Numunelerin Basınç ve Eğilme Testleri	51
4.2. Donma-Çözülme Deney Sonuçları	52
4.2.1. Lifsiz ve lifli üretilen beton numunelerin donma-çözülme testleri.....	52
4.3. Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (UPV) Deney Analizi	53
4.3.1. Lifsiz ve lifli betonların ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV).....	53
4.3.1.1. Referans beton numunelerin ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) deney sonuçları	53
4.3.1.2. Mardin taşı tozu kullanılarak üretilen beton numunelerin ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) deney sonuçları	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR	63
EKLER	69

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Quebec'te inşa edilen köprünün karışım ölçüleri (Richard & Cheyrezy, 1994)	9
Çizelge 1.2. RPB karışım ölçüleri (Düzgün, 2004)	10
Çizelge 1.3. RPB basınç dayanımları (Düzgün, 2004)	10
Çizelge 1.4. Mekanik özellikler (Taşdemir vd., 2004)	10
Çizelge 3.1. CEM II/A-LL 42,5 R kalkerli portland çimentosunun kimyasal içeriği	22
Çizelge 3.2. CEM II/A-LL 42,5 R kalkerli portland çimentosunun mekanik ve fiziksel içeriği	23
Çizelge 3.3. Mardin taşı tozunun kimyasal içeriği	24
Çizelge 3.4. Kullanılan silis dumanı kimyasal içeriği	25
Çizelge 3.5. Süperakışkanlaştırıcı özellikleri (İksa, 2024)	26
Çizelge 3.6. Çelik lifin özellikleri (Kemerix, 2024)	27
Çizelge 3.7. İdeal lifsiz RPB 200 karışım ölçüleri (Richard vd., 1995)	28
Çizelge 3.8. İdeal lifsiz RPB karışım ölçüleri (Bakiş, 2015; Richard vd., 1995)	29
Çizelge 3.9. Mardin taşı tozu katkılı lifsiz pudra beton (MPB) karışım ölçüleri	30
Çizelge 3.10. Mardin taşı tozu katkılı lifsiz pudra beton (MPB) karışım miktarları	31
Çizelge 3.11. İdeal lifli RPB 200 karışım ölçüleri (Richard vd., 1995)	32
Çizelge 3.12. İdeal lifli RPB 200 karışım ölçüleri (Bakiş, 2015; Richard vd., 1995)	33
Çizelge 3.13. Mardin taşı tozu katkılı lifli pudra beton (MLPB) karışım ölçüleri	34
Çizelge 3.14. Mardin taşı tozu katkılı lifli pudra beton (MLPB) karışım ölçüleri	35
Çizelge 3.15. Lifsiz referans beton (RFB) karışım ölçüleri.....	35
Çizelge 3.16. Lifli referans beton (RFLB) karışım ölçüleri	36
Çizelge 3.17. Çimento, silis dumanı ve Mardin taşı tozunun kimyasal içeriği	48
Çizelge 3.18. Malzeme çeşidine göre kullanılan malzeme miktarı	48
Çizelge 3.19. Deney bazlı kullanılan malzeme miktarı	49
Çizelge 4.1. Referans olarak oluşturulan betonun basınç ve eğilme sonuçları.....	51
Çizelge 4.2. Mardin taşı tozu kullanılarak oluşturulan betonun basınç ve eğilme sonuçları.....	51
Çizelge 4.3. Donma-çözülme deneyi sonuçları	52
Çizelge 4.4. Referans olarak oluşturulan betonun ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) sonucu	53
Çizelge 4.5. Mardin taşı tozu kullanılarak oluşturulan betonun ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) sonuçları	54
Çizelge 5.1. RFB, 7 gün 20 °C standart su kürü sonuçları	55
Çizelge 5.2. RFB, 28 gün 20 °C standart su kürü sonuçları	56
Çizelge 5.3. RFB, kombine kür sonuçları.....	56
Çizelge 5.4. RFLB, 7 gün 20 °C standart su kürü sonuçları	57
Çizelge 5.5. RFLB, 28 gün 20 °C standart su kürü sonuçları	58
Çizelge 5.6. RFLB, kombine kür sonuçları	58
Çizelge 5.7. MPB, 7 gün 20 °C standart su kürü sonuçları.....	59
Çizelge 5.8. MPB, 28 gün 20 °C standart su kürü sonuçları.....	59
Çizelge 5.9. MPB, kombine kür sonuçları.....	60
Çizelge 5.10. MLPB, 7 gün 20 °C standart su kürü sonuçları	60
Çizelge 5.11. MLPB, 28 gün 20 °C standart su kürü sonuçları	61
Çizelge 5.12. MLPB, kombine kür sonuçları	61

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kullanılan çimentoya ait bir görüntü.....	23
Şekil 3.2. Mardin Türkmen deresi şantiyesi	24
Şekil 3.3. Mardin taşı ve farklı kalibrasyonları	24
Şekil 3.4. Kullanılan silis dumanı görüntüsü.....	25
Şekil 3.5. Kullanılan çelik lifin görünümü	27
Şekil 3.6. Basınç deneyine ilişkin şekil	39
Şekil 3.7. Eğilme deneyine ilişkin şekil.....	40
Şekil 3.8. Eğilme deneyinden bir görüntü	41
Şekil 3.9. Donma – çözülme deneyine ait bir fotoğraf	43
Şekil 3.10. Silis dumanı partiküllerinin morfolojisi (a) 500 KX (b) büyütme (c) EDX	44
Şekil 3.11. Çimento (CEM II/A-LL 42.5 R) partiküllerinin (a) 100 k ve (b) 500 k büyütme (c) EDX.....	44
Şekil 3.12. Mardin taşı partiküllerinin (a) 100 k ve (b) 500 k büyütme (c) EDX.....	45
Şekil 3.13. a) Silis Dumanı b) Mardin taşı c) CEM II/A-LL 42,5 R Çimento () Portlandit, () Kuvars, (▼) Kalsit, Silis (), Augite(), Dolomit() XRD faz analizleri	46
Şekil 7.1. Mardin Türkmen deresi şantiyesi	69
Şekil 7.2. Mardin taşı tozlu ve referans beton numuneler	69
Şekil 7.3. Su havuzu içinde bulunan numuneler	70
Şekil 7.4. Basınç numunesi ve cihazı	70
Şekil 7.5. Eğilme cihazı ve numunesi.....	71
Şekil 7.6. Numune kalıpları	71
Şekil 7.7. Karıştırıcı (Mikser).....	72
Şekil 7.8. Numune sarsma cihazları.....	72
Şekil 7.9. Farklı boyutlardaki Mardin taşı görünümü.....	73
Şekil 7.10. Numuneler ve etüv cihazı	73
Şekil 7.11. UPV deneyinden bir görünüm	74

KISALTMALAR

MLPB	: Mardin Taşı Lifli Pudra Beton
MPB	: Mardin Taşı Pudra Beton
RFB	: Referans Lifsiz Beton
RFLB	: Referans Lifli Beton
RPB	: Reaktif Pudra Beton
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
UYPB	: Ultra Yüksek Performanslı Beton
NDB	: Normal Dayanımlı Beton
SA	: Süperakışkanlaştırıcı
SD	: Silis Dumanı
SEM-EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
UPV	: Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı
XRD	: X-ışını Kırınımı
XRF	: X-ışını Floresans Spektrometresi

1. GİRİŞ

Mühendislik, var olan toplumun ihtiyaçlarından kaynaklı olarak çok sayıda anabilim dalına ayrılmış geniş bir alandır. İnşaat Mühendisliği ise insanoğlunun var olmasıyla başlayan ve gelişen bir meslek dalı olarak mühendislik alanı içinde yer almaktadır. Bu mühendislik alanı; ulaşım yapıları (yol, köprü vb.), su yapıları, statik, malzeme bilimi, geoteknik gibi uzmanlık gerektiren alt alanlara ayrılmıştır. İnsanoğlunun doğuşundan beri var olan bu mühendislik alanı şimdiye kadar sayısızca eser vermiştir. Bu eserlerin en başında gelen ve milattan önce 26. yüzyılda yapıldığı tahmin edilen Mısır Büyük Giza Piramidinin inşaat mühendisliği bakımından büyük bir önemi vardır (Edwards, 2003).

Ulaşım, insan veya eşyanın var olan ihtiyaçlarını karşılamak üzere zaman ve yer değişikliği bakımından fayda sağlayarak mekân değiştirme hizmetidir. Ulaşım ağının büyük olması ülkelerin gelişmişlik seviyelerine bağlıdır. Bu bakımdan düşünüldüğünde büyük ulaşım ağı ve kolay ulaşım için var olan ülkenin geoteknik özellikleriyle birlikte sahip olunan karayolları, denizyolları, havayolları ve demiryolları olmak üzere birbirleriyle eşgüdüm halinde olması gerekmektedir. Bu şartlar sağlandığında ise mühendisliğin ana unsurlarından olan süratli, güvenilir, rahat ve en önemlisi az masraflı bir hizmet verilebilir (Kozak, 2010).

Karayolu yapımında; güvenlik (emniyet), konfor ve bozulmaya karşı dirençli olması önemli olarak nitelendirebileceğimiz hususlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Var olan ülkelerin ulaşım ağlarının yeterli olması ve yeterli şartları sağlaması ülkelerin ileri seviyede ulaşımına sahip olduklarını göstermektedir. Ancak ülkemizde ulaşım ağları yetersiz olmakla birlikte gittikçe ağır taşıt trafiği artış göstermektedir. Artış gösteren ağır trafik ise karayollarında bulunan üstyapının bozulmasına neden olmaktadır (Şimşek vd., 2005).

Belirlenmiş bir güzergâhta belirli geometrik özelliklere dikkat edilerek, istenen zemin yapısının düzeltilerek motorlu taşıtların sürat, emniyet ve konfor koşullarının sağlanmasının tümünün bir arada olduğu yapıya karayolu yapısı denmektedir. Bu yapı, alt ve üst yapı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Kozak, 2011).

1.1. Karayolu Yapısı ve Türleri

Tesviye yapılan yüzey ile var olan zemin arasındaki alan karayolu alt yapısı olarak tanımlanmaktadır. Alt yapı, karayollarında dolgu yapılacak olan yerlerde sonradan toprak ile oluşturulan toprak gövde yapısı ile yarma olan yerlerde doğal zemin yapısından oluşmaktadır. İstenen düzlük ile yol üzerinde eşit yük dağılımı oluşturmak üzere sıkıştırma suretiyle serilen toprak da yarma tarafında bulunan alt yapıyla bir bütündür (Erel, 1978).

Belirlenmiş bir güzergâhta belirli geometrik özelliklere dikkat edilerek, istenen zemin yapısının düzeltilerek motorlu taşıtların sürat, emniyet ve konfor koşullarının sağlanmasının tümünün bir arada olması karayolu üst yapısını meydana getirmektedir (Kozak, 2011).

Üstyapı; malzeme türü, özellikleri ve yapılma yöntemi göz önünde bulundurulmak üzere esnek ve rijit şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Zemin, trafik, çevresel koşul ile maliyet göz önünde bulundurulmak üzere üst yapı türü seçilir (Umar & Açar, 1991).

Esnek üstyapıları incelediğimizde genel olarak üstten aşağı doğru, esnek kaplama tabakası, üst temel ile alt temel bölümlerinden meydana gelmektedir (Bakış & Hattatoğlu, 2016). Rijit yol yapıları, alt temel ve üstüne yapılan beton matrisli platformdan meydana gelmektedir. 20 yıllık proje ömrü içinde, standart dingil yükü sayısı $60-75 \times 10^6$ 'dan fazla olan yollar ve büyük yolcu uçaklarının yıllık 5000'den fazla kalkış yapan havaalanlarının rijit kaplama yapılma zorunluluğu bulunmaktadır. Birçok kurum, yolun trafiğe açıldığında tek yöndeki günlük ticari taşıt sayısının 5000'den fazla olması halinde beton kaplama yapılmasını öngörmektedir (Bakış & Hattatoğlu, 2016). Üst yapı tasarımı yapılırken temel amaç, tabaka kalınlığı ve üstyapı malzeme özelliklerini saptamaktır (Bayrak, 2007).

Beton yolların inşası için gereken ilk yatırımın önemli ölçüde yüksek olma eğiliminde olmasına rağmen (geleneksel asfalt yüzeylere kıyasla yaklaşık %30 daha yüksek) bu beton yollar, önemli ölçüde daha düşük bakım giderleri ve daha uzun bir kullanım ömrüne katkıda bulunan ve sık sık onarım veya değiştirme ihtiyacını azaltan üstün dayanıklılık özellikleri nedeniyle zaman içinde daha avantajlı bir ekonomik teklif sunmaktadır. Bir diğer faydası ise, aynı zamanda bir dizi önemli çevresel avantaj da sağlamasıdır; özellikle aydınlatma gereksinimleriyle ilişkili enerji tüketiminin

azaltılmasına katkıda bulundukları için dikkat çekicidirler; bu olgu büyük ölçüde ışığın verimli bir şekilde dağıtılmasını kolaylaştıran doğal yansıtıcı özelliklerine atfedilebilir (Soares Santos vd., 2024).

1.2. Kaplama Tipi ve Kalınlığına Etki Eden Faktörler

Kapsamlı araştırmalar ve deneysel incelemeler, araç trafiği hacmindeki artışın, üstyapı yapısına uygulanan yüksek stres seviyelerine önemli ölçüde katkıda bulunabileceğini ve bunun da karayolu altyapısının optimum performansını ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için tasarım kalınlığı özelliklerinin kapsamlı bir şekilde yeniden gözden geçirilmesini ve potansiyel olarak değiştirilmesini gerektirdiğini tutarlı bir şekilde göstermiştir (Cervantes & Roesler, 2009).

Genellikle ESAL olarak adlandırılan eşdeğer tek aksların ölçümü, üstyapıların gerekli kalınlık spesifikasyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir; bu nedenle trafik yüklerinin hacmindeki ve ağırlığındaki artış, araç hareketinin getirdiği gerilimi yeterince desteklemek ve dağıtmak için daha sağlam ve daha kalın beton plakların gerekliliği ile doğrudan ilişkilidir (Shafabakhsh vd., 2015).

Kaplama türü ve buna karşılık gelen derinliğin seçiminde; trafik faktörü, iklim ve çevre faktörü, malzeme faktörü ile yapım ve bakım faktörleri önemli rol oynamaktadır (Tunç, 2007).

Mühendis, yalnızca şu anda yaygın olan mevcut trafik yoğunluklarını değil, aynı zamanda üstyapının operasyonel ömrü boyunca gerçekleşmesi öngörülen araç akışındaki artışları da titizlikle dikkate almalı, böylece tasarımın gelişen ulaşım talepleri karşısında sağlam ve işlevsel kalmasını sağlamalıdır (Assidik & Sekaryadi, 2022).

Eğilme dayanımı ve Elastisite Modülü gibi kritik faktörler dâhil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere inşaat sürecinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, rijit kaplamanın gerekli kalınlığının belirlenmesi üzerinde derin ve önemli bir etkiye sahiptir ve böylece yalnızca kaplamanın yapısal bütünlüğünü ve uzun ömürlülüğünü değil, aynı zamanda çeşitli yük koşulları ve çevresel etkiler altındaki genel performansını da etkiler (Buick & Oppenlander, 1974).

1.3. Beton Yol, Tarihi ve Gereklilikleri

“Beton yollar” çimento beton kaplamalardan oluşmaktadır (Ağar vd., 1998). Modern zamanların ilk beton yolu 1880 yılında Avustralya'nın Sidney kentinde inşa edilmiştir. Bu yolun en az elli yıl boyunca kullanıldığı tahmin edilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ilk beton yol 1891 yılında Ohio eyaletinin Bellefontaine kentinde inşa edilmiştir. 20'nci yüzyılın ortalarına gelindiğinde beton yollar daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlandı. Yüzyılın ilk yarısında Amerika Birleşik Devletleri'nin yanı sıra Fransa, Belçika ve Almanya'da da beton yollar inşa edildi. Dünya Savaşı'na hazırlanan Almanya'da 1930'larda beton otoyollar 4000 kilometreye kadar uzandı. Son elli yılda Avusturya, İspanya, Birleşik Krallık, Kanada, Güney Afrika, Belçika, Fransa, Almanya ve Avustralya'da beton yollar inşa edilmiştir. Çin, Hindistan ve Azerbaycan'da da son yıllarda beton yol yapımına başlanmıştır(Ağar vd., 1996; Yeğınobalı, 2010).

Bellefontaine, Ohio'da 1894 yılında beton kaplamaların yerleştirilmesi genellikle beton kaplama tarihinin başlangıcı olarak kabul edilir. İskoçya'da ise beton, 1879 yılında bağlayıcı olarak Portland çimentosu ile kullanılmaya başlandı. Blanchard'ın 1919 tarihli Amerikan Otoyol Mühendisleri El Kitabı'na göre “Yüzey çok iyiydi, ancak yol kırılmaya başladığında çok hızlı bir şekilde parçalara ayrıldı” (Blanchard, 1919). Blanchard (1919)'a göre, 1893 yılında Monroe İlçe Mühendisi J. Y. McClintock, Rochester, New York'taki Güney Fitzhugh Caddesi'nde Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ilk Portland çimentolu beton (PCC) kaplamayı kurdu (Blanchard, 1919).

Topçu (2006) çalışmasında, inşaat mühendisliğinin önemli bir yönü olan yol yapımının karmaşık sürecinde kullanılan beton malzemeler için kritik öneme sahip temel özelliklerin kısa bir özetini ortaya koymuştur. Ele alınması gereken en önemli hususlardan biri, dâhil edilmesi amaçlanan kimyasal katkıların yalnızca beton matrisinde bulunan bağlayıcı bileşenlerle değil, aynı zamanda birbirleriyle de etkileşime girerek betonun genel performansını ve dayanıklılığını nasıl etkileyeceğini tespit etme zorunluluğudur. Buna ek olarak, beton karışımında kullanılacak agrega kaynaklarının eksiksiz bir şekilde tanımlanması esastır; buna ek olarak kalite kontrol testlerinin oluşturulması ve betonun uzun ömürlülüğünü ve yapısal bütünlüğünü sağlamak için hayati önem taşıyan alkali-silika reaktivite testlerinin uygulanması gerekmektedir. Ayrıca, çimentonun inceliği ve doğal kimyasal özelliklerinin betonun sonuç özellikleri

üzerindeki etkisi, optimum performansı belirlemek için sistematik olarak değerlendirilmelidir. Bir başka unsur ise, kullanılacak uygun su/çimento oranının belirlenmesi son derece önemlidir, çünkü bu oran betonun geçirgenliği üzerinde önemli etkilere sahiptir ve bu da dayanıklılığını ve çevresel faktörlere karşı direncini etkiler. Beton karışımını oluşturan çeşitli malzemelerin oranları, betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkilememek veya zaman içinde yapısal bütünlüğü tehlikeye atabilecek donma-çözülme hasarına neden olmamayı sağlamak için dikkatlice belirlenmelidir. Mikro çatlakların oluşumunu azaltmak ve kürleme işlemi sırasında aşırı büzülme önlemek için, su/çimento oranının hâkim hava koşullarına ve beton için benimsenen özel bakım uygulamalarına göre dinamik olarak ayarlanması kritik önem taşımaktadır. Ayrıca, kontrollü laboratuvar koşullarından şantiyenin pratik gerçeklerine geçerken uygulanması gereken gerekli ayarlamalara ilişkin bilinçli kararlar alınması zorunludur. Bir diğer etken ise, çeşitli beton karıştırma sürelerine, üretim sahalarına ve yerleştirme yöntemlerine uyum sağlamak için kapsamlı planlar geliştirilmeli ve tüm lojistik hususların eksiksiz bir şekilde ele alınması sağlanmalıdır. Ayrıca, yerleştirilen beton içinde oluşabilecek hava boşluklarını etkili bir şekilde tespit etmek için teknikler oluşturulmalıdır, çünkü bunlar malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını önemli ölçüde zayıflatabilir. Betonun bakımı için kullanılacak uygun kür malzemeleri seçilirken, inşaat aşamasında hâkim olan hava koşullarının yanı sıra kullanılan özel karışım oranının da dikkate alınması çok önemlidir, çünkü bu faktörler şüphesiz kürleme sürecinin etkinliğini etkileyecektir. Son olarak, betonun genel performans özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynayacağından, belirli karışım oranını ve kullanılan agregaların geometrik şeklini dikkate alarak beton matrisi içindeki agrega paketlemesini doğru bir şekilde tanımlayan bir teknik geliştirmek çok önemlidir (Topcu, 2006).

Beton yolların tarihi hem kapsamlı hem de çok yönlüdür ve çağdaş altyapı geliştirmedeki önemli ekonomik avantajlarının yanı sıra olağanüstü uzun ömürlülükleriyle de giderek daha fazla kabul görmektedirler. İlk olarak 20. yüzyılın ilk on yıllarında tasarlanan ve pratik kullanıma sunulan beton kaplamaların tasarımı ve uygulaması, özellikle yoğun araç trafiği ve artan kullanım ile birlikte önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Bu yolların yapım süreci, çimento, su ve çeşitli agregaların hassas bir şekilde bir araya getirilmesini içeren bir çalışmadır; bu bileşenler birlikte günlük kullanımın zorluklarına dayanabilen son derece dayanıklı bir yüzey oluşturur ve doğru koşullar altında bütünlüğünü ve işlevselliğini otuz yıl kadar uzun bir süre koruyabilir ve bu süre boyunca yalnızca minimum bakım ve dikkat gerektirir (Soares Santos vd., 2024).

1.4. Ülkemizde Beton Yol Başlangıcı

Türkiye'de ve dünyada yollar, gelişmişliğin göstergelerinden biridir. Stabilize köy yollarından asfalt kaplamalara ve otoyollara kadar karayollarının uzun bir geçmişi vardır. Afyon'daki ilk 2 kilometrelik beton yol denemesi beton yol çalışması bakımından büyük önem taşımaktadır. 28 Mayıs 2004 tarihinde başlayan Afyon-Emirdağ arasındaki 2 kilometrelik beton deneme yolu çalışmaları altı ayda tamamlandı (Kozak, 2016).

Afyonkarahisar-Emirdağ Ayrımı Sınır Devlet Yolu'nun İscehisar geçişi yakınlarında inşa edilmesi amaçlanıyordu. KGM bu yolu bölüyor ve iyileştiriyordu. O dönemde İscehisar geçişi zaten bölünmüş olduğu için, karşılaştırma yapmak amacıyla bir taraf beton, diğer taraf asfalt kaplanacaktı. Ancak güzergâhın Afyonkarahisar çıkışındaki bölünmüş yolda çalışmalar başladı ve aradan geçen sürede hızla ilerledi. Bu kez beton yol, Afyonkarahisar'ın merkezine 19 kilometre uzaklıktaki İscehisar yerine kente daha yakın bir yerde konumlandırıldı ve inşaatın uygulanabilirliği incelendi. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün onayı ile bölünmüş beton yol kesiminin 5+700 ile 7+700 kilometreleri arasında inşa edilmesine karar verildi (Yeğinobalı, 2010).

Beton yolların Türkiye'nin coğrafi sınırları içerisindeki tarihsel seyri, ülkenin ulaşım altyapısında, teknolojik ilerlemeler ve zaman içerisinde ortaya çıkan kapsayıcı ekonomik zorunluluklar dâhil ancak sadece bunlar olmamak üzere sayısız faktör tarafından gereklilikler sonucu yapımına başlanılan bir çalışmadır. Özellikle silindirle sıkıştırılmış betonun (RCC) kayda değer bir şekilde kullanılması, lojistik kabiliyetlerin artırılmasında ve başta İzmir olmak üzere çeşitli bölgelerde ekonomik genişlemenin teşvik edilmesinde önemli bir rol oynadığı için kırsal kalkınma alanında etkili bir yenilik olarak öne çıkmaktadır (Gülhan, 2024).

1.5. Reaktif Pudra Beton

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB) ailesi reaktif pudra betonu (RPB) içerir. “Toz” kelimesi RPB yapımında kullanılan malzemelerin toz tane boyutunda olduğunu, ‘reaktif’ kelimesi pozolanik aktivitenin sıcak kürleme işlemi ile tekrarlandığını ve ‘beton’ kelimesi diğer betonlar gibi bir çimento matrisine sahip olduğunu gösterdiğinden, bu beton türü reaktif pudra beton olarak bilinir. RPB, son derece yüksek basınç ve eğilme dayanımları nedeniyle normal dayanımlı betondan (NDB) daha iyi performans gösterir.

Yüksek dayanımlı beton (YDB), süper akışkanlaştırıcılarla (SA) birleştirilmiş çimento ve silis dumanından (SD) yapılır (Topçu vd., 2021).

Daha önceki zamanlarla karşılaştırıldığında, modern yapılarda betonun basınç dayanımının giderek arttığı açıktır. Gelişen teknolojilerle birlikte çok katlı yapıların sayısının artması bunun başlıca nedenlerinden biridir. Yüksek performanslı beton (YPB), betonun artan basınç dayanımının bir ürünüdür. 1960'larda 15-25 MPa dayanıma sahip betonların yerini 1970'lerde 40-50 MPa basınç dayanımına sahip betonlar almıştır. Zaman içinde, basınç dayanımındaki artışa paralel olarak su/çimento oranı da değişmiştir. 1970'lerde betona akışkanlaştırıcıların eklenmesi, 1950'lerde 0,60-0,70 olan su/çimento oranının yaklaşık 0,40-0,55'e düşmesine, 1980'lerde süper akışkanlaştırıcıları ortaya çıkması ise betondaki su/çimento oranının 0,25'e düşmesine neden olmuştur (Topçu & Karakurt, 2005).

1980'lerden sonra silis dumanı, s/w oranını 0,20'nin altına düşürdüğü ve finansal faydalar sağladığı için popüler hale gelmiştir. Ayrıca, betonun basınç dayanımı 200 MPa'yı aşmıştır. Bu durum, şu anda çöp geri kazanımıyla ilgili en önemli endişe kaynağı olan sürdürülebilirlik konusunda önemli bir ilerlemeye yol açmıştır (Topçu vd., 2021).

Basınçlı kürlemenin artırılması ve yüksek sıcaklıkların kullanılmasıyla, 1990'larda betonun basınç dayanımı 650 MPa'ya yükseltilmiştir(Richard vd., 1995). RPB'de silisyum dumanı kullanılarak güç artırılır. RPB'nin mukavemeti YDB'lerden daha yüksektir. RPB'nin düşük boşluk oranı, mekanik nitelikleri ve fiziksel özellikleri onu çok güçlü bir kompozit yapı malzemesi haline getirmektedir (Dallaire vd., 1998).

Yaygın olarak RPB (Reaktif Pudra Beton) olarak adlandırılan betonarme, köprüler ve makinelerin temel destekleri dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere çeşitli yapısal bileşenlerin imalatı ve inşası için son derece elverişli bir malzeme olarak kendini göstermektedir; bunun başlıca nedeni, optimum kürlenme koşulları altında 98 MPa'ya kadar basınç dayanım kapasitesidir (Geetha & Selvakumar, 2023). Geetha & Selvakumar'a (2023) çalışmasında; Otoklav kürleme işleminin, özellikle genel mukavemet ve uzun vadeli dayanıklılık açısından, geleneksel buhar kürleme ile üretilene kıyasla belirgin şekilde daha üstün mukavemet özellikleri sergileyen beton ürettiğini, çeşitli dayanıklılık parametrelerinin, özellikle otoklavlama işlemine tabi tutulduğunda, beton karışımında kullanılan çelik tozu oranındaki artışla ilişkili olarak kayda değer bir iyileşme gösterdiğini, beton numunelerinin hem basınç dayanımının hem de eğilme dayanımının, karışıma dahil edilen çelik tozu içeriği arttıkça önemli ölçüde arttığını gösteren doğrudan bir ilişkinin kurulduğunu, buna karşılık, çelik tozu içeriği arttıkça

reaktif pudra betonun (RPB) işlenebilirliğinin azaldığı, bunun da malzeme bileşimi ile beton karışımının kullanım özellikleri arasında karmaşık bir etkileşim olduğunu gösterdiği kaydedilmiştir (Geetha & Selvakumar, 2023).

Fiber takviyeli reaktif pudra betonun (RPB), geleneksel beton malzemelerle yan yana getirildiğinde zorlu darbe testi sırasında önemli ölçüde daha fazla enerji emme kapasitesi göstermesi ve böylece ani kuvvetlere karşı daha fazla dayanıklılık ve esneklik gerektiren durumlar, bu yenilikçi kompozit malzemenin üstün performans özelliklerini öne çıkarmaktadır (Dinler & İpek, 2024).

Atılan cam ve geri kazanılmış beton dahil yeniden kullanılan malzemelerin reaktif pudra beton (RPB) formülasyonlarına dahil edilmesinin, elde edilen kompozitin yapısal bütünlüğünü ve mekanik mukavemetini koruduğu ve aynı zamanda geleneksel inşaat uygulamalarıyla ilişkili genel çevresel ayak izinin önemli ölçüde azaltılmasına katkıda bulunduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır (Abellan-Garcia vd., 2023).

Çeşitli diğer endüstriyel yan ürünlerle birlikte cüruf tozunun kullanılması, yalnızca çevremizde giderek azalan değerli doğal kaynakların korunmasını teşvik etmekle kalmayıp, aynı zamanda Reaktif pudra beton (RPB) ile ilişkili mekanik özelliklerin iyileştirilmesine ve geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunarak, inşaat mühendisliği alanındaki çeşitli uygulamaların zorluklarına dayanabilecek daha sürdürülebilir ve yüksek performanslı bir yapı malzemesi üretimini sağlamaktadır (Sakthieswaran & Brintha, 2023).

1.6. Reaktif Pudra Beton Üretiminde Kullanılan Bileşenlerin ve Metodolojilerin İncelenmesi

RPB, 1990'larda Fransa'da, reaktif katkıların yanı sıra ince agregaları da içeren farklı bir formülasyon kullanılarak olağanüstü gerilme mukavemeti ve süneklik elde edilmesini vurgulayarak tasarlandı (Akhnoukh & Skinner, 2022; Al-Fadhli, 2024). Açıklık uzunluklarını uzatma ve gerekli giriş miktarını azaltma kapasitesi sayesinde altyapı çalışmalarında, özellikle de köprü mühendisliği alanında kullanılmaktadır (Akhnoukh & Skinner, 2022).

RPB veya Reaktif pudra beton, tipik olarak bağlayıcı maddelere nispeten düşük bir su/çimento oranı kullanır ve bu da RPB'nin yapısal bütünlüğüne ve genel performans özelliklerine önemli ölçüde katkıda bulunan ana bileşenlerden biri olarak dikkat çeker.

Çimentoya ek olarak, silis dumanı ve kuvars tozu gibi ultra ince tozlar da sıklıkla karışıma dâhil edilir, çünkü bu malzemeler betonun mekanik mukavemetini ve dayanıklılığını artırmada çok önemli bir rol oynar ve böylece zaman içinde çeşitli bozulma biçimlerine karşı direncini artırır. Bu ultra ince katkıların sinerjik etkisi sadece betonun mikro yapısını optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda daha verimli bir paketleme yoğunluğunu kolaylaştırarak geleneksel beton karışımlarına kıyasla üstün özellikler sergileyen bir kompozit malzeme elde edilmesini sağlar (Hendi & Aljalawi, 2024; Rahul vd., 2023).

Son akademik incelemeler ve araştırma çabaları, inşaat uygulamalarında geleneksel çimentonun kısmi ikamesi olarak geri dönüştürülmüş malzemelerin, özellikle de ince öğütülmüş atık cam ve kalsiyum karbonatın kullanılmasının potansiyel faydalarını önemli ölçüde vurgulamış ve böylece çevresel sürdürülebilirliği artırırken aynı zamanda ilgili maliyetlerde bir azalma sağlama gibi hedefleri önemli ölçüde ilerletmiştir (Abellan-Garcia vd., 2023; Rahul vd., 2023).

Mikro çelik, yeniden işlenmiş bakır ve doğal kaynaklardan elde edilen organik elyaflar gibi çeşitli bileşenleri kapsayan hibrit elyaf malzemelerin entegrasyonunun, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Bu noktayı deneysel kanıtlarla açıklamak gerekirse, mikro çelik elyafların matrise dahil edilmesinin hem basınç dayanımını hem de eğilme dayanımını önemli ölçüde desteklediği ve böylece çeşitli uygulamalarda malzemenin genel yapısal bütünlüğünü ve performansını artırdığı deneysel olarak doğrulanmıştır (Dawood vd., 2022; Hendi & Aljalawi, 2024).

Kanada'nın Quebec eyaletinde bulunan ve RPB teknolojisi kullanılarak inşası yapılan köprüde 200 MPa'lık etkileyici bir basınç değeri elde edilmesini sağlayan karışıma dahil edilen ilgili miktarlarla birlikte kullanılan malzemelerin bileşimi Çizelge 1.1.'de sunulmuştur (Richard & Cheyrezy, 1994).

Çizelge 1.1. Quebec'te inşa edilen köprünün karışım ölçüleri (Richard & Cheyrezy, 1994)

Kullanılan Malzeme	Miktar (kg/m³)
Çimento	705
Silis Dumanı	230
Kırılmış Kuvars Kumu	210
Kum	1010
Süper akışkanlaştırıcı	17
Çelik Lif	190
Su	195

RPB formülasyonu için gereken bileşenler ve kesin oranlar aşağıda detaylandırılmış olup Çizelge 1.2.'de verilmiştir (Düzgün, 2004).

Çizelge 1.2. RPB karışım ölçüleri (Düzgün, 2004)

Kullanılan Malzeme	Miktar (kg/m³)
Çimento PÇ 52,5	980
Silis Dumanı	225
Kum (600–150 µm)	490
Kuvars Unu (4 µm)	382
Çelik Tel (6 mm)	320
Süper akışkanlaştırıcı	19
Su	186

Düzgün (2004) tarafından yukarıdaki oranları kullanarak yapılan akademik çalışmada dikkate değer bulgular bulunmuş olup çalışma verileri Çizelge 1.3.'de sunulmuştur (Düzgün, 2004).

Çizelge 1.3. RPB basınç dayanımları (Düzgün, 2004)

Deney Numunesi	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
Seri 1	58,75	216,3
Seri 2	63,67	253,2
Seri 3	53,88	216,3

Özellikle normal dayanımlı beton, yüksek dayanımlı beton ve reaktif pudra betonun ayrımlarına ve niteliklerine odaklanan çeşitli beton türlerinin kapsamlı ve ayrıntılı bir karşılaştırmalı analizi, bileşimlerindeki, mekanik özelliklerindeki ve modern inşaat uygulamalarındaki potansiyel uygulamalarındaki ince farklılıkları ortaya çıkaracak olup aşağıdaki Çizelge 1.4.'de sunulmuştur (Taşdemir vd., 2004).

Çizelge 1.4. Mekanik özellikler (Taşdemir vd., 2004)

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınç Dayanımı (Mpa)	20- 60	60- 115	200- 800
Eğilme Dayanımı (Mpa)	4- 8	6- 10	50- 140
Kırılma Enerjisi (J/m ²)	100- 120	100- 130	10000- 40000
Elastisite Modülü (Gpa)	20- 30	35- 40	60- 75

Bu tezin ilk bölümünde, araştırmamla ilgili temel ilkeler çalışmanın kapsamının anlaşılmasına zemin hazırlayacak şekilde açıklanmıştır; literatür taramasına ayrılan sonraki bölümde ise, reaktif pudra betonla ilgili mevcut bilimsel çalışmaların incelenmesi yapılmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Atıkların birikmesi, ekosistemleri ve insan sağlığını olumsuz etkileyen çok çeşitli çevresel sorunları kapsayan ve atıkların düzenli depolama sahalarında yönetimi ve bertarafı ile ilgili ek mali yükler getiren çok sayıda önemli soruna yol açmaktadır. Sonuç olarak, atık malzemelerin büyük bir kısmının, içsel içerikleri ve potansiyel faydaları gerektiği gibi değerlendirilmeden atıldığını ve bunun da kaynak geri kazanımını en üst düzeye çıkarmayan atık yönetimi uygulamalarında endişe verici bir eğilime yol açtığını kabul etmek zorunludur. Hem akademisyenler hem de uygulayıcılar atık üretiminin çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltabilecek yenilikçi stratejiler tasarlamaya çalıştıklarından, bu zorlukları ele almak için devam eden araştırma ve geliştirme çabaları yürütülmektedir. Bununla birlikte, atık malzemelerin doğal bir değere sahip olduğunu kabul etmek ve vurgulamak çok önemlidir ve bu değer yaratma potansiyeli, uygun işleme ve dönüştürme yöntemleriyle etkili bir şekilde kullanılmalıdır. Bu bağlamda, atıkların yüksek değerli ürünlere dönüştürülmesini kolaylaştıran sistemlerin geliştirilmesini savunmak ve böylece sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliğine öncelik veren döngüsel bir ekonomiye katkıda bulunmak esastır. Nihayetinde, bu vizyonun hayata geçirilmesi, teknolojik ilerlemeleri, politika girişimlerini ve çevresel yönetim kültürünü teşvik etmek için kamu bilincini bütünleştiren çok disiplinli bir yaklaşım gerektirmektedir. Bu nedenle, atıkların yalnızca yönetilmesi gereken bir sorun olarak değil, uygun şekilde kullanıldığında ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğe önemli ölçüde katkıda bulunabilecek değerli bir kaynak olarak görülmesi gerektiği açıktır (Kaya & Turan, 2004).

Ünal ve Kibici (2001) çalışmalarında, mermer atığını beton karışımlarında ince agrega alternatifi olarak kullanarak basınç ve eğilme dayanımı özelliklerini kapsamlı bir şekilde incelemiş ve böylece potansiyel faydalarını ve performans özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu kapsamlı çalışma sırasında, her biri farklı oranlarda mermer atığı içeren toplam sekiz farklı beton numunesi tasarlanarak üretilmiş ve bu atık malzemenin etkilerini değerlendirmek amacıyla geleneksel beton formülasyonlarına sistematik olarak eklenmiştir. Bu deneylerden titizlikle elde edilen sonuçlar daha sonra normal beton için standart değerlerle karşılaştırılmış ve belirli bir dozajda uygulandığında mermer atığının dahil edilmesinin betonun hem basınç hem de eğilme dayanımı özelliklerinde kayda değer bir artışa yol açtığı gözlenmiştir. Dolayısıyla bu çalışma, mermer atıklarının inşaat malzemelerinde faydalı kullanımına ilişkin değerli bilgiler

sunmanın yanı sıra, yenilikçi malzemeler belirli oranlarda kullanıldığında betonun genel yapısal performansını artırma potansiyelini de vurgulamaktadır (Ünal & Kibici, 2001).

Bakırhan ve Bozkurt (2019) çalışmalarında, kontrollü bir laboratuvar ortamında kompozit hafif betonun yenilikçi üretim metodolojileri üzerine kapsamlı bir araştırma yapmış, özellikle ponza ve perlit gibi agregaları kullanarak bunların nihai ürüne katkılarını değerlendirmiştir. Bu agregalarla birlikte, karışıma CEM-I 42.5 N portland çimento, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun yanı sıra betonun özelliklerini geliştirmek için tasarlanmış çeşitli kimyasal katkıları da dâhil olmak üzere çeşitli başka malzemeler de dâhil edilmiştir. Elde edilen beton numuneleri, tasarlanmış bir dizi kürleme işleminden geçirilmiş, ardından performans özelliklerini belirlemek amacıyla fiziksel ve mekanik özellikleri teste tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlardan elde edilen verilere dayanarak, perlit içeren hafif beton formülasyonlarının üstün ısı yalıtım özellikleri sergilediği; ancak bu avantajın, ponzalı muadillerine kıyasla daha düşük mukavemet gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, uçucu külün beton karışımına dâhil edilmesinin elde edilen malzemenin genel mukavemetini önemli ölçüde artırdığı, silis dumanı ilavesinin ise yalıtım özelliklerini belirgin şekilde iyileştirdiği görülmüştür. Bu araştırma sadece çeşitli agrega karışımlarının performans özelliklerini göstermekle kalmıyor, aynı zamanda inşaat ve yapı malzemelerindeki potansiyel uygulamalar için hafif beton formülasyonlarının optimizasyonuna ilişkin bulgulara veriyor. Sonuç olarak, bu bulgular malzeme bilimi alanında, özellikle de sürdürülebilir ve verimli inşaat uygulamaları alanında süregelen tartışmalara katkıda bulunmaktadır (Bakırhan & Bozkurt, 2019).

Silikon metal veya ferrosilikon alaşımlarının bir yan ürünü olan ve son derece ince parçacık boyutuyla karakterize edilen silika dumanı, puzolanik aktivitesi sayesinde reaktif pudra betonun (RPB) basınç dayanımını önemli ölçüde artırır; bu spesifik aktivite, betonun yapısal bütünlüğü ve dayanıklılığının geliştirilmesinde kritik bir bileşen olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşumunun artmasına yol açan karmaşık kimyasal süreçleri kolaylaştırır (Ca, 2006; Feng & Zhengyu, 2006).

İnşaat malzemeleri ve mühendisliği alanında yapılan kapsamlı araştırmalar ve ampirik çalışmalar, özellikle %12 civarındaki silis dumanı içeriğinin, üstün mekanik performans özelliklerinin elde edilmesiyle ilişkili olduğunu ve böylece beton karışımlarının genel dayanıklılığı ve işlevselliği için çok önemli olan işlenebilirlik ve basınç dayanımı arasında ideal bir dengeye ulaşıldığını göstermektedir (Farhan vd., 2024).

Yüksek sıcaklıklar altında patlayıcı dökülme olasılığı, RPB içindeki sıcaklık dağılımını etkilediği kanıtlanmış olan silika dumanının dahil edilmesiyle azaltılır (Tian vd., 2012).

Süper akışkanlaştırıcıların reaktif pudra beton (RPB) formülasyonuna dahil edilmesi, bu gelişmiş malzemenin çökme akış özelliklerini ve genel işlenebilirliğini önemli ölçüde geliştirir, böylece daha yönetilebilir bir kullanım ve konsolidasyon sürecini kolaylaştırır; bu, RPB'nin karakteristik özelliği olan ve inşaat uygulamaları sırasında malzemenin akışkanlığına ve yerleştirme kolaylığına dikkat edilmesini gerektiren doğal olarak düşük su/çimento oranları göz önüne alındığında özellikle hayati önem taşır (Torres vd., 2020).

Alsadey & Omran (2022) çalışmalarında, elde edilen sonuçlar hem taze haldeki hem de sertleşmiş haldeki beton özelliklerinin, test edilen tüm beton karışımlarına süper akışkanlaştırıcı eklenmesinin ardından önemli ölçüde iyileşme gösterdiğini kesin olarak ortaya koymuştur. Ayrıca, süper akışkanlaştırıcı ilavesinin sadece betonun işlenebilirliğini artırmakla kalmadığı, aynı zamanda daha akışkan ve işlenebilir bir karışıma katkıda bulunduğu ve malzemenin daha kolay yerleştirilmesini ve bitirilmesini kolaylaştırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yüksek dozajlarda süper akışkanlaştırıcı uygulamasının, taşıma ve uygulama sırasında karışımın bütünlüğünü korumak için gerekli olan betonun kohezyonunu bozarak olumsuz bir etkiye sahip olduğunu belirtmek önemlidir. Bu kimyasal katkının eklenmesi çökmede bir artışa neden olarak işlenebilirliğin arttığını göstermiştir. Genel olarak bu çalışma, beton karışımlarında süper akışkanlaştırıcıların kullanımına ilişkin bilgiler sunmakta ve istenen işlenebilirliğin elde edilmesi ile malzemenin yapısal bütünlüğünün korunması arasında kurulması gereken dengeyi vurgulamaktadır. Sonuç olarak, bu araştırmadan elde edilen bulgular, beton formülasyonlarında kullanımlarıyla ilgili potansiyel dezavantajları azaltırken faydaları en üst düzeye çıkarmak için süper akışkanlaştırıcıların dikkatli bir şekilde dozajlanması ve seçilmesinin önemini vurgulamaktadır. Süper akışkanlaştırıcıların reaktif pudra beton (RPB) formülasyonuna dahil edilmesi, bu gelişmiş malzemenin çökme akış özelliklerini ve genel işlenebilirliğini önemli ölçüde artırır, böylece reaktif pudra betonunun karakteristik özelliği olan düşük su/çimento oranları göz önüne alındığında özellikle kullanım ve konsolidasyon sürecini kolaylaştırır, bu da inşaat uygulamaları sırasında malzemenin akışkanlığına ve yerleştirme kolaylığına dikkat edilmesini gerektirir (Alsadey & Omran, 2022).

Cüruf tozu ve yeniden değerlendirilmiş beton atıkları dâhil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere geri dönüştürülmüş malzemelerin entegrasyonu, inşaat endüstrisinde sürdürülebilirlik ilkelerini geliştirmeye odaklanan kapsamlı araştırma çabalarının konusu olmuştur. Özellikle deneysel bulgular, kuvars kumunun %15 oranında geri dönüştürülmüş beton atığı ile ikame edilmesinin, önemli ölçüde artırılmış mukavemet özelliklerinin elde edilmesiyle sonuçlandığını ve böylece yapısal bütünlüğün iyileştirilmesi potansiyelini ortaya koyduğunu göstermektedir. Bu bulgular, geleneksel malzeme kullanımının daha çevre dostu alternatifler lehine yeniden değerlendirilmesinin önemini altını çizmektedir; bu da sonuçta atıkların azaltılmasına ve sürdürülebilir bina uygulamalarının teşvik edilmesine katkıda bulunabilir (Sakthieswaran & Brintha, 2023b).

TS EN 197-1 yönetmeliği CEM I-II 42,5-52,5 R tipi çimentoların, Reaktif Pudra Betonun üretim süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılmasını uygun görmekte ve böylece ileri beton teknolojilerindeki çok yönlülüğü ve uygulanabilirliği ortaya koymaktadır (Bakiş, 2015).

Reaktif pudra betonlar alanında şu anda belirli karıştırma oranlarına ilişkin evrensel olarak kabul edilmiş bir ölçüt veya standardizasyon bulunmamaktadır, bu da farklı uygulamalar ve araştırma girişimleri arasında uygulamalarda önemli bir farklılık yaratmaktadır. Sonuç olarak, tek tip bir kılavuzun olmaması, her biri değişen malzeme özelliklerine ve proje gereksinimlerine göre optimum performans özelliklerini elde etmek için uyarlanmış çeşitli karıştırma metodolojilerinin uygulanmasına yol açmıştır. Bu bağlamda Mooney'in süspansiyon viskozite modeli ayrı bir öneme sahiptir. Bu model sadece beton karışımının viskozitesinin ve işlenebilirliğinin optimize edilmesine sağlamakla kalmaz, aynı zamanda malzemenin mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığının genel olarak geliştirilmesine de katkıda bulunur (De Larrard & Sedran, 1994; İpek, 2009).

Araştırmalar sonucunda, reaktif pudra beton sentezi ve formülasyonunda en olumlu sonuçları veren parametrelerin, kompozit karışımın spesifik birim ağırlığının metreküp başına tam olarak 2400 kilogram olarak ölçülmesi ve yüzde 25'lik bir konsantrasyonda silis dumanı içermesi ile formüle edildiği ileri sürülmüştür ve ayrıca 20 santigrat derecelik kontrollü bir sıcaklıkta suda 7 günlük bir kürlenme süresini, ardından 90 santigrat derecelik bir sıcaklıkta tutulan bir su banyosuna 2 gün daha daldırmayı ve 200 santigrat derecelik yüksek bir sıcaklıkta kuru havaya 2 gün maruz kalmanın son aşamasını kapsayan tanımlanmış bir kürlenme rejimi olduğu ifade edilmiştir (Talebinejad vd., 2004).

Çelik liflerin reaktif pudra beton formülasyonuna dâhil edilmesiyle, çeşitli kürleme işlemleri ve bunların süreleri ile betonun sonuçta ortaya çıkan basınç dayanımı arasındaki karmaşık ilişkiyi keşfetmek için kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Bu kapsamlı çalışmadan elde edilen bulgular, betonun dayanım özelliklerini geliştirmede en etkili olduğu düşünülen kür rejiminin, üç gün süreyle 90°C sıcaklıkta buhar kürü ve ardından on iki saat kadar 300°C gibi oldukça yüksek bir sıcaklıkta ek bir fırın kürü döneminden oluştuğu iddiasıyla sonuçlanmıştır. Bu sonuçlar, özellikle çelik liflerle güçlendirildiğinde betonun mekanik performansının iyileştiği yönünde sonuçlar vermektedir. (İpek, 2009).

Beton üretiminde sıklıkla kullanılan geleneksel su kürü yönteminin yanı sıra, reaktif pudra beton üretiminde buhar kürü dâhil ancak bununla sınırlı olmamak üzere alternatif ısıl kür tekniklerinin sistematik olarak kullanıldığı ve böylece incelenen kür yöntemlerinin kapsamının genişletildiği ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmanın bulguları, ısıl kür uygulamasının, betonun genel mukavemetini ve dayanıklılığını artırmaya önemli ölçüde katkı sağladığını göstermiştir. Bu nedenle, yapısal uygulamalarda kullanılan beton malzemelerin performans özelliklerinin iyileştirilmesinde çeşitli kürleme yöntemlerinin, özellikle de ısıl kürlemenin önemli rolünün olduğu göz ardı edilmeyecek bir gerçektir (Yazıcı vd., 2008).

Bir araştırmada beton kaplamanın değerlendirilmesi için özel olarak tasarlanmış toplam on farklı numune kategorisinin formüle edilmesini sağlamıştır. Bu numuneler, kireçtaşı agregalarının kullanıldığı standart dayanımlı bir betonu temsil eden C30/37 olarak sınıflandırılan bir referans betonu ve her ikisi de belirtilen C30/37 sınıfı karışım oranlarına uygun olarak hazırlanan Ahlat taşı agregaları ile yapılan bir referans betonu içeriyordu. Ayrıca, taş ocağından çıkarılan ve referans betonlarıinkiyle tutarlı boyutlarda kesilen doğal Ahlat taşı, ATB olarak adlandırılan Ahlat taşı içeren yedi farklı beton karışımı çeşidinin yanına eklenmiştir. Standart 28 günlük su kürü süresinin ardından, yapısal bütünlüklerini ve performans özelliklerini tespit etmek için tüm numuneler üzerinde sistematik olarak bir dizi sıkıştırma testi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın bulguları, belirlenen 28 günlük su kürünün ardından, C30/37 sınıfı kireçtaşı agregası kullanılan referans betonun basınç dayanımının 37,93 MPa gibi etkileyici bir değerde bulunması, ATB olarak bilinen Ahlat taşı içeren beton karışımları için kaydedilen maksimum basınç dayanımının ise 68,83 MPa gibi yüksek bir değere ulaştığını ortaya koymuştur (Bakış, 2016).

Beton kaplama kalınlığına ilişkin analiz ve buna bağılı maliyet hesaplamaları bağlamında, normal dayanımlı şahit numune olarak kabul edilen kireçtaşı agregası kullanılan C30/37 sınıfı beton, çelik liflerle bütünleştirilmiş kuvars agregasından oluşan reaktif pudra beton ve kireçtaşı agregası içeren ancak özellikle çelik lif içermeyen reaktif pudra beton olmak üzere üç farklı beton çeşidi tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu çalışma boyunca üretilen beton türlerinin dayanım özelliklerinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda, kapsamlı maliyet hesaplamalarının yanı sıra uygun kaplama kalınlıklarına ilişkin tespitler de gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmanın bulguları, 10×10^6 faktörü ile 8,2 tonluk eşdeğer tek dingil yükünü (W;8,2 olarak belirlenmiştir) taşıyacak şekilde tasarlanmış bir beton kaplama için, çelik lif içermeyen reaktif pudra beton için gerekli kaplama kalınlığının 17,15 santimetre, çelik liflerle güçlendirilmiş reaktif pudra beton için kaplama kalınlığının 17,17 santimetre ile biraz daha fazla ve tanık numune için gerekli kalınlığın 23,04 santimetre ile önemli ölçüde daha kalın olduğunu göstermiştir. Ayrıca, 1 kilometrelik bir mesafeye yayılan bir beton kaplamanın inşası için, lifsiz reaktif pudra beton kaplamayla ilişkili mali harcamaların, tanık numunenin beton kaplaması için yapılan harcamalarla karşılaştırıldığında yaklaşık %19,51 daha uygun maliyetli olduğu ve önemli bir ekonomik avantaj sağladığı gözlemlenmiş ve daha sonra rapor edilmiştir. Bu veriler hem yapısal bütünlük hem de maliyet verimliliği açısından farklı beton formülasyonlarının kullanılmasının karşılaştırmalı avantajlarını ortaya koymakta ve böylece inşaat mühendisliği uygulamalarında yenilikçi malzemelerin potansiyel faydalarını vurgulamaktadır. (Bakış vd., 2017a).

Yürütölen bir araştırma, modern altyapı gelişimi için önemli bir husus olan beton kaplama yapımı bağlamında, geleneksel C30/37 sınıfı kireçtaşı agregalı şahit numune yol betonu yerine geri dönüştürölmüş atık çelik lifler içeren ponza agregalı reaktif pudra beton (P-RPB) kullanımının pratikliğini ve etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu araştırma boyunca, şahit numune yol betonu, hidratasyon ve mukavemet gelişimi için en uygun koşulları sağlamak üzere, birbirini takip eden 28 gün boyunca 20 santigrat derece sabit sıcaklıkta tutulan titiz bir su kürü sürecinden geçmiştir. Buna karşılık, P-RPB formölasyonu iki farklı kürleme metodolojisine tabi tutulmuştur: birincisi 20 santigrat derecede 28 günlük aynı su kürü rejimi iken, ikincisi malzeme özelliklerini daha da geliştirmek için tasarlanmış kombine bir kürleme yaklaşımı gerektirmiştir. Su kürü aşamasının tamamlanmasının ardından yapılan testler sonucunda, şahit numune yol betonunun basınç dayanımı 41,8 MPa olarak ölçölürken, eğilme dayanımı 5,0 MPa olarak belirlenmiş ve uygulamalar için kayda değer bir performans göstermiştir. Deneysel

sonuçlar, 20 santigrat derecede 28 günlük aynı kür süresinin ardından, P-RPB'nin 71,2 MPa'lık yüksek bir basınç dayanımı ve 8,2 MPa'lık kayda değer bir eğilme dayanımı gösterdiğini ve böylece geleneksel betona kıyasla üstün mekanik özelliklerinin altını çizdiğini göstermiştir. Ayrıca, kombine kürleme tekniğinin uygulanmasından sonra, test sonuçları P-RPB için 105,2 MPa'lık olağanüstü bir basınç dayanımının yanı sıra 12,5 MPa'lık bir eğilme dayanımını ortaya çıkarmış ve bu da toplu olarak yapısal performans özelliklerinde kayda değer bir artış olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak çalışma, ponza agregalı reaktif pudra betonun, özellikle atık çelik liflerle takviye edildiğinde, sadece uygulanabilir olmakla kalmayıp aynı zamanda beton kaplama uygulamalarında kullanım için cazip bir alternatif sunduğu ve böylece sürdürülebilir inşaat uygulamalarına olumlu katkıda bulunacağı belirlenmiştir. Genel olarak, bu araştırmanın bulguları, altyapı sonuçlarının iyileştirilmesine yol açabilecek ve inşaat sektöründe çevresel sürdürülebilirliği teşvik edebilecek yenilikçi beton karışımlarının benimsenmesini savunmaktadır (Bakış, 2018).

Mardin taşını oluşturan iki ana kireçtaşı türü fosilli ve mikritik kireçtaşı olup her ikisi de Kretase-Eosen döneminde oluşmuştur (Dursun, 2024). Mardin taşının doğasında bulunan, basınç dayanımı ve genel dayanıklılık gibi önemli faktörleri kapsayan mühendislik özellikleri, agrega olarak kullanıldığında Reaktif Pudra Betonun (RPB) mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir ve böylece çeşitli yapısal uygulamalarda kompozit malzemenin genel performansına ve uzun ömürlülüğüne katkıda bulunur. Araştırmalar, Mardin taşının yapısal uygulamalarda kullanımı için çok önemli olan yeterli basınç dayanımı sergilediğini göstermiştir. (Sarışık & Sarışık, 2016).

Mardin kireçtaşı, uzun ömürlülüğünü ve hava koşullarına karşı direncini önemli ölçüde etkileyen gözeneklilik ve yoğunluk gibi çeşitli fiziksel özellikler sergiler (Agan & Cicek, 2020).

Mardin kireçtaşının mekanik özellikleri küresel ölçütlere uygundur ve bu da onu kurak ortamlardaki inşaatlarda kullanıma uygun hale getirir (Agan & Cicek, 2020).

Araştırmalar, özellikle Artuklu bölgesinden elde edilen taşın fizikomekanik özelliklerinin alternatif bölgelerden elde edilenlerden daha üstün olduğunu ve böylece mühendislik bağlamlarında uygulanabilirliğini artırdığını göstermektedir (Dursun, 2024).

Bu tezin ikinci bölümünde, tez konum kapsamında daha önce yapılan çalışmalarla ilgili literatür taramasına yer verilmiş olup materyal ve yönteme ayrılan sonraki bölümde ise, araştırmamda atık Mardin taşı tozu, Mardin taşı agregası, silis dumanı, çelik lif ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanarak lifli ve lifsiz reaktif pudra beton ile

karşılaştırma için lifli ve lifsiz referans beton üretimi için gerekli malzeme, yöntem ve birleşimleri hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmam kapsamında, beton yol kaplaması için 0,15 -1 milimetre arasında değişen parçacık boyutuna sahip “Mardin taşı” olarak bilinen agrega, özelliklerini potansiyel olarak iyileştirmek için beton karışımına belirlenmiş ölçülerde eklenmiş ve atık Mardin taşı tozu kullanılarak Reaktif Pudra Beton (MPB) üretilmiştir. Üretilen MPB lifli ve lifsiz olmak üzere 2 (iki) şekilde hazırlanmıştır. Numunelerin her birine 7 gün standart su kürü, 28 gün standart su kürü ve kombine kür olmak üzere 3 farklı kür uygulanmıştır. Kombine kür olarak 4 gün 20 °C standart su kürü + 2 gün 180 °C Etüv kürü uygulanmıştır. Sonuç olarak, karşılaştırmalı değerlendirme için bir ölçüt sağlamak amacıyla, iki farklı referans beton karışımı tasarlanmıştır: bir karışım lif takviyesi içermeyen C30/37 sınıfı normal dayanımlı betondan oluşacak ve diğeri lif takviyesi içerecek, böylece her iki karışım da normal dayanımlı beton sınıfı altında sınıflandırılacaktır. Bu yaklaşım, sadece bu beton sınıflarının değişen koşullar altındaki performans özelliklerini açığa çıkarmakla kalmayacak, aynı zamanda lif takviyesinin beton kaplamaların genel yapısal bütünlüğü ve dayanıklılığı üzerindeki etkileri konusunda bilgilerde verecektir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, beton kaplama numunelerinin önemli ölçüde yüksek basınç ve eğilme dayanımları sergilediğini ve böylece pratik uygulamalar için potansiyel uygulanabilirliklerini gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu araştırma sayesinde, tamamen yerel malzemelerden imal edilen ve atık olarak değerlendirilebilecek bir agrega türüyle yeni bir beton yol kaplaması türü başarıyla geliştirilmiş ve inşaatta yerel kaynaklardan yararlanma olasılığı vurgulanmıştır. Bu çalışma, yol yapım projelerinde geleneksel asfalt kaplamalara sürdürülebilir bir alternatif olarak beton kaplamaların kullanımını teşvik ederek, böylece altyapı dayanıklılığını ve performansını artırarak ulusal ekonomiye anlamlı bir katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Beton üretimi alanında, reaktif pudra betona (RPB) ilişkin karışım oranları araştırılmış ve kullanılan Mardin taşı için karışım oranlarında dikkate alınmıştır. RPB ile ilişkili su/bağlayıcı oranının 0,12 ila 0,15 gibi oldukça dar bir aralıkta yer alması dikkat çekicidir; bu değer literatürde belirtildiği gibi geleneksel beton karışımlarıyla karşılaştırıldığında son derece düşük kabul edilmektedir (Richard & Cheyrezy, 1994). Bu araştırma sırasında, temel bir kılavuz olarak belirlenen RPB karışım oranları dikkate alınarak yenilikçi beton türleri sentezlenmiştir. Bu çalışmada geliştirilen beton çeşitlerini geleneksel RPB'den ayıran temel fark, karışımlarda kullanılan su/bağlayıcı

oranının kasıtlı olarak değiştirilmesidir. RPB için standart su/bağlayıcı oranı 0,12 ila 0,15 olarak belirlenmişken, bu çalışmada işlenebilirliklerini ve kullanılabilirliklerini artırmak için tüm beton numunelerinde 0,44'lük bir su/bağlayıcı oranı kullanılmıştır. RPB'nin oldukça düşük su/bağlayıcı oranı özelliği göz önüne alındığında, sahada pratik üretim ve uygulama açısından önemli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla, bu araştırma 0,44'lük bir su/bağlayıcı oranı seçerek, özellikle elde edilen betonun işlenebilirliği açısından saha koşullarında daha basit ve pratik bir uygulamayı kolaylaştırmayı amaçlamıştır. Böyle bir karar, betonun optimum performans özellikleri ile inşaatta etkin kullanımı için gerekli pratik hususları dengelemeye yönelik bilinçli bir çabayı göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışmanın bulguları, beton üretiminde performans ve işlenebilirlik arasında arzu edilen bir uzlaşma sağlamak için karışım oranlarının ayarlanmasının önemini vurgulamaktadır. Genel olarak bu araştırma, reaktif pudra beton bağlamında çeşitli su/bağlayıcı oranlarının etkilerini anlamının önemini vurgulamakta ve böylece malzeme bilimi ve mühendisliği alanına da katkı sağlamaktadır. Su/bağlayıcı oranı artırıldığında betonun eğilme dayanımının yanı sıra basınç dayanımının da düştüğü yapılan araştırmalardan anlaşılmaktadır. Sıkıştırma testinin gerçekleştirilmesi amacıyla, küp kalıbın boyutları her bir tarafta 15 santimetre olacak şekilde belirlenmiş, böylece malzemenin sıkıştırma kuvvetleri altındaki performansını değerlendirmek için numuneler dökülmüştür. Buna karşılık, eğilme mukavemetinin değerlendirilmesi için, 4 santimetreye 4 santimetre ile 16 santimetre boyutlarında prizma kalıplar kullanılmış ve malzemenin eğilme gerilimlerine maruz kaldığında davranışını düzgün olarak verecek eğilme testi numuneleri dökülmüştür. Ayrıca donma-çözülme deneyi için 10 santimetre şeklinde küpler kalıplara dökülmüştür. Bu araştırmada incelenen beton türlerinin, henüz patent alma sürecinden geçmemiş yenilikçi bir çalışma olduğunu ve beton mühendisliği alanında gelişmekte olan malzemeler olarak kendisini gösterdiğini belirtmek gerekir. Gerçekleştirilen testlerden elde edilecek sonuçlara dayanarak, bu yeni beton karışımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek ve iyileştirmek amacıyla daha fazla araştırma çalışması yapılması ve böylece pratik uygulamalarda daha iyi performansın önünün açılması beklenmektedir. Bu araştırmanın önemi, daha güçlü ve daha dayanıklı beton arayışının önemli bir gereksinim olmaya devam ettiği inşaat mühendisliği alanında gelecekteki inşaat uygulamalarını ve malzeme seçimini etkileme amacı güdülmektedir. Sonuç olarak, bu tezin bulguları sadece akademik literatüre katkıda bulunmakla kalmayacak, aynı zamanda gelişen talepleri karşılamak için giderek daha fazla yenilikçi çözümler arayan inşaat sektörü için de pratik sonuçlar doğuracaktır.

3.1. Mardin Taşı Tozu Katkılı Lifsiz Pudra Beton (MPB) Malzemeleri

3.1.1. Çimento türü ve özellikleri

Bu kapsamlı çalışma sırasında, tüm beton numunelerinin bileşiminde kullanılan özel çimento tipi, TS EN 197-1:2012 yönetmeliğinde belirtilen standartlara uyan ve yüksek düzeyde kalite ve performans sağlayan CEM II/A-LL 42,5 R Portland kalkerli çimento çeşididir. Bu araştırmada kullanılan çimento, Öztaş İnşaat'tan temin edilmiştir. Çimento görünümü Şekil 3.1.'de verilmiştir. CEM II/A-LL 42,5 R Portland kalkerli çimentosuna özgü kimyasal özelliklerin ayrıntılı bir tablosu aşağıdaki Çizelge 3.1.'de detaylandırılmış olup, kullanılan çimentonun elementel bileşimi ve potansiyel uygulamaları hakkında bilgiler sunmaktadır. CEM II/A-LL 42,5 R çimentosunun çeşitli inşaat alanlarında uygunluğunu değerlendirmek için fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2.'de detaylandırılmış, böylece çimentonun performans özelliklerine bütüncül bir açıklama getirilmiştir. Bu çalışma, malzeme özelliklerinin ve bunların inşaat projelerinde beton formülasyonu ve uygulaması üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılmasını kolaylaştırmayı amaçlamaktadır. CEM II/A-LL 42,5 R kalkerli Portland çimentosunun kimyasal ile mekanik ve fiziksel içerik analizi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yaptırılmıştır.

Çizelge 3.1. CEM II/A-LL 42,5 R kalkerli portland çimentosunun kimyasal içeriği

Kimyasal İçerik (%)	
Na ₂ O	0,505
MgO	2,234
Al ₂ O ₃	3,409
SiO ₂	13,353
P ₂ O ₅	0,064
SO ₃	4,989
Cl	0,021
K ₂ O	0,967
CaO	70,297
TiO ₂	0,337
V ₂ O ₅	0,044
MnO	0,066
Fe ₂ O ₃	3,569
NiO	0,05
SrO	0,096

Çizelge 3.2. CEM II/A-LL 42,5 R kalkerli portland çimentosunun mekanik ve fiziksel içeriği

Mekanik ve Fiziksel İçerik	
Priz Başlangıcı (dk.)	62
Hacim Genleşmesi (mm)	9
Basınç Dayanımı (2 Günlük) (MPa)	22
Basınç Dayanımı (28 Günlük) (MPa)	42,5
Yol Kaplamasında Kullanılabilirliği	Kullanılabilir



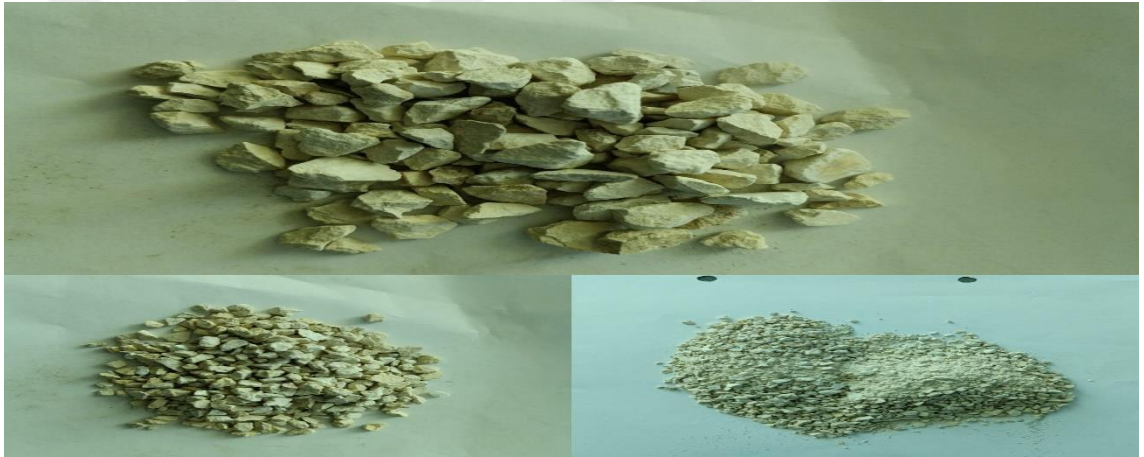
Şekil 3.1. Kullanılan çimentoya ait bir görüntü

3.1.1. Agrega türü ve özellikleri

Bu çalışma için kullanılan farklı boyutlardaki agrega ve toz numuneleri, Mardin ilinde bulunan Türkmen Deresi ve Mardin ilinin ilçesi olan Kızıltepe Gurs'ta bulunan şantiyelerden temin edilmiştir. Bu metnin altında, Türkmen Deresi sahasının ziyaret edilmesi sırasında çekilen bir fotoğraf Şekil 3.2.'de gösterilirken, Şekil 3.3.'de şantiyeden alınan Mardin taşının farklı kalibrasyonları gösterilmiş ve takip eden Çizelge 3.3.'te bu sahalardan toplanan malzemelere ilişkin kimyasal özelliklerin analizi sunulmaktadır. Mardin taşına ilişkin kimyasal analiz Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yaptırılmıştır.



Şekil 3.2. Mardin Türkmen deresi şantiyesi



Şekil 3.3. Mardin taşı ve farklı kalibrasyonları

Çizelge 3.3. Mardin taşı tozunun kimyasal içeriği

Kimyasal İçerik (%)	
Na ₂ O	0,151
MgO	19,129
Al ₂ O ₃	0,661
SiO ₂	3,16
P ₂ O ₅	0,04
SO ₃	0,099
Cl	0,045
K ₂ O	0,138
CaO	75,586
TiO ₂	0,107
Fe ₂ O ₃	0,779
NiO	0,031
CuO	0,016
SrO	0,06

3.1.1. Silis dumanı türü ve özellikleri

Tez çalışmasında kullanılan silis dumanının kimyasal içeriği Çizelge 3.4.'te detaylandırılmış olup silis dumanının bir görüntüsü Şekil 3.4.'te verilmiştir. Silis dumanının kimyasal içerik analizi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yaptırılmıştır.

Çizelge 3.4. Kullanılan silis dumanı kimyasal içeriği

Kimyasal İçerik (%)	
Na ₂ O	2,866
MgO	14,88
Al ₂ O ₃	0,53
SiO ₂	74,682
P ₂ O ₅	0,06
SO ₃	1,323
Cl	0,174
K ₂ O	2,216
CaO	0,628
MnO	0,065
Fe ₂ O ₃	0,454
Cr ₂ O ₃	1,468
F	0,291
ZnO	0,337
PbO	0,026



Şekil 3.4. Kullanılan silis dumanı görüntüsü

3.1.4. Kullanılan suyun türü ve özellikleri

Araştırma çalışmam kapsamında kullanılan beton numunelerinin tamamı ve bu numunelerin kürlenmesi amacıyla kullanılan su, doğrudan Siirt ili belediye su tedarik sisteminden temin edilmiştir.

3.1.5. Süper akışkanlaştırıcı türü ve özellikleri

Tez çalışmamda süper akışkanlaştırıcı olarak Polikarboksilat Bazlı Yüksek Oranda Su Azaltıcı, Hiper Akışkanlaştırıcı Beton Katkısı (POLYCAR–300) kullanıldı. Süper akışkanlaştırıcı, İksa İnşaat Katkıları San. ve Tic. Ltd. Şti.’den temin edildi. Tez çalışmasında kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri ve nitelikleri aşağıda yer alan ekteki Çizelge 3.5.’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Süperakışkanlaştırıcı özellikleri (İksa, 2024)

Süperakışkanlaştırıcı Özellikleri	
Tip	Polikarboksilat
Görünüm	Açık kahve renkli sıvı
Yoğunluk	1.07 ± 0.03 kg/L
pH	$5,00 \pm 2$
Alkali İçeriği	$\leq \%10$ (TS EN 480–12)

3.2. Mardin Taşı Tozu Katkılı Lifli Pudra Beton (MLPB) Malzemeleri

3.2.1. Çelik lifin türü ve özellikleri

Araştırma çalışmam bağlamında kullanılan çelik lifin özellikleri ve nitelikleri aşağıda yer alan ekteki Çizelge 3.6.’da gösterilmiştir. Tez çalışmamda kullanılan çelik lifler Kemerli Metal Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketinden temin edilmiş olup kullanılan çelik lifin fiziksel görünümü Şekil 3.5.’te çizelgenin alt tarafına eklenmiştir.

Çizelge 3.6. Çelik lifin özellikleri (Kemerix, 2024)

Çelik Lifin Özellikleri	
Standart	TS EN 14889-1
Görünüm	Metalik, Çelik Tel
Şekil	Çentikli
Tip	Soğuk Çekme
Uzunluk	35 mm
Çap	0,55 mm
Narinlik	64
Çekme Kuvveti	1450 N/mm ²
Kg Başına Tel Sayısı	14530 tel/kg



Şekil 3.5. Kullanılan çelik lifin görünümü

3.3. Beton Kontrol Numunesi (RFB) Malzemeleri

Kontrol numunesi betonunun üretiminde, TS EN 197-1:2011 standartlarında belirtilen özelliklere ve TSE EN ISO 9001:2015 kalite yönetim sistemine uyan ve inşaat uygulamaları için gerekli performans kriterlerini sağlayan CEM II/A-LL 42,5 R kalkerli portland tipi çimento kullanılmıştır(<https://www.askalecimento.com.tr/>, 2024). Buna ek olarak, bu beton formülasyonunda kullanılan agrega, Mardin Türkmen Deresi ve Kızıltepe Gurs şantiyelerinden tedarik edilmiştir. Ayrıca, betonun karışım suyu olarak Siirt ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.4. Lifsiz RPB Karışım Ölçüleri

3.4.1. İdeal lifsiz RPB karışım ölçüleri

Richard ve Cheyrezy (1995)'in çalışmalarında ifade ettikleri gibi, Mooney modeline ilişkin olarak RPB200 için spesifik karışım oranları belgelenmiş ve yayınlarının özeti aşağıdaki Çizelge 3.7.'de sunulmuştur. Bu spesifik formülasyonda, karışım içinde hesaplanan su/bağlayıcı oranının 0,12 gibi bir değerde belirlendiğini, aynı zamanda silis dumanı/çimento oranı 0,25 gibi bir değerde belirlenmiştir; bu da ortaya çıkan malzemenin genel özelliklerini etkileyecek bir çalışmaya işaret etmektedir. Bu oranlar sadece sayısal değerler olmayıp, malzemenin performans özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynayan temel parametreler olarak dikkate çekmekte, dolayısıyla malzeme bilimi ve mühendislik uygulamaları bağlamında dikkatli bir değerlendirme ve analiz gerektirmektedir.

Çizelge 3.7. İdeal lifsiz RPB 200 karışım ölçüleri (Richard vd., 1995)

Malzemeler	Ölçüleri
Portland çimentosu	1,00
Silis Dumanı	0,25
Kuvars (1,15mm-0,6 mm)	1,10
Süperakışkanlaştırıcı	0,016
Su	0,15
Toplam	2,516

1 (bir) birim içinde belirtilen çeşitli oranlar dikkate alınarak, karışımın agrega ağırlığı ile kullanılan çimento miktarı arasında var olan korelasyon, hesaplama sürecini kolaylaştırmak amacıyla matematiksel bir ifadeye dönüştürülmüş olup Eşitlik 3.1.'de gösterilmiş ve böylece yer alan hesaplamaların daha kolay bir şekilde yapılması amaçlanmıştır (Bakiş, 2015; Richard vd., 1995).

$$1 \text{ m}^3 \text{ RPB Karışım Ağırlığı (kg)} = 2,516 \times 1 \text{ m}^3 \text{ RPB Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.1)$$

1 metreküp Reaktif pudra beton karışımının ağırlığının 2400 kilogram olarak belirlenmesi durumunda, bu karışıma dâhil edilmesi gereken çimento miktarının yaklaşık 954 kilogram olacağı sonucuna varılabilir; bu sonuç, ilk formülden türetilen bir oranın

uygulanmasından, yani 2400'ün 2,516'ya bölünmesinden kaynaklanmaktadır. Gerekli çimento miktarının belirlenmesinin ardından, ki bu miktar 954 kilogram olarak hesaplanmıştır, bir sonraki adım bu karışımın formülasyonunda kullanılacak diğer bileşen malzemelerin miktarlarının tespit edilmesidir; bu miktarlar nihai ürünün istenen özelliklerinin elde edilmesi için gerekli olan önceden tanımlanmış karışım oranlarına uygun olarak belirlenir. Böylece, her bir bileşenin kesin miktarlarının belirlenmesine yönelik bir yaklaşımın, karışımın sadece belirlenen mühendislik standartlarını ve performans kriterlerini karşılamasını değil, aynı zamanda bunlara bağlı kalmasını sağlamak için de çok önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Lifsiz Reaktif pudra beton (RPB) formülasyonu için bir metreküp bağlamında açıkça tanımlanan belirli karışım oranları dikkate alındığında, silis dumanının kullanılan toplam çimento miktarının ağırlıkça %25'ine eşdeğer bir miktar oluşturacak şekilde hazırlandığını, kum içeriğinin ise aynı çimento miktarına göre ağırlıkça %110 gibi oldukça yüksek bir seviyede olduğunu ve ayrıca süperakışkanlaştırıcı ilavesinin %1,6 olacak şekilde belirlendiğini belirtmek gerekir. Buna ek olarak karıştırma suyunun formüle edilmiş kompozit malzemede kullanılan toplam çimento miktarının ağırlıkça %15'ini oluşturması gerekmektedir (Bakiş, 2015; Richard vd., 1995).

Bu sayısal değerler, lif içermeyen Reaktif pudra beton (RPB) formülasyonu için karışım oranının türetilmesi sürecinde kullanılmıştır. 1 m³ karışım için temel bileşen olarak 954 kilogram çimento kullanımına dayanan lifsiz RPB karışımı için hesaplanan ideal miktarlar, referans ve analiz için aşağıdaki Çizelge 3.8.'de sunulmuştur. İdeal lifsiz RPB özelliklerini somutlaştıran numuneler, optimum performans için 0,12'lik hesaplanmış su/bağlayıcı oranının yanı sıra genel malzeme özelliklerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynayan 0,25'lik silis dumanı/çimento oranı sergilemektedir. Bu araştırmada, çimento ile silis dumanı bağlayıcı olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.8. İdeal lifsiz RPB karışım ölçüleri (Bakiş, 2015; Richard vd., 1995)

Malzemeler	Ölçüleri (kg/m³)
Portland çimentosu	954
Silis Dumanı	238
Kuvars (1,15 mm-0,6 mm)	1050
Süperakışkanlaştırıcı	15
Su	143
Toplam	2400

3.4.2. Mardin taşı tozu katkılı lifsiz pudra beton (MPB)

Mardin taşı tozunun lifsiz pudra betonu olarak tasarlanmasına ilişkin karışım oranları aşağıdaki Çizelge 3.9.'da detaylandırılmıştır. Bu çalışma çerçevesinde, beton karışımının işlenebilirliğini önemli ölçüde artırmayı amaçlayan belirli bir su/bağlayıcı oranı 0,44 olarak seçilmiştir. Ayrıca, genel karışım bileşiminde silis dumanının/çimentoya oranı 0,25 olarak belirlenmiştir. Aşağıdaki Çizelge 3.9.'da özetlenen su/bağlayıcı oranını destekleyen hesaplamalarda hem kalkerli portland çimentosunun hem de silis dumanının beton matrisi içinde bağlayıcı olarak sınıflandırılan ayrılmaz bileşenler olarak kabul edildiğine dikkat etmek gerekmektedir. Sonuç olarak, beton karışımındaki toplam bağlayıcı miktarı, birlikte betonun genel bağlayıcı etkinliğine katkıda bulunan kalkerli Portland çimentosu ve silis dumanının kümülatif toplamı olarak tanımlanır. Bağlayıcı bileşenlerin bu şekilde değerlendirilmesi, nihai beton ürününün optimum performans özelliklerinin sağlanması için çok önemlidir. Nihayetinde, bu oranların dikkatli seçimi, incelenen betonda istenen mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin elde edilmesi için esastır.

Çizelge 3.9. Mardin taşı tozu katkılı lifsiz pudra beton (MPB) karışım ölçüleri

Malzemeler	Ölçüleri
Portland çimentosu	1,00
Silis Dumanı	0,25
Mardin Taşı Tozu	1,10
Süperakışkanlaştırıcı	0,016
Su	0,55
Toplam	2,916

Bir birimdeki belirli karışım oranları hesaplandığında, karışımın toplam ağırlığı ile kullanılan çimento miktarı arasında var olan korelasyon, hesaplama sürecini kolaylaştırmak için tasarlanmış matematiksel bir formüle dönüştürülmüş olup Eşitlik 3.2.'de gösterilmiştir.

$$1 \text{ m}^3 \text{ Beton Karışım Ağırlığı (kg)} = 2,916 \times 1 \text{ m}^3 \text{ Betondaki Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.2)$$

Eğer 1 metreküplük hacme sahip bir beton karışımının ağırlığı 2400 kilogram olarak ölçülürse, bu karışıma katılması gereken çimento miktarının yaklaşık 823 kilogram olacağı sonucuna varılabilir ki bu da Eşitlik 3.2.'de belirtildiği gibi 2400'ün 2,916'ya oranı

kullanılarak yapılan hesaplardan elde edilir. Gerekli çimento miktarı 823 kilogram olarak doğru bir şekilde belirlendikten sonraki adım, önceden belirlenmiş karışım oranlarına dayalı olarak beton karışımında kullanılacak diğer bileşen malzemelerin miktarlarının tespit edilmesidir. Bu bağlamda, su/bağlayıcı oranı 0,44 olarak belirlenen Mardin taş tozu katkılı lifsiz toz beton için yeni miktarlarda karışım formüle edilecek ve böylece karışımında bulunan su içeriği ile bağlayıcı maddeler arasında uygun bir denge sağlanacaktır. Benzer şekilde 0,44'lük bir su/bağlayıcı oranına bağlı kalan ve MPB olarak adlandırılan lifsiz Mardin taşı tozu katkılı pudra betonun üretim sürecinde, toplam çimento miktarının ağırlıkça yüzde 25'ine eşdeğer bir miktarda silis dumanı hazırlanması gerekirken, kullanılacak Mardin taşı tozu içeriği çimento ağırlığının ağırlıkça yüzde 110'u olarak belirlenecek ve süperakışkanlaştırıcı, tekil bir ölçü biriminde çimento ağırlığının ağırlıkça yüzde 55'ini oluşturacak olan karışım suyunun yanı sıra çimento ağırlığının ağırlıkça yüzde 1,6'sı olarak hesaplanacaktır. MPB betonu için belirlenen karışım miktarları aşağıdaki Çizelge 3.10.'da detaylandırılmıştır. Ayrıca, MPB betonu için su/bağlayıcı oranının 0,44, silis dumanının/çimentoya oranının ise tam olarak 0,25 olarak belirlendiğini ve böylece betonun optimum performans özelliklerinin sağlandığını belirtmek önemlidir.

Çizelge 3.10. Mardin taşı tozu katkılı lifsiz pudra beton (MPB) karışım miktarları

Malzemeler	Ölçüleri (kg)
Kalkerli Portland Çimentosu (CEM II/A-LL 42,5 R)	823
Silis Dumanı	206
Mardin Taşı Tozu	905
Süperakışkanlaştırıcı	13
Su	453
Toplam	2400

3.5. Lifli RPB Karışım Ölçüleri

3.5.1. İdeal lifli RPB karışım ölçüleri

Richard ve Cheyrezy (1995)'in çalışmalarında detaylandırıldığı üzere, RPB200 karışımının Mooney modeliyle ilgili oranları, bu modelin bileşimsel çerçevesini anlamak için önemli bir referans noktası olarak aşağıdaki Çizelge 3.11.'de gösterilmiştir. Bu özel

karışımda, karışımdaki suyun/bağlayıcıya oranının 0,13 gibi bir değerde belirlenmesi önemlidir; bu da ortaya çıkan malzemenin performans özelliklerini optimize etmek için tasarlanmış ve dikkatlice hesaplanmış bir göstergesidir; buna ek olarak, silis dumanının/çimentoya oranı 0,25 olarak belirlenmiştir, böylece karışımın genel etkinliğine ve dayanıklılığına katkıda bulunan kritik unsurlar belirlenerek optimum dayanım için önemlidir. Bu oranlar yalnızca sayısal değerler değildir; daha ziyade, çeşitli bileşenler arasındaki karmaşık ilişkileri kapsar ve böylece, özellikle pratik uygulamalarda kompozit malzemenin mekanik özelliklerini ve uzun vadeli davranışını değerlendirirken, malzeme bilimi ve mühendisliği bağlamında bu tür oranların önemini vurgular.

Çizelge 3.11. İdeal lifli RPB 200 karışım ölçüleri (Richard vd., 1995)

Malzemeler	Ölçüleri
Portland Çimentosu	1,00
Silis Dumanı	0,25
Kuvars (0,15 mm-0,6 mm)	1,10
Süperakışkanlaştırıcı	0,016
Çelik Tel (L=12 mm)	0,175
Su	0,17
Toplam	2,711

Bir birimdeki karışım oranları dikkate alındığında, karışımın toplam ağırlığı ile kullanılan çimento miktarı arasında bir ilişki kurulması zorunlu hale gelir; bu nedenle, sonraki hesaplamaların kolaylığını ve verimliliğini artırmak amacıyla, bu ilişki aşağıdaki Eşitlik 3.3. ile matematiksel formüle dönüştürülmüştür.

$$1 \text{ m}^3 \text{ RPB Karışım Ağırlığı (kg)} = 2,711 \times 1 \text{ m}^3 \text{ RPB Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.3)$$

Toplam ağırlığı 2400 kilogram olan 1 metreküplük hacimsel ölçüme sahip bir RPB karışımında, bu özel karışıma dâhil edilmesi gereken çimento miktarının kabaca 885 kilogram civarında hesaplanacağı sonucuna varılabilir; bu rakam Eşitlik 3.3.'de de belirtildiği gibi 2400'ün 2,711'e oranından türetilmiştir. Gerekli çimento miktarı olan 885 kilogram olarak belirlendikten sonra, karışıma dâhil edilmesi gereken ilave malzemelerin sonraki miktarları, önceki araştırmalarda belirlenen önceden tanımlanmış karışım oranlarına göre tespit edilecektir. Aşağıdaki Çizelge 3.12.'de özetlenen karışım oranları dikkate alındığında, özellikle tek bir birimle ilgili olarak, lifli RPB karışımı, silis dumanının toplam çimento ağırlığının yüzde 25'ine eşit bir oranda hazırlanmasını, kum

içeriğinin çimento ağırlığının yüzde 110'una eşit olmasını, ardından süper akışkanlaştırıcının çimento ağırlığının yüzde 1,6'sı oranında kullanılmasını gerektirmektedir. Çimento ağırlığının yüzde 17'si oranında karışım suyu ve son olarak çimento ağırlığının yüzde 17,5'i oranında çelik lifler olarak belirlenmiştir (Bakiş, 2015; Richard vd., 1995).

Çizelge 3.12. İdeal lifli RPB 200 karışım ölçüleri (Bakiş, 2015; Richard vd., 1995)

Malzemeler	Ölçüleri (kg/m³)
Portland çimentosu	885
Silis Dumanı	221
Kuvars (0,15 mm-0,6 mm)	975
Süperakışkanlaştırıcı	14
Çelik Tel (L=12 mm)	155
Su	150
Toplam	2400

3.5.2. Mardin taşı tozu katkılı lifli pudra beton (MLPB)

MLPB olarak adlandırdığımız Mardin taşı tozu lifli beton karışımı için belirlenen oranlar aşağıdaki Çizelge 3.13.'te detaylandırılmıştır. Bu bağlamda, su/bağlayıcı oranı, özellikle uygulama sırasında karışımın işlenebilirliğini ve genel performansını artırmayı amaçlayan bir seçim olarak 0,44 olarak seçilmiştir. Ayrıca, bu beton karışımındaki silis dumanının/bağlayıcıya oranının 0,25 olarak belirlendiğini ve bunun kompozit malzemenin nihai özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını belirtmek önemlidir. Su/bağlayıcı oranı hesaplanırken hem Portland çimentosu hem de silis dumanı denkleme dâhil edilir ve toplu olarak bağlayıcı olarak kabul edilir, böylece betonun genel özelliklerini etkiler. Bu karışımda kullanılan toplam bağlayıcı miktarı, beton formülasyonuna dâhil edilen silis dumanı ile Portland çimentosunun toplam miktarı olarak tanımlanmaktadır. Sonuç olarak, oranlar rijit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkilediğinden, bu bileşenler arasındaki etkileşimi anlamak, ortaya çıkan beton matrisinin performansını ve dayanıklılığını değerlendirmek için çok önemlidir.

Çizelge 3.13. Mardin taşı tozu katkılı lifli pudra beton (MLPB) karışım ölçüleri

Malzemeler	Ölçüleri
Kalkerli Portland Çimentosu (CEM II/A-LL 42,5 R)	1,00
Silis Dumanı	0,25
Mardin Taşı Tozu	1,10
Süperakışkanlaştırıcı	0,016
Çelik Lif (D=0,55 mm, L=35 mm)	0,175
Su	0,55
Toplam	3,091

Bir birim ölçümde sağlanan belirli karışım oranları dikkate alınarak, karışımın toplam ağırlığı ile kullanılan çimento miktarı arasında var olan korelasyon, doğru hesaplamaları kolaylaştırmak için aşağıdaki Eşitlik 3.4.'de ifade edilen matematiksel bir formüle dönüştürülmüştür:

$$1 \text{ m}^3 \text{ Beton Karışım Ağırlığı (kg)} = 3,091 \times 1 \text{ m}^3 \text{ Betondaki Çimento Miktarı (kg)} \quad (3.4)$$

Bir metreküp (1 m³) beton karışımının ağırlığının yaklaşık 2400 kilogram olduğu tespit edilirse, bu özel karışıma dâhil edilmesi gereken gerekli çimento miktarı kabaca 776 kilogram olarak hesaplanacaktır; bu da Eşitlik 3.4'te gösterildiği gibi 2400 ağırlık oranının 3,091'e bölünmesiyle elde edilen matematiksel ifadeden türetilir. Çimento miktarı, özellikle 776 kilogram, belirlendikten sonraki adım, bu beton karışımının formülasyonunda kullanılacak diğer bileşen malzemelerin gerekli oranlarının belirlenen karışım oranlarına uygun olarak belirlenmesini içerir. Bu araştırma çalışması kapsamında, MLPB olarak adlandırılan lifli Mardin taşı tozu içeren beton karışımı için miktarlar, tam olarak 0,44 olarak ayarlanmış bir su/bağlayıcı oranı kullanılarak geliştirilecektir. MLPB olarak bilinen ve 0,44 su/bağlayıcı oranıyla karakterize edilen lifli beton karışımını üretirken, çimentonun yüzde 110'u olarak ölçülen Mardin taşı tozunun içeriğinin yanı sıra çimento ağırlığına göre yüzde 25 ağırlık oranında silis dumanı bileşimi hazırlamak ve aynı zamanda çimentonun yüzde 1,6 ağırlık oranında bir süper akışkanlaştırıcı, çimentonun yüzde 17,5 ağırlık oranında çelik lifler ve son olarak çimentonun yüzde 55 ağırlık oranında ölçülen karışım suyunu dâhil etmek esastır. MLPB karışımı için belirlenen miktarlar aşağıdaki Çizelge 3.14.'te detaylandırılmıştır ve bu da optimum beton formülasyonu için gereken ölçümleri göstermektedir. MLPB beton karışımı için su/bağlayıcı oranı kesin olarak 0,44 olarak belirlenirken, silis dumanının

çimentoya oranı özellikle 0,25 olarak belirlenmiş ve böylece elde edilen beton karışımının bütünlüğü ve performans özellikleri sağlanmıştır.

Çizelge 3.14. Mardin taşı tozu katkılı lifli pudra beton (MLPB) karışım ölçüleri

Malzemeler	Ölçüleri (kg)
Kalkerli Portland Çimentosu (CEM II/A-LL 42,5 R)	776
Silis Dumanı	194
Mardin Taşı Tozu	854
Süperakışkanlaştırıcı	13
Çelik Lif (D=0,55 mm, L=35 mm)	136
Su	427
Toplam	2400

3.6. Lifsiz Referans Beton (RFB)

Referans olarak üretilen ve karşılaştırma için kullanılacak Lifsiz referans beton (RFB) karışım ölçüleri aşağıdaki Çizelge 3.15.'te sunulmuştur.

Çizelge 3.15. Lifsiz referans beton (RFB) karışım ölçüleri

Malzemeler	Ölçüleri (kg)
Kalkerli Portland Çimentosu (CEM II/A-LL 42,5 R)	423
Mardin Taşı Agregası (0-4 mm)	824
Mardin Taşı Agregası (4-8 mm)	394
Mardin Taşı Agregası (8-16 mm)	573
Su	186
Toplam	2400

3.7. Lifli Referans Beton (RFLB)

Referans olarak üretilen ve karşılaştırma için kullanılacak Lifli referans beton (RFLB) karışım ölçüleri aşağıdaki Çizelge 3.16.'da sunulmuştur.

Çizelge 3.16. Lifli referans beton (RFLB) karışım ölçüleri

Malzemeler	Ölçüleri (kg)
Kalkerli Portland Çimentosu (CEM II/A-LL 42,5 R)	423
Mardin Taşı Agregası (0-4 mm)	761
Mardin Taşı Agregası (4-8 mm)	364
Mardin Taşı Agregası (8-16 mm)	530
Çelik Lif (D=0,55 mm, L=35 mm)	136
Su	186
Toplam	2400

Geleneksel uygulamalara uygun olarak, beton kaplama için ağırlıklı olarak yapısal bütünlüğü ve dayanıklılığı ile tanınan kırılmış kireçtaşı agregası içeren C30/37 sınıfı normal dayanımlı beton kullanmaktadır. Sonuç olarak, bu araştırma kapsamında karşılaştırmalı analizi kolaylaştırmak için, özellikle C30/37 sınıfı normal dayanımlı beton olarak kategorize edilen iki farklı referans beton üretilecek, bunlardan biri lifli malzemelerden yoksun olacak (Çizelge 3.15'ye bakınız), diğeri ise lifli bileşenleri içerecektir (Çizelge 3.16'e gösterildiği gibi). Lifsiz beton numunelerinin ve lifli yapıda olanların üretim sürecinde, deneysel parametrelerin bütünlüğünü korumak için iri agregaların dâhil edilmesinin kasıtlı olarak ihmal edileceği dikkate değerdir. İri agregalar yerine, beton karışımları Mardin taşından elde edilen ince toz haline getirilmiş bir katkı maddesi olarak Mardin taşı tozu ilavesiyle zenginleştirilecek ve böylece inşaat uygulamalarında sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği teşvik edilecektir. Atık bir yan ürün olarak kabul edilen Mardin taşı tozunun inşaat sektöründeki kullanımı önemli ölçüde sınırlıdır; bu nedenle, bu çalışmanın amacı Mardin taşı tozu atıklarının uygulama alanını genişletmek ve böylece daha sürdürülebilir çevreye katkıda bulunmaktır. Bu düşünceler ışığında, bu araştırmanın bir parçası olarak üretilecek tüm beton numune çeşitleri, betonun optimum hidrasyonunu ve mukavemet gelişimini sağlamak için 7 ve 28 günlük süreler boyunca 20 santigrat derece sabit sıcaklıkta tutulan standart su kürüne ve kombine kür (4 gün 20 °C su+2 gün 180 °C etüv) sürecinden geçti. Kürlemeye yönelik bu yaklaşımın, incelenen farklı beton formülasyonlarının performans özelliklerine ilişkin önemli veriler sağlaması beklenmektedir. Bu araştırma, lifli ve lifsiz beton karışımlarının özelliklerini karşılaştırarak, Mardin taşı tozunun beton üretimine dâhil edilmesiyle ilgili potansiyel faydaları ve sınırlamaları belirlemeyi amaçlamıştır. Nihayetinde, bu kapsamlı çalışmadan elde edilen bulgular, inşaat malzemeleri alanındaki bilgi tabanını

geliştirmeye, yenilikçiliği teşvik etmeye ve sektörde daha sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesini teşvik etmeye hizmet edecektir. Kürleme işleminin ardından, bu kapsamlı çalışma için hazırlanan beton numuneler üzerinde, sıkıştırma, eğilme ve donma-çözülme dayanıklılık testlerini içeren bir dizi değerlendirme gerçekleştirilecektir. Bu testlerin tamamlanmasını takiben, numunelerin beton kaplamalardaki uygulamaları bağlamında genel kullanılabilirliğini ve performansını değerlendirmek için bir karşılaştırma yapılacak ve pratik uygulanabilirliklerinin değerlendirilmesi sağlanacaktır. Bu araştırma çerçevesinde üretilen beton kaplama numunelerinin, çalışma boyunca kullanılan malzeme ve metodolojileri yansıtacak şekilde son derece yüksek basınç dayanımı sergilemesi beklenmektedir. Betonun formülasyonunda, elde edilen betonun genel performans özelliklerini belirlemede reaktif pudra beton karışımının (RPB) oranlarına özellikle dikkat edilecektir. Reaktif pudra beton karışımlarda kullanılan su/bağlayıcı oranı 0,12 ile 0,15 arasında değişen oldukça düşük bir değerdir ve bu da malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek için tasarlanmış yüksek konsantrasyonlu bir karışımın göstergesidir. Bu araştırmaya dâhil edilen her tür beton numunesinde yeterli işlenebilirliği sağlamak amacıyla, beton malzemelerin gerekli şekilde işlenmesini ve uygulanmasını kolaylaştırmak için 0,44'lük standart bir su/bağlayıcı oranı uygulanacaktır. Basınç testlerinin gerçekleştirilmesi için kullanılan küp kalıpların boyutları 15*15*15 ve toplamda 36 adet numune, Eğilme testleri için 4*4*16 dikdörtgen prizma kalıplar ve toplamda 36 adet numune, Donma-Çözülme deneyi için 10*10*10 küp kalıpları ve toplamda 36 adet numune olmak üzere genel olarak toplamda 108 numune üretilmiştir.

3.8. Kür Uygulamaları

Tüm beton numune çeşitleri, aşağıda belirtilen üç farklı kürleme sürecinden oluşan kapsamlı bir sürece tabi tutulacaktır:

1. 7 gün boyunca 20 santigrat derece sıcaklıkta tutulan standart su kürü;
2. 20 santigrat derecede, ancak bu kez toplam 28 gün boyunca uzatılmış standart su kürü;
3. Yukarıda belirtilen her iki kürleme türünün unsurlarını içeren ve kombine kürleme olarak tanımlanan bir metodoloji.

Mevcut literatürde kombine kürleme yöntemlerine ilişkin evrensel olarak kabul edilmiş bir standart bulunmamaktadır. Araştırmacıların formüle ettikleri beton numuneler

üzerinde kombine kür tekniklerinin toplam dokuz farklı varyasyonunu uyguladıkları bildirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular hem basınç hem de eğilme dayanımı açısından en yüksek değerleri veren birleşik kür tekniğinin, 20 santigrat derecede standart bir su kürü kullanılarak yedi günlük bir ilk işlemle karakterize edildiğini, ardından 90 santigrat derecede tutulan bir sıcak su kürüne iki gün maruz kaldığını ve 180 santigrat dereceye ayarlanmış bir fırında iki günlük son bir işlemle sonuçlandığını göstermiştir (Bakış vd., 2017b). Bu bulgularla uyumlu olarak ve temel bir referans noktası olarak, bu tez kapsamında kombine kür yaklaşımı için belirlenen tüm beton numuneler, daha önce bahsedilen çalışmayı yansıtan iki sıralı bir işlem rejimine tabi tutulacaktır: 20 santigrat derecede 4 günlük standart su kürü ile başlayan, ardından 180 santigrat derecede iki günlük fırın kürü ile sonuçlanan.

Beton üretim sürecinin tamamında, numunelerin bütünlüğünün korunmasını sağlamak için kritik priz aşamasında hiçbir basınç uygulanmaması zorunludur. Numuneler kalıplarından dikkatlice çıkarıldıktan sonra, daha önce ana hatlarıyla belirtildiği gibi üç farklı kürleme sürecinden geçecektir. Kürleme aşamasının tamamlanmasının ardından, yapısal bütünlüklerini tespit etmek için tüm numuneler üzerinde kapsamlı basınç testleri yapılacaktır. Bu basınç testleri TS EN 12390-3: 2010 tarafından belirlenen standartlara uygun olarak gerçekleştirilecektir. Bu yaklaşım sayesinde, yol kaplaması uygulamalarına yönelik tüm beton türlerinin basınç dayanımı doğru bir şekilde hesaplanacak ve raporlanacaktır. Ayrıca, değerlendirme ölçütleri sadece basınç dayanımının ötesine geçecek; ek değerlendirmeler donma-çözülme direnci, eğilme dayanımı testlerinden elde edilen sonuçlara göre hesaplanacaktır. Yapılan bu çalışmadan elde edilecek sonuçların, beton yol yapım metodolojilerine ilişkin mevcut literatüre önemli ve yeni bir katkı sağlaması beklenmektedir. Nihayetinde, bu araştırma çabası, tamamen yerel kaynaklı malzemelerden inşa edilecek dört yenilikçi beton kaplama türünün üretimini kolaylaştırmayı ve böylece beton yol altyapısının geliştirilmesinin sürdürülebilirliğini ve verimliliğini potansiyel olarak artırmayı amaçlamaktadır.

3.9. Basınç (Mukavemet) Deneyi

Eksenel bir basınç yüküne maruz kaldığında betonun deformasyona dayanma ve yapısal bütünlüğünü koruma kapasitesi olarak tanımlanabilecek basınç dayanımı, inşaat mühendisliği alanında kritik olarak ölçülen temel bir özelliktir. TS EN 12390-3:2010

standardına uygun olarak, basınç testi aparatının yükleme hızı, saniyede 0,4 N/mm²'ye eşdeğer olan 0,4 MPa/s'lik hassas bir orana göre kalibre edilmiş ve bu testlerden elde edilen sonuçlarda tutarlılık ve güvenilirlik sağlanmıştır. Basınç testi prosedürü sırasında kullanılan aparatın resmi gösterimi, basınç dayanımının değerlendirilmesinde kullanılan kurulum ve yöntemi göstermeye yarayan şekil aşağıda Şekil 3.6.'da gösterilmektedir.

Basınç testinin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan aparat, TS EN 12390-3:2010 standardına uygun şekilde kırma yükünü görüntüleyerek malzeme biliminde önemli bir parametre olan basınç dayanımını hesaplayacak şekilde tasarlanmıştır ve bu hesaplama aşağıdaki Eşitlik 3.5.'de tanımlanan ilişkinin kullanılmasıyla kolaylaştırılmıştır, böylece elde edilen sonuçların daha sonraki analitik değerlendirmeler için hem doğru hem de güvenilir olması sağlanmıştır.

$$F_n = P/D_n \quad (3.5)$$

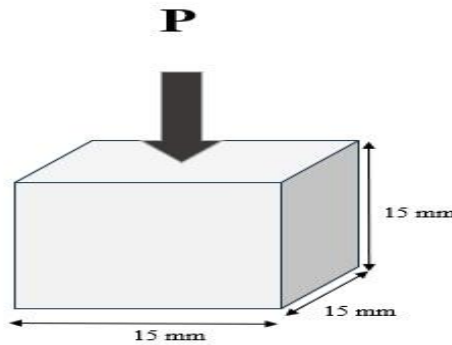
Denkleminde;

F_n : Basınç Dayanım Miktarı (Mpa ya da N/mm²)

P : Numunenin basınç altındaki maksimum yükü (N)

D_c : Yükün uygulandığı yüzey alan (mm²)

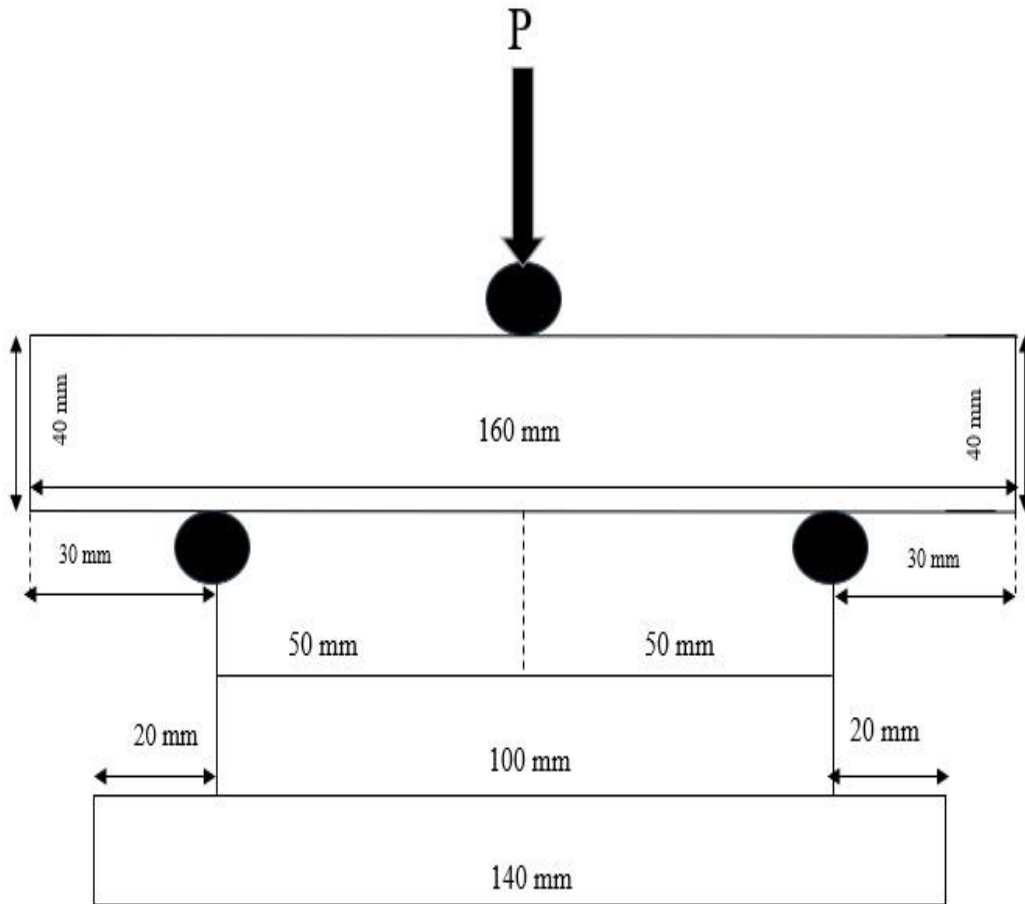
Basınç testlerinin gerçekleştirilmesi için kullanılan küp kalıpların boyutları 15*15*15 ve MPB için 9 adet, MLPB için 9 adet, RFB için 9 adet ve RFLB için 9 adet olmak üzere toplamda 36 adet numune kalıplara dökülmüştür. Tüm numunelere ilişkin deneyler Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Basınç deneyine ilişkin şekil

3.10. Eğilme Deneyi

TS EN 12390-5:2010 standardına uygun olarak, test hızı 0,50 N/s, Önyükleme 80,0 N olacak şekilde eğilme cihazı ayarlandı. Yürütülen deneysel testlerin tamamı boyunca, önceden belirlenmiş sabit değerler oluşturularak deneysel çalışmalar yapıldı. Malzeme performansını değerlendirmek için gerekli olan eğilme testleri, Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan eğilme testi deneyinin şekilsel gösterimi ile deney sırasında çekilmiş bir fotoğraf aşağıdaki Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.'de görülebilir. Değerlendirilen malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynadıkları için bu belirli yükleme oranlarına bağlı kalmanın önemi göz ardı edilemez.



Şekil 3.7. Eğilme deneyine ilişkin şekil



Şekil 3.8. Eğilme deneyinden bir görüntü

$$F_{eğ} = 3 \cdot P \cdot A / 2 \cdot a_1 \cdot a_2^2 \quad (3.6)$$

Denkleminde;

$F_{eğ}$: Eğilme noktası (MPa),

P : Maksimum yük (N),

A : İki mesnet arasındaki uzunluk (mm),

a_1 : Kürün yatay kesit uzunluğu (mm),

a_2 : Kürün düşey kesit uzunluğu (mm) olarak alınmıştır.

Deney numunelerinin eğilme dayanım noktaları, TS EN 12390-5:2010'da belirtilen kriterlere göre yukarıdaki Eşitlik 3.6. ile hesaplanmaktadır.

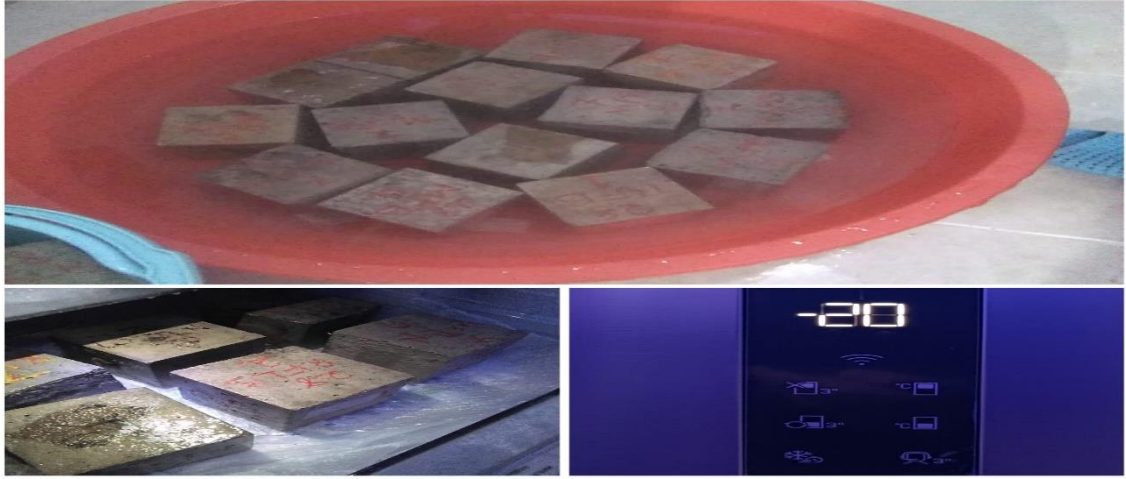
3.11. Donma-Çözülme Deneyi

Beton malzemelerin uzun vadeli dayanıklılığının ve yapısal bütünlüğünün azalmasına önemli ölçüde katkıda bulunan önemli ve kritik faktörlerden biri, çeşitli bozulma biçimlerine yol açabilen donma-çözülme döngülerinden kaynaklanan zararlı etkilere dir. Beton yapılar üzerinde donma ve ardından çözülme süreçlerinden kaynaklanan olumsuz etkiler, ağırlıklı olarak beton matrisinde bulunan küçük kılcal boşluklarda bulunan suyun donması ve donma aşamasında yaklaşık %8'lik bir artışa neden olan hacimsel genleşmenin doğrudan bir sonucu olarak oluşan hidrolik basınç ile tetiklenir. Donma-çözülme döngüleri ile betonun doğal özellikleri arasındaki bu etkileşim sadece

dayanıklılığını zayıflatmakla kalmaz, aynı zamanda ilgili mekanizmaların daha derinlemesine anlaşılmasını gerektirir ve böylece betonun bu tür çevresel zorluklara karşı direncini artırmak için etkili önlemler konusunda devam eden araştırmaları teşvik eder (Richardson, 2002).

Beton matrisi içinde bulunan kılcal boşlukların boyutlarındaki azalma, donma ve çözülme döngülerinden kaynaklanan zararlı etkilerin azalmasıyla doğrudan ilişkilidir ve böylece çevresel stres faktörleriyle ilişkili olarak boşluk boyutunun öneminin altını çizer. Bu kılcal boşlukların büyüklüğü, çimento hamurunun geçirgenlik özellikleri, betonun neme doygunluk derecesi, boşlukların beton yapı boyunca uzamsal dağılımı ve düzenlenmesi ve bu boşluklar içinde buz kristalleşmesinin meydana geldiği hız dâhil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere çok sayıda faktörden etkilenir. Sonuç olarak, bu çeşitli parametreler arasındaki etkileşimi anlamak, donma-çözülme koşulları altında betonun davranışını tahmin etmek ve bu tür termal salınımlara maruz kalan iklimlerde beton yapıların uzun ömürlülüğünü ve dayanıklılığını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Arık, 2022).

TS 699 Standardında belirtilen spesifikasyonlara uygun olarak optimum birim ağırlığı sağlamak için titizlikle doyurulan numuneler, daha sonra -20 santigrat derecelik sıfırın altındaki bir sıcaklıkta tutulan bir soğutma ortamına yerleştirildi. Kontrollü bir soğutma sürecini kolaylaştırmak için, buzdolabındaki sıcaklık, numunelerin ilk yerleştirilmesini takiben 4 saatlik bir zaman dilimi olacak şekilde -20 santigrat dereceye ayarlanmıştır; bu stratejik ayar, soğutma hızında kademeli bir düşüş sağlamak için uygulanmıştır. Bu özel düşük sıcaklıkta en az iki saatlik uygun bir sürenin ardından numuneler, artı veya eksi beş santigrat derecelik izin verilen bir değişimle 20 santigrat derece sıcaklıkta tutulan musluk suyuna daldırılmıştır. Suyun içinde iki saatlik bir sürenin ardından numuneler dikkatlice alındı ve daha sonra buzdolabına geri konuldu; tüm bu süreç deneyin tam bir döngüsü olarak belgelendi. Her döngünün sonunda, tüm numuneler çatlama, yapısal hasar ve malzemenin ufalanması dâhil bir inceleme ve değerlendirmeden geçirilmiştir. Bu süreç toplam yirmi beş döngü boyunca tekrarlanmış ve bu döngülerin sonunda, zorlu don testine tabi tutulan numunelerin basınç dayanımı ölçülmüş ve ardından don testinin başlamasından önce elde edilen ilk basınç dayanımı değerleriyle karşılaştırılmıştır. Malzeme performansını değerlendirmek için gerekli olan donma-çözülme numunelerine ait basınç testleri, Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup yapılan deneysel çalışmaya özgün bir görsel olan Şekil 3.9. aşağıda sunulmuştur.

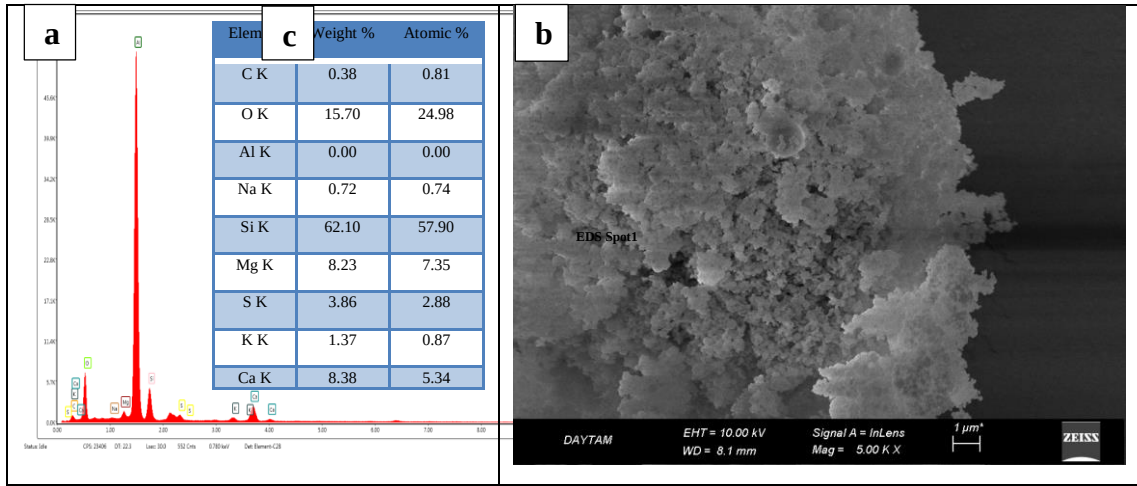


Şekil 3.9. Donma – çözülme deneyine ait bir fotoğraf

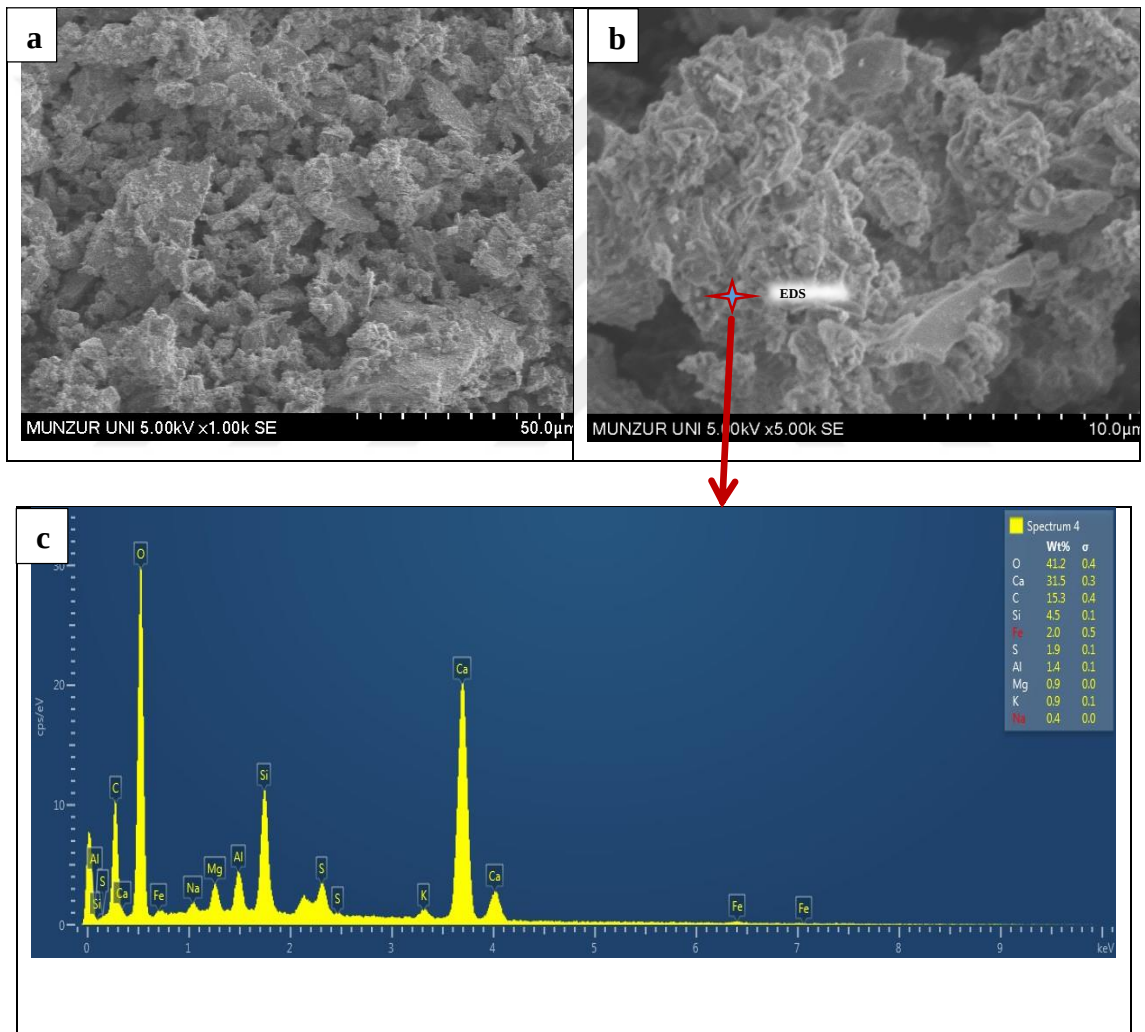
3.12. Taramalı Elektron Mikroskobu ve EDX Analizi

Genellikle SEM-EDX olarak kısaltılan Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi ile birleştirilmiş Taramalı Elektron Mikroskopisi olarak bilinen teknik, neredeyse tüm önemli element bileşenlerinin kimyasal bileşimine ilişkin nicel verilerin hızlı ve verimli bir şekilde toplanmasını kolaylaştıran, aynı zamanda tahribatsız bir yaklaşımla numunenin bütünlüğünün korunmasını sağlayan ve incelenen malzeme özellikleri hakkında ayrıntılı bilgiler sağlayan olağanüstü yüksek çözünürlüklere ulaşan oldukça sofistike ve zorlu bir analitik yöntemi temsil eder (Guyett vd., 2024).

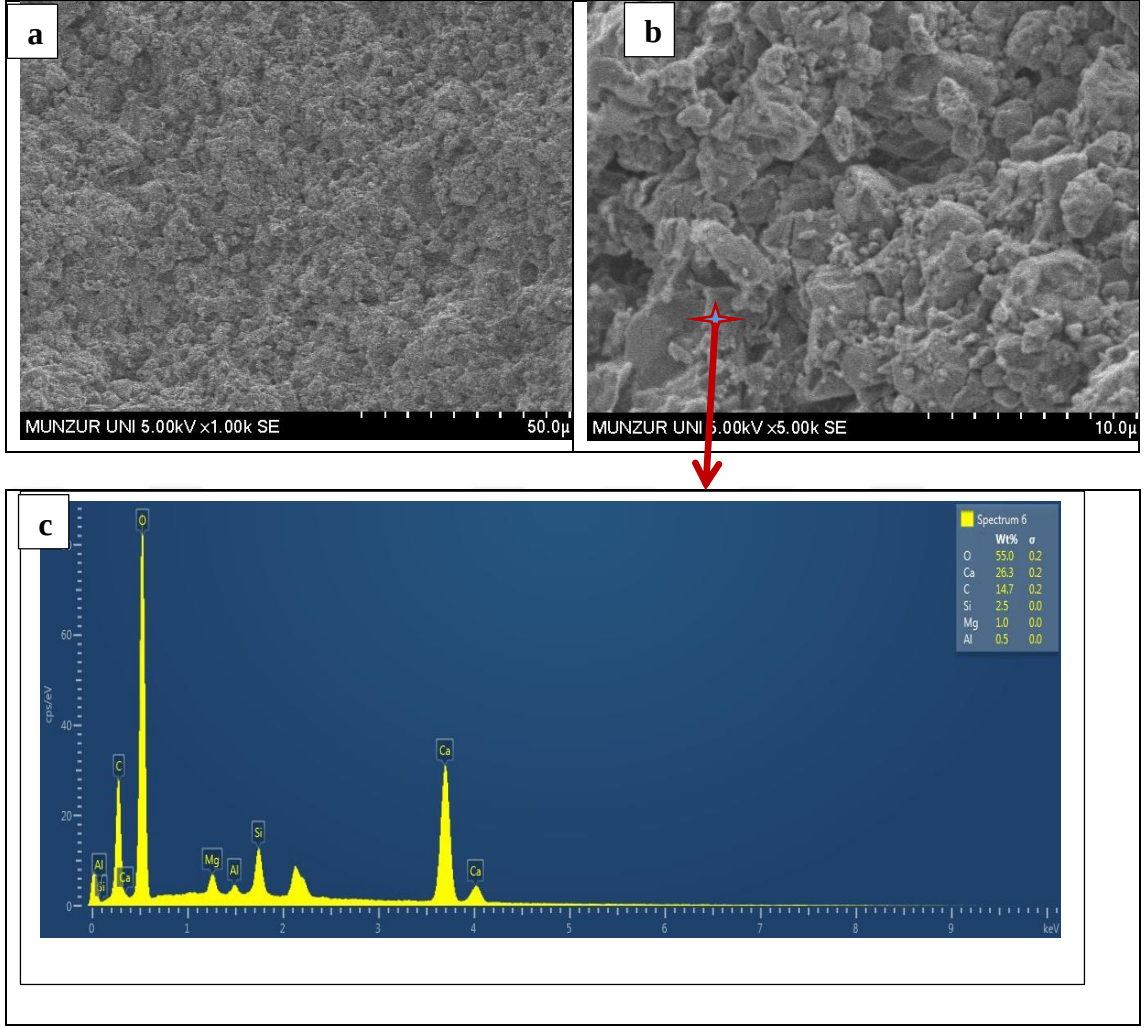
Araştırmada, içerdikleri karmaşık element bileşimini kesin olarak tespit etmek ve değerlendirmek amacıyla kullanılan malzemeler üzerinde bir Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) analizi uygulaması gerçekleştirilmiş ve bu uygulama tarafınca Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarına yaptırılmıştır.



Şekil 3.10. Silis dumanı partiküllerinin morfolojisi (a) 500 KX (b) büyütme (c) EDX



Şekil 3.11. Çimento (CEM II/A-LL 42.5 R) partiküllerinin (a) 100 k ve (b) 500 k büyütme (c) EDX



Şekil 3.12. Mardin taşı partiküllerinin (a) 100 k ve (b) 500 k büyütmelelerdeki morfolojisi (c) EDX

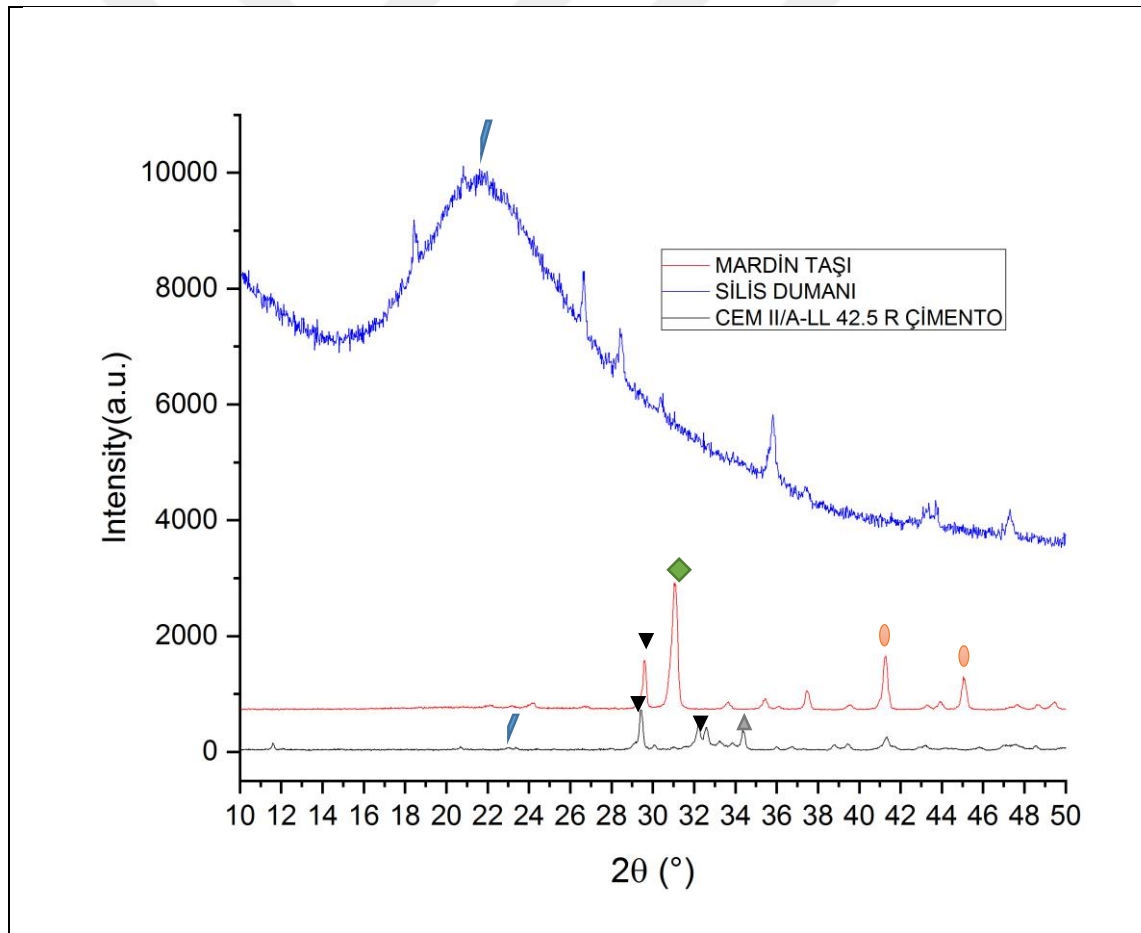
Çizelge 3.17.'de CEM II/A-LL 42.5 R kalkerli portland çimento, silis dumanı ve Mardin taşının kimyasal özelliklerini, oksitlerini ve oranlarını göstermektedir. Şekil 3.11. a ve Şekil 3.11. b'de CEM II/A-LL 42.5 R çimento tanelerinin morfolojisi gösterilmektedir. Enerji dağılımlı X-ışını incelemesi (EDX) sonuçlarına göre Si/O oranında silika (SiO_2) mevcuttur. Şekil 3.11. c'deki pikler de kalsiyum oranının düşük ve silisyum oranının yüksek olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.12. a ve Şekil 3.12. b'de Mardin taşı tozuna ait partiküllerin morfolojisi gösterilmiştir. Silika dumanının morfolojisini incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Silis dumanı partikülleri gözenekli bir yapıya sahiptir ve ince, düzensiz agregalar olarak görünür.

3.13. X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) Analizi

Genellikle XRD olarak kısaltılan X-ışını kırınımı, çeşitli bilimsel disiplinlerde çeşitli malzemelerin karakterizasyonunda çok önemli olan temel bir deneysel metodoloji aracı olarak hizmet eder. Bu karmaşık analitik teknik, maddelerin kristal mimarisini titizlikle inceler, böylece karmaşık atomik yapılandırma, spesifik kimyasal düzen ve incelenen malzemelerin genel bileşimi hakkında derin bilgiler verir; bunların tümü, bu malzemelerin farklı koşullar altında sergilediği doğal özelliklerin ve davranışların kapsamlı bir şekilde anlaşılması için kritik öneme sahiptir (Zhu & Wang, 2024).

Deney numunelerinde kullanılan malzemeler üzerinde X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) Analizi yapılmış olup bu analiz tarafımdan Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarına yaptırılmıştır.



Şekil 3.13. a) Silis Dumanı b) Mardin taşı c) CEM II/A-LL 42,5 R Çimento (▲ Portlandit, (◆) Kuvars, (▼) Kalsit, Silis (■), Augite(◆), Dolomit(●) XRD faz analizleri

Şekil 3.13.'de XRD grafiğinde görüldüğü üzere $2\theta \approx 31^\circ$ bulunan augite minerali Mardin taşının metamorfik kayalarda bulunmakla birlikte kireç taşı olduğunu gösterir.

Burada $2\theta \approx 29^\circ$ bulunan kalsit, $2\theta \approx 32^\circ$ ve $2\theta \approx 41^\circ$, $2\theta \approx 45^\circ$ dolomitte kireç taşlarında bulunur(Doğruyol, 2024). Şekil 3.10.a'da Silis dumanının XRD toz modellerini göstermektedir.

Analizler sonucu Mardin taşının kireç taşı esaslı bir dolomit çeşidi olduğu söylenebilir.

3.14. Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (UPV) Deneyi

Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) yöntemi, beton malzemelerin doğasında bulunan basınç dayanımının değerlendirilmesinde ve tahmin edilmesinde kritik bir rol oynar, böylece çeşitli mühendislik yapılarının bütünlüğünü ve güvenliğini tehlikeye atabilecek potansiyel yapısal zayıflıkların tanımlanmasını ve tanınmasını kolaylaştırır (Simatupang vd., 2016). Ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) deneyi, kullanılan beton malzemenin kalitesine ilişkin hızlı, anlık geri bildirim sağlar ve böylece inşaat faaliyetleri ile devam eden bakım operasyonları alanlarında gerekli olan hızlı ve verimli karar alma süreçlerini mümkün kılar ve teşvik eder (Ridho vd., 2023).

Deney numuneleri üzerinde ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) deneyi yapılmış olup bu analiz Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarında yapılmıştır.

3.15. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF Analizi)

X-ışını floresanı (XRF), fonksiyonel malzemelerin doğasında bulunan element bileşiminin titiz ve sistematik bir şekilde incelenmesinde vazgeçilmez bir rol oynar ve böylece, özellikle bu tür element değerlendirmelerinin analitik yeteneklerini ve hassasiyetini önemli ölçüde artıran TES tabanlı yüksek çözünürlüklü X-ışını spektrometresi gibi sofistike spektroskopik cihazlar kullanıldığında, çeşitli kimyasal elementlerin son derece doğru ve incelikli bir şekilde ayırt edilmesini kolaylaştırır (Wu vd., 2023).

Deney numunelerinde kullanılan malzemeler üzerinde X-Işını Spektrometresi (XRF) analizi yapılmış olup bu analizler, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yaptırılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 3.17'de, CEM II/A-LL 42,5 R kalkerli portland çimentosu, silis dumanı ve çalışma konusu olan Mardin taşı tozunun kimyasal içerikleri verilmiştir.

Çizelge 3.17. Çimento, silis dumanı ve Mardin taşı tozunun kimyasal içeriği

Bileşen	Çimento %	Silis Dumanı %	Mardin Taşı Tozu %
Na ₂ O	0,51	2,87	0,15
MgO	2,23	14,88	19,13
Al ₂ O ₃	3,41	0,53	0,66
SiO ₂	13,35	74,68	3,16
P ₂ O ₅	0,06	0,06	0,04
SO ₃	4,99	1,32	0,10
Cl	0,02	0,17	0,05
K ₂ O	0,97	2,22	0,14
CaO	70,30	0,63	75,59
TiO ₂	0,34		0,11
V ₂ O ₅	0,04		
MnO	0,07	0,07	
Fe ₂ O ₃	3,57	0,45	0,78
NiO	0,05		0,03
SrO	0,10		0,06
Cr ₂ O ₃		1,47	
F		0,29	
ZnO		0,34	
PbO		0,03	
CuO			0,02

3.16. Kullanılan Malzeme Çeşidi ve Miktarı

Tez çalışmamda kullanılan toplam malzeme miktarı aşağıdaki Çizelge 3.18. ve Çizelge 3.19.'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.18. Malzeme çeşidine göre kullanılan malzeme miktarı

Malzemeler	Miktar (kg)	Numune Sayısı (Adet)	Toplam Miktar (kg)
Kalkerli Portland Çimentosu (CEM II/A-LL 42,5 R)	11,323	9	101,905
Silis Dumanı	1,852	9	16,672
Mardin Taşı Agregası (0,15-1 mm)	8,146	9	73,313
Mardin Taşı Agregası (0-4 mm)	7,340	9	66,061
Mardin Taşı Agregası (4-8 mm)	3,510	9	31,593
Mardin Taşı Agregası (8-16 mm)	5,108	9	45,972
Süperakışkanlaştırıcı	0,120	9	1,084
Su	5,798	9	52,182
Çelik Lif (D=0,55 mm, L=35 mm)	1,260	9	11,337
Toplam	44,458	81	400,118

Çizelge 3.19. Deney bazlı kullanılan malzeme miktarı

Deney Adı	Deney Numunesi	Numune Miktarı (kg)	Numune Sayısı (Adet)	Toplam Miktar (kg)	Deney Bazlı Toplam (kg)
Basınç Deneyi	MPB	8,100	9	72,900	291,600
	MLPB	8,100	9	72,900	
	RFB	8,100	9	72,900	
	RLPB	8,100	9	72,900	
Eğilme Deneyi	MPB	0,614	9	5,530	22,118
	MLPB	0,614	9	5,530	
	RFB	0,614	9	5,530	
	RLPB	0,614	9	5,530	
Donma-Çözülme Deneyi	MPB	2,400	9	21,600	86,400
	MLPB	2,400	9	21,600	
	RFB	2,400	9	21,600	
	RLPB	2,400	9	21,600	
Toplam		44,458	108	400,118	400,118

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Basınç ve Eğilme Deney Sonuçları

4.1.1. Lifsiz ve lifli üretilen beton numunelerin basınç ve eğilme testleri

Sıkıştırma ve Eğilme Testleri, çeşitli maddelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için malzeme bilimi ve mühendisliği alanında rutin olarak kullanılan temel deneysel prosedürlerdir, böylece araştırmacıların ve mühendislerin malzemelerin farklı yük türleri altında nasıl davrandığını kapsamlı bir şekilde anlamalarını sağlar. Bundan hareketle tez çalışmamda referans betonlarla birlikte 4 çeşit beton üretimi yapılmıştır. Üretilen betonlar basınç deneyi için 15*15*15 boyutunda kalıplara dökülerek şişleme yapılarak ve sarsma makinası ile kalıpların daha düzenli boşluksuz çıkması sağlanmıştır. Üretilen her beton kalıp 25 defa sarsmaya tabii tutulmuştur. Sarsmaya tabii tutulan kalıplar 24 saat bekletilerek kalıplardan çıkarılmıştır. Eğilme testleri içinse 4*4*16 boyutunda kalıplar oluşturulmuş olup bunlarda şişleme yapılarak ve sarsma makinası ile her bir numune 25 defa sarsılarak kalıplar dökülmüş ve 24 saat bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Çalışmamda Eğilme ve sıkıştırma testleri için Mardin taşı tozlu Lifsiz (MPB) 18 adet, Lifli (MLPB) 18 adet, Referans beton olarak lifsiz (RFB) 18 adet ve Lifli (RFLB) olmak üzere 18 adet numune kalıplara dökülmüştür. Bu kalıplara farklı kürler (Kombine kür, 7 günlük 20°C su kürü, 28 günlük 20°C su kürü) uygulanmıştır. Kombine kür, 4 gün 20°C su havuzuna + 2 gün 180°C etüve tabii tutulmuştur. Yapılan kür işlemlerinden sonra sıkıştırma ve Eğilme testi için üretilen beton numuneleri teste tabii tutulmuş ve sonuçları tablo halinde bir araya getirilmiştir.

4.1.1.1. Referans Olarak Üretilen Beton Numunelerin Basınç ve Eğilme Testleri

Referans olarak üretilen beton numuneleri kombine kür, 7 günlük 20°C su kürü, 28 günlük 20°C su kürlerine tabii tutularak sıkıştırma ile Eğilme testlerine geçilmiş ve sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Referans olarak oluşturulan betonun basınç ve eğilme sonuçları

Kür Çeşidi/Dayanımı	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	
	RFB (Lifsiz)	RFLB (Lifli)	RFB (Lifsiz)	RFLB (Lifli)
7 günlük (20 °C su kürü)	27,30	35,01	3,40	5,07
28 günlük (20 °C su kürü)	28,86	43,07	5,01	7,15
Kombine kür (4 gün 20 °C su havuzu + 2 gün 180 °C etüv)	38,10	51,41	5,47	8,15

4.1.1.2. Mardin Taşı Tozlu Beton Numunelerin Basınç ve Eğilme Testleri

Mardin taşı tozu kullanılarak üretilen beton numuneleri kombine kür, 7 günlük 20 °C su kürü, 28 günlük 20 °C su kürlerine tabii tutularak Basınç ile Eğilme testlerine geçilmiş ve sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Mardin taşı tozu kullanılarak oluşturulan betonun basınç ve eğilme sonuçları

Kür Çeşidi/Dayanımı	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	
	MPB (Lifsiz)	MLPB (Lifli)	MPB (Lifsiz)	MLPB (Lifli)
7 günlük (20°C su kürü)	63,68	64,07	3,90	5,80
28 günlük (20°C su kürü)	66,65	67,05	5,70	9,20
Kombine kür (4 gün 20 °C su havuzu + 2 gün 180 °C etüv)	70,34	75,70	6,13	11,78

4.2. Donma-Çözülme Deney Sonuçları

4.2.1. Lifsiz ve lifli üretilen beton numunelerin donma-çözülme testleri

Tüm beton tip numunelerin donma-çözülme deneyleri yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Donma-çözülme deneyi sonuçları

Beton Tipi	Kür Tipi	Deney Öncesi Ağırlık (g)	Deney Sonrası Ağırlık (g)	Yüzey Alanı, A (mm ²)	Kütle Kaybı, M (kg)	Birim Alan Başına Kütle Kaybı, I	Deney Sonrası Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
RFB	7 Gün Standart Su Kürü	2017,4	1888,0	10000	0,1294	12,94	21,37
	28 Gün Standart Su Kürü	2036,4	1920,0	10000	0,1164	11,64	31,51
	Kombine Kür	2111,4	2064,4	10000	0,0470	4,70	33,00
RFLB	7 Gün Standart Su Kürü	2079,8	2053,6	10000	0,0262	2,62	21,38
	28 Gün Standart Su Kürü	2076,8	2067,0	10000	0,0098	0,98	31,59
	Kombine Kür	2145,4	2140,6	10000	0,0048	0,48	38,06
MPB	7 Gün Standart Su Kürü	1968,0	1958,4	10000	0,0096	0,96	31,87
	28 Gün Standart Su Kürü	2048,2	2039,3	10000	0,0089	0,89	52,26
	Kombine Kür	1911,8	1908,4	10000	0,0034	0,34	60,43
MLPB	7 Gün Standart Su Kürü	1973,8	1969,2	10000	0,0046	0,46	54,36
	28 Gün Standart Su Kürü	2080,4	2076,6	10000	0,0038	0,38	61,81
	Kombine Kür	2128,4	2126,8	10000	0,0016	0,16	62,42

4.3. Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (UPV) Deney Analizi

4.3.1. Lifsiz ve lifli betonların ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV)

4.3.1.1. Referans beton numunelerin ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) deney sonuçları

Referans olarak üretilen beton numuneleri kombine kür, 7 günlük 20 °C su kürü, 28 günlük 20 °C su kürlerine tabii tutularak ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) testlerine geçilmiş ve sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Referans olarak oluşturulan betonun ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) sonucu

Kür Çeşidi/Dayanımı	Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (km/s)	
	RFB (Lifsiz)	RFLB (Lifli)
7 günlük (20 °C su kürü)	3472	3502
28 günlük (20 °C su kürü)	3734	4032
Kombine kür (4 gün 20 °C su havuzu + 2 gün 180 °C etüv)	3911	4079

4.3.1.2. Mardin taşı tozu kullanılarak üretilen beton numunelerin ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) deney sonuçları

Mardin taşı tozu kullanılarak üretilen beton numuneleri kombine kür, 7 günlük 20 °C su kürü, 28 günlük 20 °C su kürlerine tabii tutularak ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) testlerine geçilmiş ve sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.5.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Mardin taşı tozu kullanılarak oluşturulan betonun ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (UPV) sonuçları

Kür Çeşidi/Dayanımı	Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı (km/s)	
	MPB (Lifsiz)	MLPB (Lifli)
7 günlük (20 °C su kürü)	3695	3717
28 günlük (20 °C su kürü)	4003	4016
Kombine kür (4 gün 20 °C su havuzu + 2 gün 180 °C etüv)	4047	4064

UPV değerleri iki malzemenin boşluk yapısı ve dayanımını karşılaştırmada fikir verebilmektedir. UPV değeri ne kadar yüksekse malzemenin boşluk oranı o derece düşüktür. UPV değeri ne kadar yüksekse malzemenin basınç dayanımı o derece yüksektir. UPV ile boşluk oranı arasında ters ilişki, UPV ile basınç dayanımı arasında ise doğrusal ilişki bulunmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bilimsel araştırmada, Mardin taşından elde edilen atık malzemelerin beton kaplama yapımında kullanılabilirliği ve uygulanabilirliği incelenmiş, böylece inşaat mühendisliği alanında geri dönüşüm ve sürdürülebilirliğe yönelik yenilikçi yaklaşımlar keşfedilmiştir. Bu çalışmada, Mardin taşı atıkları bir beton agregası olarak kullanılmış ve özellikle üstyapı yapımı için tasarlanmış beton karışımlarının formülasyonunda ve geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Bu araştırma çalışması boyunca, özelliklerinin test edilmesini kolaylaştırmak amacıyla dört farklı beton karışımı üretilmiştir: RFB olarak adlandırılan Mardin taşı lifsiz referans beton, RFLB olarak adlandırılan Mardin taşı lifli referans beton, MPB olarak etiketlenen Mardin taşı lifsiz toz beton ve son olarak MLPB olarak kısaltılan Mardin taşı lifli toz beton. Beton numuneler kalıplarından çıkarıldıktan sonra, 7 gün boyunca 20 santigrat derece sabit sıcaklıkta su kürü, ardından aynı sıcaklıkta 28 günlük 20 santigrat derece su kürü ve ilk 4 günlük standart su kürünü takiben 180 santigrat derece yüksek sıcaklıkta 2 günlük fırın kürünü içeren kombine bir kür işlemine tabi tutulmuştur. Kürleme işlemlerinin tamamlanmasının ardından beton numuneler, özellikle basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme döngülerine karşı dayanıklılık testine tabi tutulmuştur. Şartnameye göre, bu çalışmada üretilen betonun 28 megapaskal (MPa) minimum basınç dayanımı ve buna karşılık gelen 4,5 megapaskal (MPa) minimum eğilme dayanımı ölçütü ile belirli performans kriterlerini karşılaması gerekiyordu (Tunç, 2007). Ayrıca, şartnamede donma-çözülme döngülerinden kaynaklanan kütle kaybı için öngörülen üst sınır 1,0 kg/m² olarak belirlenmiştir (TS 2824 EN 1338, 2005). Bu şartname limitlerine göre sonuçlar değerlendirildiğinde;

Çizelge 5.1. RFB, 7 gün 20 °C standart su kürü sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m ²)
RFB	7 gün 20 °C standart su kürü	27,30	3,40	12,94

Çizelge 5.1'deki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 27,30 MPa<28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 3,40 MPa<4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 12,94 kg/m²>1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunduğu ve standart değerleri karşılamadığından yol kaplaması olarak kullanılamaz.

Çizelge 5.2. RFB, 28 gün 20 °C standart su kürü sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m ²)
RFB	28 gün 20 °C standart su kürü	28,86	5,01	11,64

Çizelge 5.2'deki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 28,86 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 5,01 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 11,64 kg/m²>1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı ve eğilme dayanımı şartname değerini sağlamakta, ancak donma-çözülme sonucu standarttaki değerin üstünde kaldığından yol kaplaması olarak kullanılamaz.

Çizelge 5.3. RFB, kombine kür sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m ²)
RFB	Kombine Kür	38,10	5,47	4,70

Çizelge 5.3'teki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 38,10 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 5,47 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 4,70 kg/m²>1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı ve eğilme dayanımı şartname değerini sağlamakta, ancak donma-çözülme sonucu standarttaki değerin üstünde kaldığından yol kaplaması olarak kullanılması uygun değildir.

Çizelge 5.4. RFLB, 7 gün 20 °C standart su kürü sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m ²)
RFLB	7 gün 20 °C standart su kürü	35,01	5,07	2,62

Çizelge 5.4'teki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 35,01 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 5,07 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 2,62 kg/m²>1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı ve eğilme dayanımı şartname değerini sağlamakta, ancak donma-çözülme sonucu standarttaki değerin üstünde kaldığından yol kaplaması olarak kullanılması uygun değildir.

Çizelge 5.5. RFLB, 28 gün 20 °C standart su kürü sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m²)
RFLB	28 gün 20 °C standart su kürü	43,07	7,15	0,98

Çizelge 5.5'teki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 43,07 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 7,15 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 0,98 kg/m²<1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme sonucu şartname değerini sağladığından yol kaplaması olarak kullanılması uygundur.

Çizelge 5.6. RFLB, kombine kür sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m²)
RFLB	Kombine kür	51,41	8,15	0,48

Çizelge 5.6'daki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 51,41 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 8,15 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 0,48 kg/m²<1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme sonucu şartname değerini sağladığından yol kaplaması olarak kullanılması uygundur.

Çizelge 5.7. MPB, 7 gün 20 °C standart su kürü sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m²)
MPB	7 gün 20 °C standart su kürü	63,68	3,90	0,96

Çizelge 5.7'deki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 63,68 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 3,90 MPa<4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 0,96 kg/m²<1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı ve donma-çözülme sonucu şartname değerini sağlamakta, ancak eğilme dayanımı standarttaki değerin altında kaldığından yol kaplaması olarak kullanılması uygun değildir.

Çizelge 5.8. MPB, 28 gün 20 °C standart su kürü sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m²)
MPB	28 gün 20 °C standart su kürü	66,65	5,70	0,89

Çizelge 5.8'deki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 66,65 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 5,70 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 0,89 kg/m²<1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme sonucu şartname değerini sağladığından yol kaplaması olarak kullanılabilir.

Çizelge 5.9. MPB, kombine kür sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m ²)
MPB	Kombine kür	70,34	6,13	0,34

Çizelge 5.9'daki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 70,34 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 6,13 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 0,34 kg/m²<1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme sonucu şartname değerini sağladığından yol kaplaması olarak kullanılması uygundur.

Çizelge 5.10. MLPB, 7 gün 20 °C standart su kürü sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m ²)
MLPB	7 gün 20 °C standart su kürü	64,07	5,80	0,46

Çizelge 5.10'daki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 64,07 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 5,80 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 0,46 kg/m²<1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme sonucu şartname değerini sağladığından yol kaplaması olarak kullanılması uygundur.

Çizelge 5.11. MLPB, 28 gün 20 °C standart su kürü sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m²)
MLPB	28 gün 20 °C standart su kürü	67,05	9,20	0,38

Çizelge 5.11’deki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 67,05 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 9,20 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 0,38 kg/m²<1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme sonucu şartname değerini sağladığından yol kaplaması olarak kullanılması uygundur.

Çizelge 5.12. MLPB, kombine kür sonuçları

Beton Çeşidi	Kür Çeşidi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m²)
MLPB	Kombine kür	75,70	11,78	0,16

Çizelge 5.12’deki sonuçlar yorumlandığında,

- ✓ Ortalama basınç dayanımı 75,70 MPa>28 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama eğilme dayanımı 11,78 MPa>4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
- ✓ Ortalama donma çözülme kütle kaybı 0,16 kg/m²<1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme sonucu şartname değerini sağladığından yol kaplaması olarak kullanılması uygundur.

Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) ölçümü, iki farklı malzemenin boşluk yapısının ve doğal mukavemet özelliklerinin karşılaştırmalı analizini kolaylaştırabilecek önemli bir göstergedir. Bu bağlamda, kaydedilen daha yüksek bir UPV değerinin, malzeme içindeki daha düşük bir boşluk oranıyla ilişkili olduğunu ve daha kompakt bir iç yapıya işaret etmektedir. Ayrıca, UPV değerindeki bir artışın, söz konusu malzemenin basınç dayanımındaki belirgin bir artışla doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamaktadır. Bu ilişki, UPV değerleri ile boşluk oranı arasında ters bir korelasyonun varlığını açıklarken, aynı zamanda UPV ile malzemenin sergilediği basınç dayanımı arasında doğrudan doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen veriler, ifade edilen bu sonuçları doğrulamaktadır.



KAYNAKLAR

- Abellan-Garcia, J., Molinares, M., Daza, N., Abbas, Y. M., & Khan, M. I. (2023a). Formulation of inexpensive and green reactive powder concrete by using milled-waste-glass and micro calcium-carbonate–A multi-criteria optimization approach. *Construction and Building Materials*, 409, 134167.
- Abellan-Garcia, J., Molinares, M., Daza, N., Abbas, Y. M., & Khan, M. I. (2023b). Formulation of inexpensive and green reactive powder concrete by using milled-waste-glass and micro calcium-carbonate–A multi-criteria optimization approach. *Construction and Building Materials*, 409, 134167.
- Agan, C., & Cicek, F. (2020). Some rock mass, chemical, physical, thermal, and mechanical properties of Mardin limestone, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-10.
- Ağar, E., Sütaş, İ., & Öztaş, G. (1996). Asfalt Kaplama ile Beton Yol Karşılaştırılması. *THBB Hazır Beton Dergisi-Beton Yollar Özel Eki*.
- Ağar, E., Sütaş, İ., & Öztaş, G. (1998). Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları). *İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, Turkey*.
- Akhnoukh, A., & Skinner, P. (2022). The Future of Ultra-High-Performance Concrete in Infrastructure Projects in the United States. *Asia-Pacific Regional Congress and Exhibition*, 73-77.
- Al-Fadhli, S. K. I. (2024). Analytical Equation for Stress-Strain Relationship in compression for Reactive Powder Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1374(1), 012073.
- Alsadey, S., & Omran, A. (2022). Effect of superplasticizers to enhance the properties of concrete. *Design, Construction, Maintenance*, 2, 84-91.
- Arik, A. (2022). *Beton yol kaplamalarında ultra yüksek performanslı lifli beton (UYPLB) kullanılması üzerine bir araştırma*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Assidik, M. F., & Sekaryadi, Y. (2022). PERENCANAAN TEBAL LAPISAN PERKERASAN KAKU (RIGID PAVEMENT) DAN LENTUR (FLEXIBLE PAVEMENT) PADA JALAN KUBANG â€“PANYUSUHAN KABUPATEN CIANJUR. *JURNAL MOMEN TEKNIK SIPIL SURYAKANCANA*, 5(1), 9-16.
- Bakırhan, M., & Bozkurt, N. (2019). *POMZA VE PERLİT KULLANILARAK ÜRETİLEN KOMPOZİT HAFİF BETON TASARIMI VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ*. BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ ve DİCLE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ.
- Bakış, A. (2016). Rijit Yol Kaplama İnşasında Ahlat Taşı Betonun Kullanılabilirliği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2).

- Bakış, A. (2018). Atık Çelik Lif Takviyeli Pomza İçeren Reaktif Pudra Betonun Rijit Kaplama İmalatında Kullanımı. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 63-71.
- Bakış, A., & Hattatoğlu, F. (2016). Asfalt yol kaplaması ile sanayi atık lifli reaktif pudra beton yol kaplamasının maliyet karşılaştırması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 421-432.
- Bakış, A., Hattatoğlu, F., & Bayrak, O. Ü. (2017a). Reaktif Pudra Beton ile İnşa Edilecek Rijit Yol Kaplamasının Maliyet Hesaplaması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(1), 183-194.
- Bakış, A., Hattatoğlu, F., & Bayrak, O. Ü. (2017b). Reaktif Pudra Beton ile İnşa Edilecek Rijit Yol Kaplamasının Maliyet Hesaplaması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(1), 183-194.
- Bakış, A. (2015). *Rijit yol üstyapı inşasında reaktif pudra betonun (RPB) kullanılabilirliğinin araştırılması*.
- Bayrak, O. Ü. (2007). Rijit üstyapı tasarımına yeni bir yaklaşım. *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1s*.
- Blanchard, A. H. (1919). *American highway engineers' handbook*. John Wiley & Sons.
- Buick, T. R., & Oppenlander, J. C. (1974). Sensitivity Analysis of Three Rigid Pavement Design Techniques. *Transportation Research Record*, 485.
- Ca, O. H. (2006). *Various hydration reactions of silica fume blended cement under different curing conditions, and a hypothesis for the ultra high strength development mechanism of RPC*.
- Cervantes, V., & Roesler, J. (2009). *Performance of concrete pavements with optimized slab geometry*. Illinois Center for Transportation Research Report ICT-09-053. Rantoul, IL.
- Dallaire, E., Aitcin, P.-C., & Lachemi, M. (1998). High-performance powder. *Civil Engineering*, 68(1), 48.
- Dawood, E. T., Abdullah, M. H., & Plank, J. (2022). The Influence of Hybrid Fibers and Nanomaterials (Nano Glass with Nano Slag) on the Behavior of Reactive Powder Concrete. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 13(3), 159-173.
- De Larrard, F., & Sedran, T. (1994). Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and concrete research*, 24(6), 997-1009.
- Dinler, E., & İpek, M. (2024). Impact Resistance of Sustainable Reactive Powder Concrete and Reinforced Concrete Slabs. *Cement-Wapno-Beton= Cement Lime Concrete*, 28(4), 238-254.

- Doğruyol, M. (2024). Determination of ASR in Concrete Using Characterization Methods. *Buildings*, 14(3), 657.
- Dursun, F. (2024). From Quarry to Monument: Considering Mardin Stone (SE, Türkiye) as the Symbol of Architectural and Cultural Heritage. *Geoheritage*, 16(3), 1-19.
- Düzgün, E. (2004). Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Performanslarının İncelenmesi. *ESOGÜ Müh. Mim. Fak. İnşaat Müh. Böl. Bitirme Proje Çalışması*, 36 s., Eskişehir 2004.
- Edwards, J. F. (2003). Building the Great Pyramid: Probable Construction Methods Employed at Giza. *Technology and Culture*, 44(2), 340-354. <https://doi.org/10.1353/TECH.2003.0063>
- Erel, A. (1978). *Düşey dinamik dingil yükleri altındaki demiryolu yapısında, taban zeminlerinin taşıma güçlerine bağlı olarak, minimum balast kalınlığının hesaplanması*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Farhan, N., Rakibul, H., Habibur Rahman, S., Jawad, A., Noor Md Sadiql, H., Shuvo Dip, D., Hamidul, I., Ashraful, I., Robiul, A., & Arifur, R. (2024). Effect of silica fume on the microstructural and mechanical properties of concrete made with 100% recycled aggregates. *Revista de la construcción*, 23(2), 413-435.
- Feng, H., & Zhengyu, H. (2006). Compressive strength contribution analyses of silica fume and crush quartz in RPC. *Concrete*, 1, 39-42.
- Geetha, S., & Selvakumar, M. (2023). Reactive powder concrete with steel powder and carbon fibres subjected to different curing conditions. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.09.109>
- Guyett, P. C., Chew, D., Azevedo, V., Blennerhassett, L. C., Rosca, C., & Tomlinson, E. (2024). Optimizing SEM-EDX for fast, high-quality and non-destructive elemental analysis of glass. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 39(10), 2565-2579.
- Gülhan, G. (2024). An Outlook on Use of Roller-Compacted Concrete Roads in Rural Development Areas: A Logistics Perspective. İçinde *Theories and Practices for Sustainable Urban Logistics* (ss. 179-198). IGI Global.
- Hendi, S. I., & Aljalawi, N. M. F. (2024a). Behavior of Reactive Powder Concrete reinforced with Hybrid Fibers containing Sustainable Materials. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(3), 13878-13882.
- Hendi, S. I., & Aljalawi, N. M. F. (2024b). Behavior of Reactive Powder Concrete reinforced with Hybrid Fibers containing Sustainable Materials. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(3), 13878-13882. <https://doi.org/10.48084/etasr.7167>
- <https://www.askalecimiento.com.tr/>. (2024, Aralık 8). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.askalecimiento.com.tr/storage/app/media/Yonetim-Belgeleri/Askale-Yonetim->

Belgeleri/TS%20EN%20ISO%209001%20KAL%C4%B0TE%20YS%20BELGES
I%20T%C3%9CRK%C3%87E.pdf

- İpek, M. (2009). *Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Davranışına Katılma Süresince Uygulana Sıkıştırma Basıncının Etkileri*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kaya, G., & Turan, S. (2004). Yüksek fırın curufunun seramik sektöründe katma değeri yüksek ürünlerin eldesinde değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 45(536), 48-60.
- KMX 65/35-Kemerix. (t.y.). Geliş tarihi 25 Aralık 2024, gönderen <https://kemerix.com/urun/kmx-65-35/>
- Kozak, M. (2010). *Beton Travers Üretiminde Agregası Türü (Bazaltkalker) ve Çelik Lifin Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kozak, M. (2011). Beton Yollar ve Beton Yol Yapımının Araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 89-99.
- Kozak, M. (2016). Beton Yollar ve Beton Yol Yapımının Araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 89-99. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yted/issue/22210/238475>
- Rahul, R., Chithra, Dr. R., & Thenmozhi, Dr. R. (2023). Experimental Investigation on Reactive Powder Concrete by Partial Replacement of Cement with Different Pozzolanic Materials. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(6), 2292-2298. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54041>
- Richard, P., & Cheyrezy, M. H. (1994). Reactive Powder Concretes With High Ductility and 200 - 800 Mpa Compressive Strength. *Special Publication*, 144, 507-518. <https://doi.org/10.14359/4536>
- Richard, P., research, M. C.-C. and concrete, & 1995, undefined. (t.y.). Composition of reactive powder concretes. *ElsevierP Richard, M CheyrezyCement and concrete research, 1995•Elsevier*. Geliş tarihi 23 Kasım 2024, gönderen <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695001442>
- Richardson, M. G. (2002). *Fundamentals of durable reinforced concrete* (ss. 51,77,101,133,160-179,194). Spon press.
- Ridho, M. F., Aminuddin, K. M., Hidayat, S., & Albimanzura, R. M. F. S. (2023). INVESTIGASI STUDI BANGUNAN MENGGUNAKAN ALAT ULTRA PULSE VELOCITY (UPV) DAN ALAT HAMMER TEST. *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, 10(1), 38-44.
- Sakthieswaran, N., & Brintha, G. S. (2023a). Utilization of slag powder and recycled concrete wastes in reactive powder concrete. *Materials and Technology*, 57(2), 103-109.

- Sakthieswaran, N., & Brintha, G. S. (2023b). Utilization of slag powder and recycled concrete wastes in reactive powder concrete. *Materials and Technology*, 57(2), 103-109.
- Sarıışık, A., & Sarıışık, G. (2016). Investigation of engineering characteristics of mardin stone used in eco-building. *Cogent Engineering*, 3(1), 1275412.
- Shafabakhsh, G., Naderpour, H., & Noroozi, R. (2015). *Determining the relative importance of parameters affecting concrete pavement thickness*.
- Simatupang, R. M., Nuralinah, D., & Remayanti, C. (2016). Korelasi Nilai Kuat Tekan Beton Antara Hammer Test, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Dan Compression Test. *Rekayasa Sipil*, 10(1), 26-32.
- Soares Santos, G., Mollica Marotta, L. I., Bertelli Fernandes Clemente, G. A., de Miranda Lima, G., Scarano, D., & Reis de Oliveira, C. (2024). CONCRETE ROADS: SUSTAINABLE PAVING. *Environmental & Social Management Journal/Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(10).
- Şimşek, O., Sancak, E., & Yaprak, H. (2005). Beton Yollarında Alternatif Bir Malzeme: Vakumlu Beton. *4th International Advanced Technologies*, 1132, 1137.
- Talebinejad, I., Bassam, S. A., Iranmanesh, A., & Shekarchizadeh, M. (2004). Optimizing mix proportions of normal weight reactive powder concrete with strengths of 200–350 MPa. *Proceedings of the International Symposium on UHPC, Kassel, Germany*, 133-141.
- Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Kocatürk, A. N., & Yerlikaya, M. (2004). *Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler*.
- Tian, K. P., Ju, Y., Liu, H. Bin, Liu, J. H., Wang, L., Liu, P., & Zhao, X. (2012). Effects of silica fume addition on the spalling phenomena of reactive powder concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 174, 1090-1095.
- Topcu, İ. B. (2006). *Beton Teknolojisi* (Uğur Ofset A.Ş.).
- Topçu, İ. B., & Karakurt, C. (2005). Reaktif pudra betonları. *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 437(3), 25-30.
- Topçu, İ. B., Sarıkaya, E., & Akkan, E. (2021). REAKTİF PUDRA BETONLARINDAKİ GELİŞMELER. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 440-449. <https://doi.org/10.31796/OGUMMF.946981>
- Torres, A., Aguayo, F., Allena, S., & Ellis, M. (2020). The effect of various polynaphthalene sulfonate based superplasticizers on the workability of reactive powder concrete. *Journal of Building Material Science*, 2(1), 24-29.
- TS 2824 EN 1338. (2005). *Beton parke taşları-gereksinimler ve deney yöntemleri*.
- Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları* (2. Baskı). Nobel Yayın Dağıtım.

- Umar, F., & Ağar, E. (1991). *Yol Üstyapısı* (ITÜ Matbaası).
- Ünal, O., & Kibici, Y. (2001). Mermer tozu atıklarının beton üretiminde kullanılmasının araştırılması. *Türkiye III. Mermer Sempozyumu (Mersem 2001) Bildiriler Kitabı*, 3-5.
- Wu, B., Xia, J., Zhang, S., Fu, Q., Zhang, H., Xie, X., & Liu, Z. (2023). Elemental composition x-ray fluorescence analysis with a TES-based high-resolution x-ray spectrometer. *Chinese Physics B*, 32(9), 097801.
- Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş., & Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*, 87(12), 2401-2407.
- Yeğınobalı, A. (2010). *Türkiye'nin İlk Beton Yolları: C. Ağustos* (TÇMB/AR-GE/Y09.02).
- Zhu, J., & Wang, J.-P. (2024). Virtual XRD Method in Molecular Dynamics Simulation and a Case Study for Fe₁₆N₂ and Fe₈N Thin Films. *TMS Annual Meeting & Exhibition*, 1693-1704.

EKLER



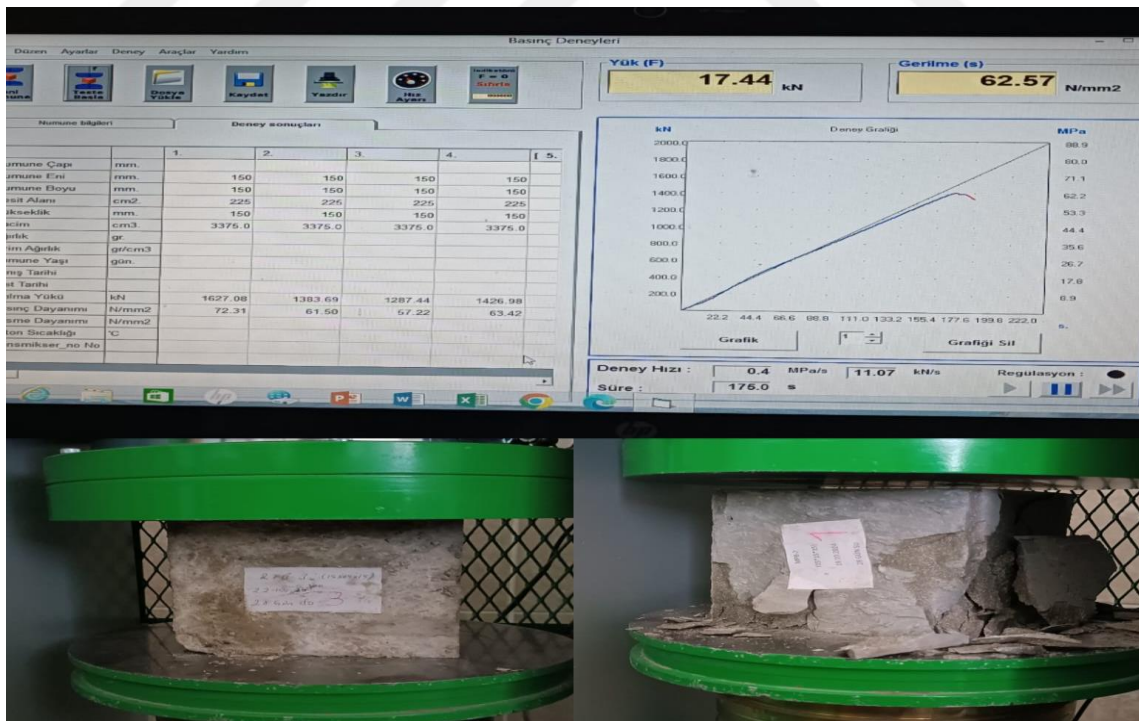
Şekil 0.1. Mardin Türkmen deresi şantiyesi



Şekil 0.2. Mardin taşı tozlu ve referans beton numuneler



Şekil 0.3. Su havuzu içinde bulunan numuneler



Şekil 0.4. Basınç numunesi ve cihazı



Şekil 0.5. Eğilme cihazı ve numunesi



Şekil 0.6. Numune kalıpları



Şekil 0.7. Karıştırıcı (Mikser)



Şekil 0.8. Numune sarsma cihazları



Şekil 0.9. Farklı boyutlardaki Mardin taşı görünümü



Şekil 0.10. Numuneler ve etüv cihazı



Şekil 0.11. UPV deneyinden bir görünüm